



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero



VOLUMEN 109

Enero - Febrero 1998

NUMERO 1



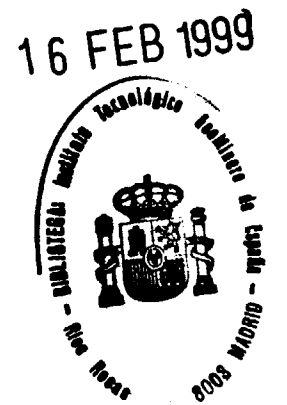
REVISTA BIMESTRAL DEL ITGE FUNDADA EN 1874

ISSN 0366 - 0176



Volumen 109
 Número 1
 Enero-Febrero 1998

boletín geológico y minero



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

Sumario

Geología	H. LLANOS, Y. QUINIF y B. ABALOS: Evolución geodinámica reciente de la Sierra de Cantabria (Alava) en base a la datación U/Th de carbonatos continentales de las cuencas de los ríos Inglares y Ebro.	3
	M. BURLANDO y E. GALLEGU VALCARCE: Inventario de los puntos de interés geológico en Italia.	13
Geoestadística	C. PAREDES y F. J. ELORZA: Análisis y simulación fractal de medios fracturados.	21
Ingeniería Geoambiental	A. CALLABA DE ROA: Determinación de niveles <i>seguros</i> de contaminantes en suelos a partir de consideraciones de riesgo.	35
	A. CALLABA DE ROA: El <i>Hazard Ranking System</i> . Un sistema para la jerarquización de actuaciones en terrenos contaminados.	43
Estudio de Minerales y Rocas	B. ABALOS, J. I. GIL IBARGUCHI y J. AZCARRAGA: Análisis petroestructural de las peridotitas asociadas a la zona de movimiento tectónico de carreiro (complejo de cabo ortegal, NO de España).	53
Información	F. J. AYALA-CARCEDO: Notas sobre la evolución histórica del conocimiento, las estrategias y técnicas de mitigación de las inundaciones y movimientos de ladera en España.	69
	O. PUCHE RIART y L. F. MAZADIEGO MARTINEZ: La conservación del patrimonio minero metalúrgico europeo: Inventario, actuaciones de conservación, archivos y museos.	77
	L. A. DIAZ RODRIGUEZ: Raíces históricas del uso del alabastro por la humanidad.	91

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



Ministerio de Medio Ambiente

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

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

PORTADA:

Cascada de La Cimborra, en el Parque Natural del mismo nombre en Jaén, cerca de Despeñaperros, formada en cuarcitas paleozoicas.

Foto: Francisco Javier Ayala-Carcedo.

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

Gráficas Chile, S.A.L. - Chile, 27 - Telef./Fax 359 57 55 - 28016 -MADRID

EVOLUCION GEODINAMICA RECIENTE DE LA SIERRA DE CANTABRIA (ALAVA) EN BASE A LA DATACION U/Th DE CARBONATOS CONTINENTALES DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS INGLARES Y EBRO.

Por H. LLANOS (*), Y. QUINIF (**) y B. ABALOS (***)

RESUMEN

La datación mediante las series de desintegración radioactiva del U/Th de travertinos de las cuencas de los ríos Inglares y Ebro en la Sierra de Cantabria permite interpretar que durante el Cuaternario más reciente (Pleistoceno terminal y Holoceno) esta zona ha experimentado importantes cambios. La génesis de las cinco unidades travertínicas reconocidas habría estado controlada en primera instancia por la tectónica regional, que condicionó el establecimiento de unidades hidrogeológicas y el encajamiento progresivo de la red fluvial. Cambios del nivel de base de los cursos de agua superficiales y depósito de carbonatos meteogénicos continentales parecen haber sido fenómenos recurrentes relacionables con ciclos de insolación de Milankovich o con fenómenos derivados de los mismos tales como avance y retroceso cíclico del glaciario o con ascensos y descensos del nivel del mar. Aunque los cambios climáticos, geomorfológicos e hidrogeológicos reconocidos habrían tenido lugar de forma natural a lo largo de todo el Holoceno, desde la segunda mitad de este periodo habrían podido estar influenciados también por la acción antrópica.

Palabras clave: Travertino, Datación U/Th, Hidrogeología, Neotectónica, Cambio global, Cuaternario, España.

ABSTRACT

Radiometric U/Th dating of travertine from the Inglares and Ebro river basins in the Sierra de Cantabria enable us to interpret that along the late Quaternary (latest Pleistocene and Holocene) this area witnessed important changes. Formation of the five travertine units recognized was primarily controlled by regional tectonics, which constrained the individualization of hydrogeologic units and incision of surface water courses. Changes in the base-level and deposition of meteogene continental carbonate units appear to have been recurrent phenomena whose relationship is clear to either Milankovich insolation cycles or to induced phenomena such as glacier advance/retreat or sea-level change. Though the climatic, geomorphic and hydrogeologic changes recognized would have occurred naturally along the Holocene, the likely influence of human activity since the second half of this period cannot be excluded.

Key words: Travertine, U/Th dating, Hydrogeology, Neotectonics, Global change, Quaternary, Spain.

1. INTRODUCCION

En la parte meridional de la Provincia de Alava existen varias formaciones travertínicas cuaternarias de carácter lacustre y mixto fluvio-lacustre-aluvial. De ellas, las que se encuentran en la Cuenca del Río Inglares (en el entorno de la Sierra de Cantabria) son conocidas y beneficiadas desde antiguo (excavación de galerías,

- (*) Departamento de Geodinámica. Escuela Universitaria del Profesorado de E.G.B. de Alava. Universidad del País Vasco, C/ Marqués de Urquijo s/n, E-01008 Vitoria (España).
(**) Centre d'Etudes et de Recherches Appliquées au Karst (CERAK). Faculté Polytechnique de Mons. Rue de Houdin, 9. B-7000 Mons (Bélgica).
(***) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad del País Vasco. Apdo. 644, E-48080 Bilbao (España).

extracción de materiales de construcción para casas y pajares) y han sido cartografiadas en las hojas correspondientes del Mapa Geológico Nacional (MARTIN-ALAFONT et al., 1978; PORTERO et al., 1979).

En todos los casos se trata de formaciones superficiales poco potentes y de extensión areal variable que se encuentran ligadas (al menos localmente) a afloramientos de rocas carbonatadas que constituyen acuíferos actualmente o que lo fueron en algún momento del pasado geológico. Los afloramientos aparecen a cotas y con disposiciones geométricas variables. Del mismo modo, presentan relaciones geométricas diversas con los depósitos de ladera y con la red hidrográfica actual. Todas estas características permiten considerar a estas formaciones travertínicas como testigos de la evolución geomorfológica, hidrogeológica y tectónica recientes de la Sierra de Cantabria.

Actualmente estas formaciones presentan interés aplicado como potenciales acuíferos superficiales en una región de una intensa actividad agrícola y debido a sus relaciones poco conocidas con algunas de las unidades hidrogeológicas definidas en la región (LLANOS, 1992). Así mismo, han sido testigos de la evolución tectónica más reciente de la zona de cabalgamiento asociada a la Sierra de Cantabria, continuación oriental de las unidades alóctonas sur-pirenaicas (CHOUKROUNE, 1992).

En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la datación radiométrica U/Th de los carbonatos continentales cuaternarios que afloran a lo largo de las cuencas de los ríos Inglares y Ebro en la Sierra de Cantabria y se discuten sus posibles implicaciones en la reconstrucción de la evolución geodinámica reciente (geomorfológica, hidrogeológica y tectónica) del área.

2. CONTEXTO GEOLOGICO

La Sierra de Cantabria constituye una franja estrecha a favor de la cual se produce el cabalgamiento de la cuenca mesozoico-paleógena vasco-cantábrica sobre la cuenca terciaria del Ebro (Fig. 1). Su constitución estratigráfica es muy variada.

Afloran, por una parte, unidades sedimentarias mesozoicas y cenozoicas preorogénicas de varios centenares de metros de espesor (GARCIA RODRIGUEZ y FERNANDEZ ALVAREZ, 1973; RAMIREZ DEL POZO, 1973) depositadas en ambientes sedimentarios de transición en el borde meridional de la Cuenca Vasco-Cantábrica y, por otra, series cenozoicas postorogénicas dispuestas según una amplia discordancia progresiva (RIBA, 1976). La estructura geológica, muy compartimentada, se caracteriza por la presencia de cabalgamientos, anticlinales y sinclinales fallados, y por estar atravesada por varios diapiros salinos (diapiros de Salinillas de Buradón y Peñacerrada; cf. MARTINEZ TORRES, 1984; ABALOS y LLANOS, 1994). Las direcciones predominantes de los elementos tectónicos son este-oeste en el caso de los cabalgamientos y los pliegues, y oblicuas a la anterior en el caso de las fallas en dirección y rampas laterales asociadas (Fig. 1).

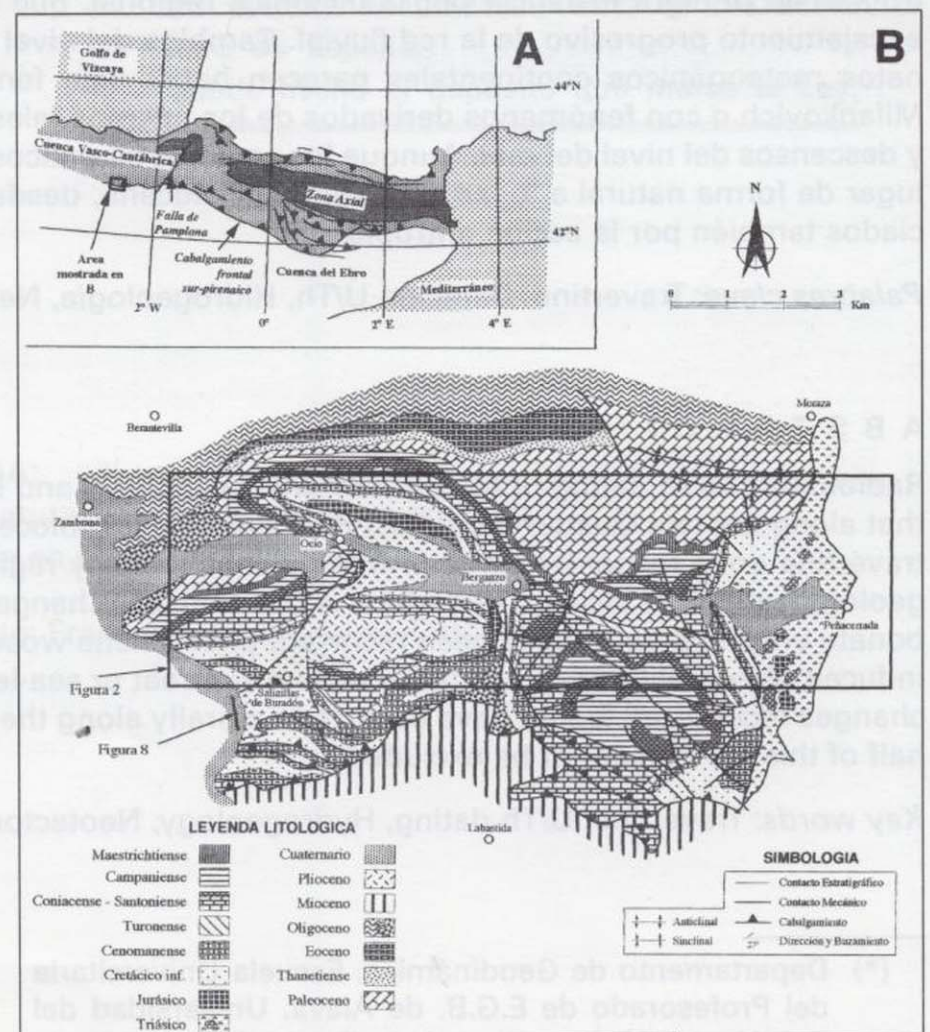


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la parte occidental de la Sierra de Cantabria. Basado en MARTIN ALAFONT et al. (1978) y PORTERO et al. (1979).

La orogenia alpina comienza en esta región en el Eoceno medio-superior (edad de los materiales

extracción de materiales de construcción para casas y pajares) y han sido cartografiadas en las hojas correspondientes del Mapa Geológico Nacional (MARTIN-ALAFONT et al., 1978; PORTERO et al., 1979).

En todos los casos se trata de formaciones superficiales poco potentes y de extensión areal variable que se encuentran ligadas (al menos localmente) a afloramientos de rocas carbonatadas que constituyen acuíferos actualmente o que lo fueron en algún momento del pasado geológico. Los afloramientos aparecen a cotas y con disposiciones geométricas variables. Del mismo modo, presentan relaciones geométricas diversas con los depósitos de ladera y con la red hidrográfica actual. Todas estas características permiten considerar a estas formaciones travertínicas como testigos de la evolución geomorfológica, hidrogeológica y tectónica recientes de la Sierra de Cantabria.

Actualmente estas formaciones presentan interés aplicado como potenciales acuíferos superficiales en una región de una intensa actividad agrícola y debido a sus relaciones poco conocidas con algunas de las unidades hidrogeológicas definidas en la región (LLANOS, 1992). Así mismo, han sido testigos de la evolución tectónica más reciente de la zona de cabalgamiento asociada a la Sierra de Cantabria, continuación oriental de las unidades alóctonas sur-pirenaicas (CHOUKROUNE, 1992).

En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la datación radiométrica U/Th de los carbonatos continentales cuaternarios que afloran a lo largo de las cuencas de los ríos Inglares y Ebro en la Sierra de Cantabria y se discuten sus posibles implicaciones en la reconstrucción de la evolución geodinámica reciente (geomorfológica, hidrogeológica y tectónica) del área.

2. CONTEXTO GEOLOGICO

La Sierra de Cantabria constituye una franja estrecha a favor de la cual se produce el cabalgamiento de la cuenca mesozoico-paleógena vasco-cantábrica sobre la cuenca terciaria del Ebro (Fig. 1). Su constitución estratigráfica es muy variada.

Afloran, por una parte, unidades sedimentarias mesozoicas y cenozoicas preorogénicas de varios centenares de metros de espesor (GARCIA RODRIGUEZ y FERNANDEZ ALVAREZ, 1973; RAMIREZ DEL POZO, 1973) depositadas en ambientes sedimentarios de transición en el borde meridional de la Cuenca Vasco-Cantábrica y, por otra, series cenozoicas postorogénicas dispuestas según una amplia discordancia progresiva (RIBA, 1976). La estructura geológica, muy compartimentada, se caracteriza por la presencia de cabalgamientos, anticlinales y sinclinales fallados, y por estar atravesada por varios diapiros salinos (diapiros de Salinillas de Buradón y Peñacerrada; cf. MARTINEZ TORRES, 1984; ABALOS y LLANOS, 1994). Las direcciones predominantes de los elementos tectónicos son este-oeste en el caso de los cabalgamientos y los pliegues, y oblicuas a la anterior en el caso de las fallas en dirección y rampas laterales asociadas (Fig. 1).

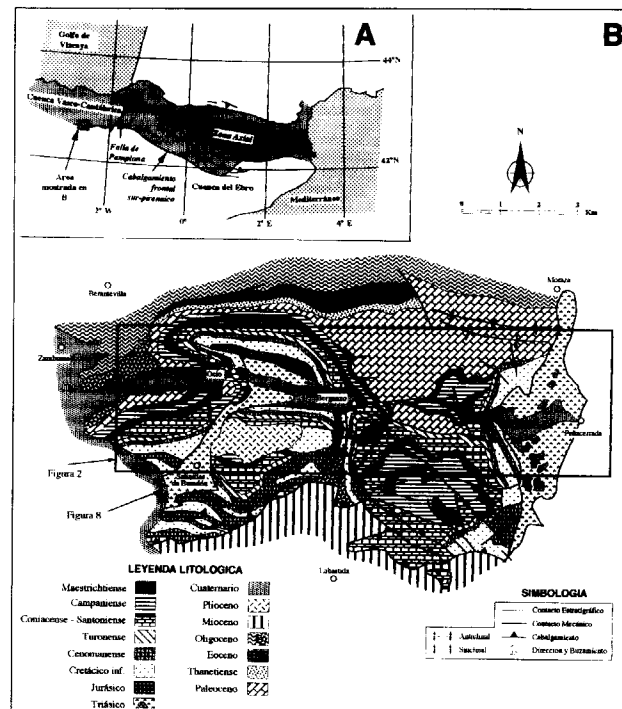


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la parte occidental de la Sierra de Cantabria. Basado en MARTIN ALAFONT et al. (1978) y PORTERO et al. (1979).

La orogenia alpina comienza en esta región en el Eoceno medio-superior (edad de los materiales

preorogénicos marinos más modernos conservados; cf. PLAZIAT, 1981) y se mantiene de forma más o menos pulsante al menos hasta el Plioceno (edad de los materiales sintectónicos más modernos plegados; cf. MARTIN-ALAFONT et al., 1978). Durante este periodo se produce en primer lugar el levantamiento general de la región desde el nivel del mar hasta cotas máximas de 1300-1400 m y posteriormente la erosión del dispositivo arquitectónico formado como consecuencia del encajamiento de la red fluvial, creándose desniveles de hasta 800 m.

La constitución carbonatada de muchas de las unidades involucradas y la intensa compartimentación y fracturación de las mismas ha permitido la formación de numerosas cuencas y unidades hidrogeológicas que han interactuado con los cursos de agua superficiales durante todo el periodo de formación del relieve en la Sierra de Cantabria (LLANOS, 1992; LLANOS et al., 1995). Al igual que ocurriera en el resto de Europa occidental (PENTECOST, 1995), durante los periodos climáticos cálidos interglaciares post-Pliocenos en la Sierra de Cantabria se produjo la sedimentación de carbonatos continentales (travertinos)

en ambientes lacustres en interacción con medios fluviales y aluviales.

3. DESCRIPCION DE LAS UNIDADES TRAVERTINICAS

Las observaciones realizadas sobre el terreno han permitido identificar cuatro unidades travertínicas individualizadas (sin relaciones geométricas directas) a lo largo del cauce del río Inglares (Fig. 2), así como en torno a su desembocadura en el Ebro, y una quinta unidad relicta en el propio cauce del Ebro varios km aguas abajo, en las proximidades de Salinillas de Buradón (Alava), todavía en el entorno de la Sierra de Cantabria. En todos los casos se trata de travertinos meteogénicos, bien autóctonos, bien alóctonos, según las clasificaciones de PENTECOST y VILES (1994) y de PENTECOST (1995). Los travertinos de esta categoría pueden presentar morfologías diversas, pero en todos los casos su característica genética primordial es la de mostrar la mayor dependencia respecto de los factores climáticos. A continuación se describen las cinco unidades reconocidas.

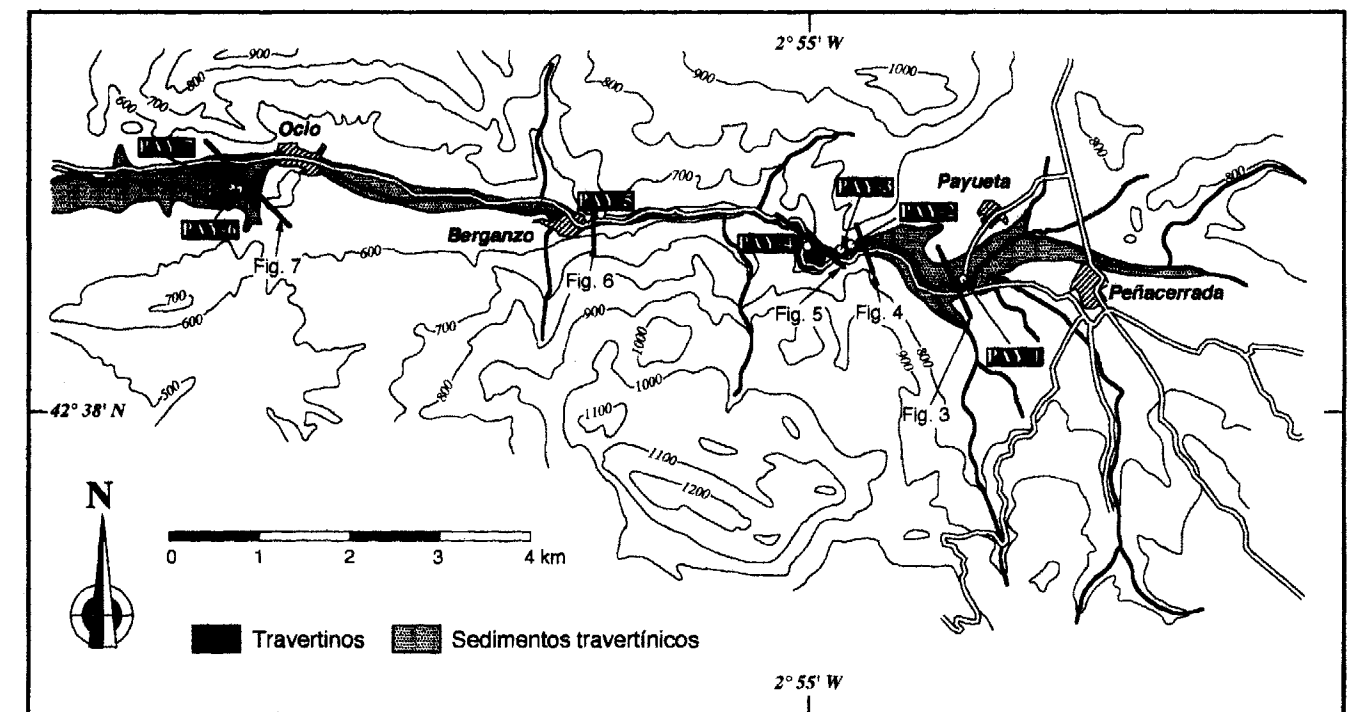


Figura 2. Mapa geológico simplificado de la cuenca del Inglares en el que junto con la topografía general se muestran los afloramientos de las formaciones travertínicas estudiadas, la localización de las figuras 3 a 7 y la ubicación de los puntos de muestreo.

3.1. Unidad I

Se trata de una terraza travertínica parcialmente disectada existente en la parte más alta de la cuenca del río Inglares, donde rellena el fondo del valle fluvial. Esta unidad tiene varios metros de espesor y se encuentra a una cota de entre 700 y 710 m s.n.m. (Fig. 3). Se dispone en la mayor parte de su extensión directamente sobre los materiales evaporíticos del Trías Keuper que afloran en el diapiro de Peñacerrada. En el resto de los casos está en contacto directo con unidades calizas fracturadas del Cretácico superior y Paleoceno que funcionan actualmente como acuíferos. En diversas ocasiones los coluviones asociados a las laderas de los relieves que rodean el diapiro de Peñacerrada progradan sobre esta unidad (Figs. 3 y 4), a la que postdatan. Al sur de la localidad de Payueta, en las inmediaciones del contacto entre el diapiro y su roca de caja, la unidad aparece basculada 15° hacia el este, sugiriendo el ascenso (extrusión) de la columna de sal con posterioridad a su formación.

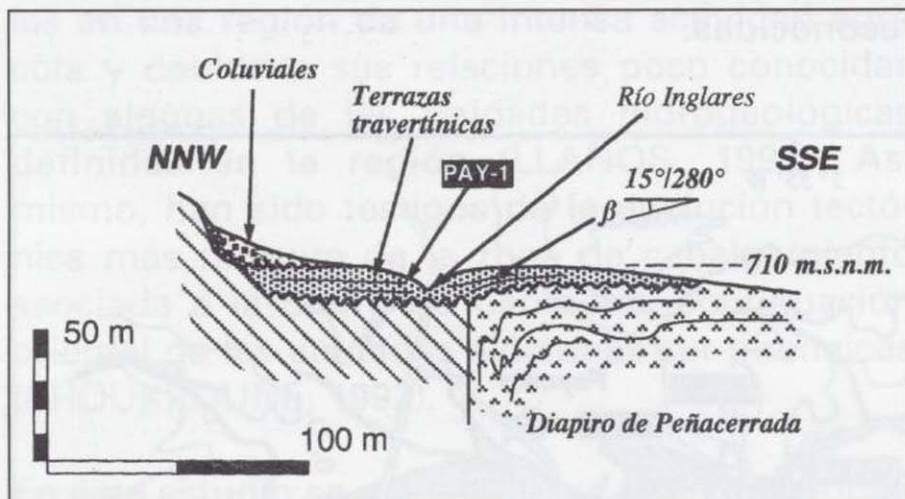


Figura 3. Corte geológico representativo de la Unidad I al sur de Payueta.

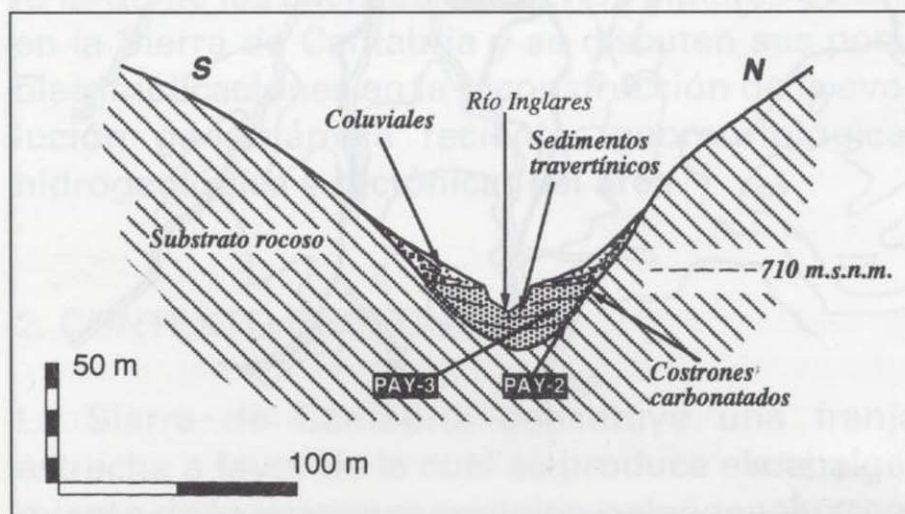


Figura 4. Corte geológico de la Unidad I en la embocadura del cañón del Inglares.

Las muestras PAY-1 y PAY-3 fueron recogidas en esta unidad (Fig. 3). La muestra PAY-2 corresponde a una costra carbonatada adherida al substrato calizo sobre el que se dispone la terraza travertínica superior del Inglares (Fig. 4). Desde el punto de vista estratigráfico se trata de una roca más antigua que el relleno del valle fluvial, y por lo tanto que las muestras PAY-1 y PAY-2.

3.2. Unidad II

Se trata una franja travertínica situada aguas abajo de la Unidad I e individualizada de la terraza superior. Esta segunda unidad se dispone inclinada (probable inclinación original) sobre un tramo del cauce del Inglares de pendiente superior a la dominante en las partes alta y baja de la cuenca (Fig. 5). La parte basal en contacto con el substrato se presenta bajo la forma de costrones carbonatados. El resto de la unidad es de carácter más detrítico, existiendo capas de travertinos tubulares autóctonos formados alrededor de tallos y raíces de plantas (travertinos paludales de PENTECOST, 1995). La muestra PAY-4 fue tomada en una de tales capas, a una cota aproximada de 620 m s.n.m. (Fig. 5).

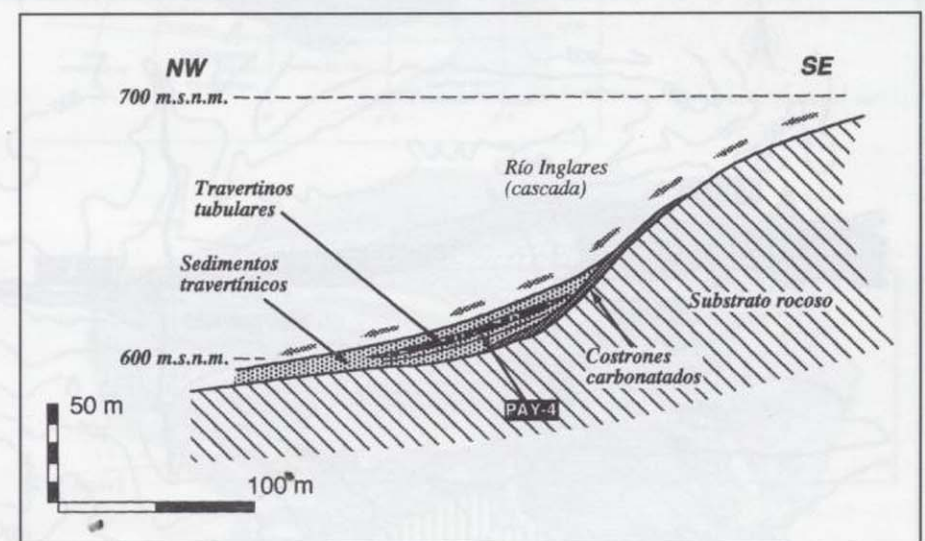


Figura 5. Corte geológico representativo de la Unidad II en el curso medio del Inglares. Nótese la inclinación original de la unidad paralelamente a la pendiente del curso fluvial.

3.3. Unidad III

Consta de varios afloramientos situados a una cota similar (620 m s.n.m.) en ambas márgenes del cauce del Inglares. Probablemente se trata de restos de lo que debió ser una amplia terraza que rellenaba el fondo del valle a lo largo del curso bajo del Inglares. El espesor conservado en algu-

nos puntos es del orden de 10-15 m y aunque actualmente los afloramientos tienen sólo algunas decenas de metros de anchura (Fig. 6), en su conjunto debieron alcanzar algunos centenares de metros de anchura inicial. La parte basal de esta unidad (primeros 2-3 metros conservados) es de carácter mixto, formada por sedimentación autóctona de lechos de espesor decimétrico de travertino e intercalaciones marcadamente detríticas. Estas últimas consisten en conglomerados heterométricos y polimícticos con cantos ligeramente redondeados de tamaño decimétrico procedentes de las rocas del entorno geológico inmediato. Entre los mismos se encuentran frecuentes fragmentos de travertinos tubulares como los descritos en la unidad anterior. El resto de la unidad es una terraza travertínica con abundantes formas tubulares, restos de plantas, etc.

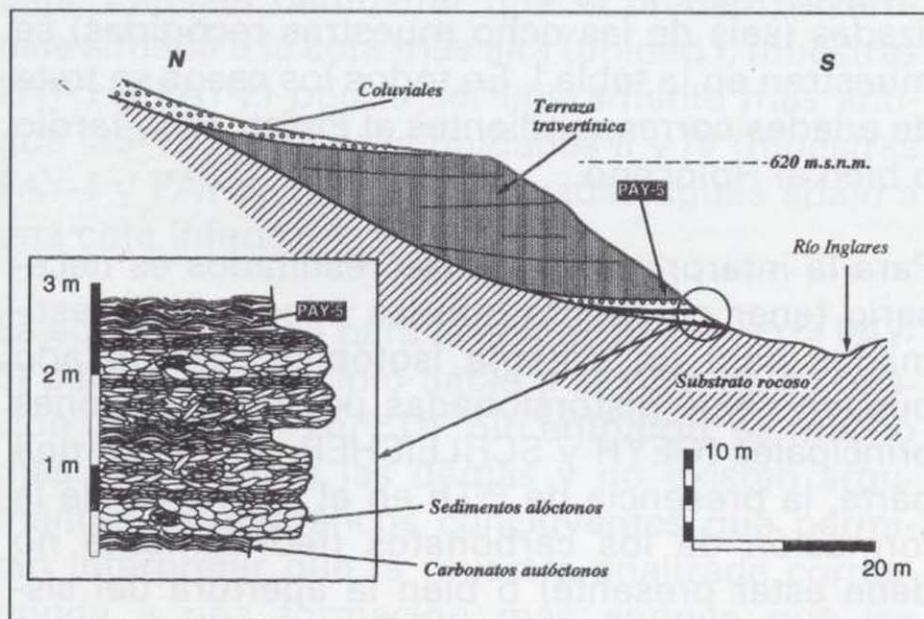


Figura 6. Corte geológico representativo de la Unidad III al este de Berganzo.

La muestra PAY-5 fue tomada en la parte basal de este tramo (Fig. 6). Los coluviones asociados a las laderas del cauce solapan y postdatan esta unidad. La presencia de fragmentos travertínicos en la base de esta unidad sugiere razonablemente que es más moderna que las unidades I y II. Sin embargo, la ausencia de relaciones geométricas directas entre ellas no permite descartar definitivamente que se trate de una unidad coetánea o incluso más antigua.

3.4. Unidad IV

Esta unidad conforma el relleno actual de la parte baja de la cuenca, con una anchura de entre 50 y

500 m aproximadamente durante los últimos 6 km de curso fluvial hasta la desembocadura del Inglares en el Ebro al Sur de Zambrana. Dentro de esta unidad se pueden distinguir dos porciones con caracteres diferentes (Fig. 7). La porción basal consiste en sedimentos detríticos travertínicos de origen fluviolacustre (alóctonos) sobre los que se asienta el cauce y la vega del río. La porción superior es de carácter autóctono y corresponde a una porción casi totalmente desmantelada de un represamiento lacustre que conforma una especie de muro de contención de 10-15 m de altura al este de la localidad de Ocio (Fig. 2). La porción inferior de esta unidad se sitúa a cotas que varían gradualmente entre 600 m s.n.m. (aguas arriba) y 510 m s.n.m. (en la desembocadura). La parte más alta de la porción superior se sitúa a una cota constante de 535 m s.n.m. (Fig. 3, corte E-E'). Las muestras PAY-6 y PAY-7 fueron recogidas en las partes superior e inferior de esta unidad, respectivamente (Fig. 7).

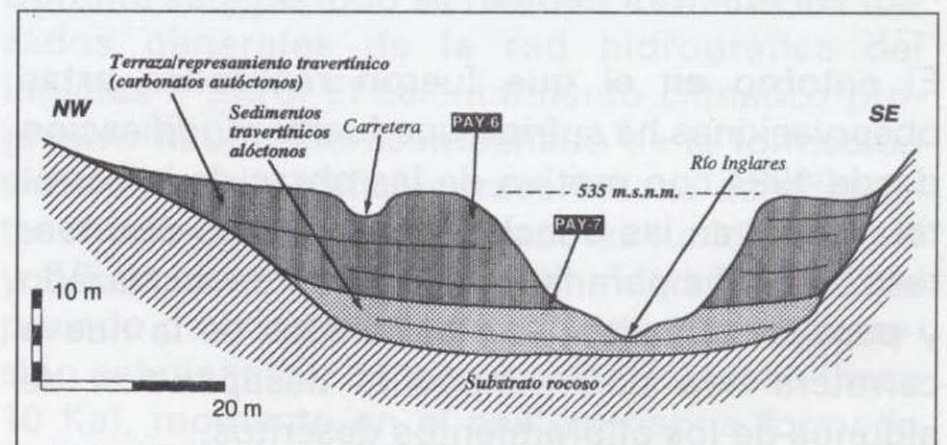


Figura 7. Corte geológico representativo de la Unidad IV al oeste de Ocio.

3.5. Unidad V

Se trata de una unidad de reducidas dimensiones existente junto al cauce del Ebro en Salinillas de Buradón (Alava). Las observaciones permiten reconocer una terraza travertínica (de carácter oncolítico) de unos 5 m de espesor y con su cota superior situada a unos 440 m s.n.m. La terraza se encuentra adyacente al cauce actual del Ebro y es inundada y erosionada durante los periodos de aguas altas. La muestra PAY-8 fue tomada de una de las porciones con estructura oncolítica de esta terraza. El substrato sobre el que se apoya corresponde a sedimentos limolíticos y arenosos del Ebro de poco espesor, o bien a materiales salinos del Trías Keuper asociados al diapiro de

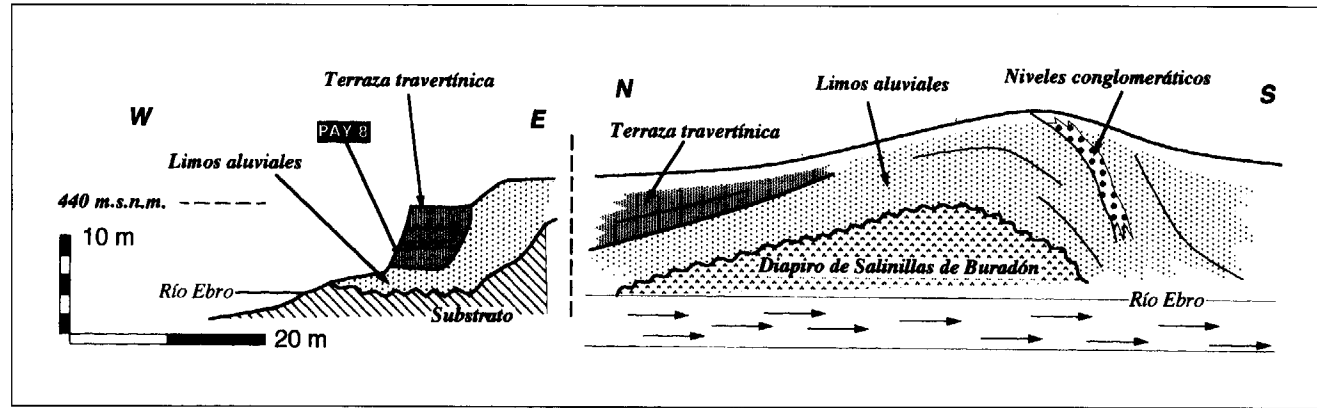


Figura 8. Corte geológico representativo de la Unidad V al oeste de Salinillas de Buradón.

Salinillas de Buradón (Fig. 8). La disposición ligeramente inclinada de esta unidad así como la presencia de niveles de conglomerados aluviales verticalizados en las inmediaciones, permite inferir una movilidad importante del Trías salino con posterioridad al depósito de estos materiales.

El entorno en el que fueron realizadas estas observaciones ha sufrido una fuerte modificación desde 1994 con motivo de las obras de la carretera N-232 en las Conchas de Haro. Los desmontes realizados para la modificación de su trazado y para la estabilidad de los taludes de la nueva carretera han determinado la desaparición de algunos de los afloramientos descritos.

4. RESULTADOS. DISCUSION.

En principio cabe esperar que las cinco unidades reconocidas respondan a otros tantos episodios de sedimentación carbonática relacionados con ambientes de tipo lagunar, fluvial y/o aluvial posi-

blemente individualizados en el tiempo. Los resultados radiométricos obtenidos y las relaciones isotópicas principales para las muestras analizadas (seis de las ocho muestras recogidas) se muestran en la tabla I. En todos los casos se trata de edades correspondientes al Pleistoceno tardío o bien al Holoceno.

Para la interpretación de los resultados es necesario tener en cuenta que las edades U/Th estimadas para un sistema isotópico carbonatado pueden verse distorsionadas por varias razones principales (GEYH y SCHLEICHER, 1990). De una parte, la presencia de ^{230}Th en el momento de la formación de los carbonatos (teóricamente no debe estar presente) o bien la apertura del sistema isotópico durante algún periodo posterior pueden invalidar las hipótesis de partida que permiten establecer las dataciones radiométricas. Por otra, la presencia entre los carbonatos de elementos isotópicos procedentes de rocas más antiguas (por ejemplo debido a la circulación de aguas subterráneas) puede dar lugar a edades más viejas que las reales.

Tabla 1

Muestra	U(ppm)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}_{1.0}$	Edad(Ka)
PAY-1	0.151±0.008	1.332±0.059	0.280±0.034	2.3±0.5	1.366	35.1±5.3/-4.9
PAY-2	0.251±0.005	1.357±0.026	0.142±0.007	1.9±0.1	1.373	16.6±0.8/-0.9
PAY-4	0.135±0.003	1.314±0.032	0.089±0.005	1.9±0.1	1.323	10.0±0.6/-0.5
PAY-5	0.180±0.005	1.187±0.036	0.923±0.033	15.5±1.1	1.363	235.6±38.5/-27.7
PAY-6	0.264±0.010	1.349±0.050	0.096±0.007	2.6±0.3	1.330	10.9±0.9/-0.8
PAY-8	0.357±0.020	1.311±0.068	0.411±0.028	1.6±0.1	1.364	56.1±5.2/-4.9

Las edades calculadas para las muestras PAY-1, PAY-2, PAY-4, PAY-6 y PAY-8 no son, en principio, definitivas debido a la baja relación isotópica $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (BISCHOFF et al., 1988). No obstante, estos resultados podrían ser válidos en algún caso. Para demostrarlo habría que comparar los resultados obtenidos con muestras situadas en diferentes contextos estratigráficos o disponer de otros argumentos geológicos. Los resultados obtenidos se discuten desde esta perspectiva en los párrafos que siguen.

Las edades radiométricas obtenidas para las muestras PAY-2, PAY-4 y PAY-6, las más modernas (Holoceno), se interpretan como próximas a su edad geocronológica real, a pesar de su baja relación $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$, ya que en rocas tan modernas la citada relación debe ser necesariamente muy baja. Parecen demostrar que la unidad travertínica situada a la cota más alta (unidad I; muestras PAY-1 y PAY-2) podría ser ligeramente más antigua (35-17 Ka) que las unidades II y IV (muestras PAY-4 y PAY-6; 10-11 Ka), situadas aguas abajo a una cota inferior.

La edad calculada para la unidad III (muestra PAY-5) parece en principio fiable a la vista de su relación isotópica $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$. Sin embargo, es mucho más antigua que las demás y no existen argumentos estratigráficos concluyentes que permitan interpretar que la muestra analizada corresponda a una formación más antigua que las demás. Una explicación posible para este resultado puede estar relacionada con dos factores. De una parte, la modificación de la composición isotópica del sistema debido a la circulación de aguas subterráneas a través de la formación travertínica tras su erosión parcial debido a un descenso del nivel de base. De otra, la posible relación de esta unidad con el acuífero asociado a las formaciones calcáreas del Cretácico superior del anticlinal de Ocio (Fig. 1), el cual intersecta a la red hidrográfica actual en las inmediaciones de la unidad en que fue tomada la muestra PAY-5. No obstante lo anterior, la edad proporcionada por esta muestra coincide con un estadio isotópico muy favorable a la formación de travertinos (HAQ y VAN EYSINGA, 1987; GEYH y SCHLEICHER, 1990).

Algo similar a lo discutido para la unidad III podría haber ocurrido con la unidad V (muestra

PAY-8). El hecho de que se encuentre inmediatamente adyacente al cauce actual del Ebro y los argumentos geomorfológicos que se discutirán a continuación, apuntan en la dirección de que la edad de 56 Ka obtenida pueda ser más antigua que la edad real.

Si la interpretación correcta de los resultados es la expuesta, podría concluirse que la formación de depósitos carbonatados continentales en las cuencas del Inglares y Ebro en la Sierra de Cantabria ocurrió durante las etapas finales de calentamiento de la glaciación Würm y el comienzo del Holoceno (periodo interglacial) sin que sea posible por el momento especificar con detalle los estadios isotópicos concretos. Las condiciones favorables para el depósito de carbonato se habrían dado inicialmente en cotas relativamente más elevadas de la cuenca (unidad I), posiblemente en relación con el desarrollo de un ecosistema boscoso (VAUDOUR, 1994). Durante este periodo se habrían formado los trazados generales de la red hidrográfica del Inglares y Ebro. El calentamiento climático progresivo habría ido acompañado de la formación simultánea de edificios travertínicos de diferentes morfologías a diferentes cotas (unidades II, III y IV), posiblemente en continuidad física. Este periodo de construcción habría tenido su expresión culminante a comienzos del Holoceno (hace 10 Ka), momento en el cual se habría formado una amplia terraza travertínica con represamientos a cotas situadas entre 540 y 510 m s.n.m.

Cambios climáticos y/o medioambientales adicionales habrían provocado un aumento de la erosión y sedimentación aluviales, desmantelándose los edificios carbonatados previamente construidos y en algunos casos modificándolos en lo referente a su constitución isotópica debido a la interacción con aguas meteóricas y subterráneas. Este cambio habría influido también en la modificación del nivel de base del Ebro.

Entre las localidades de Zambrana (Alava) y Haro (La Rioja) el Ebro presenta dos modificaciones en su perfil transversal muy localizadas pero importantes, estrechándose hasta el punto de formar pequeños cañones. La primera se encuentra en la intersección del cresterío de calizas cretácicas del Cerro Cabrera con el Ebro y en ella el desnivel actual entre las partes superior e inferior del per-

fil transversal del río es de unos 20-30 m. La segunda se encuentra algunos km aguas abajo en el paraje conocido como "Conchas de Haro". Corresponde a la intersección del Ebro con formaciones cretácicas verticalizadas y en este punto la diferencia de cota entre el cauce del río (de 30 m de anchura) y la parte alta de su perfil transversal regularizada alcanza 60-80 m. Las partes altas de los dos accidentes descritos tienen una cota similar a la de los edificios travertínicos preservados en la parte baja del río Inglares. La erosión de estas dos barreras por el Ebro habría provocado el descenso del nivel de base general y la erosión de las unidades travertínicas II, III y IV. Si las edades de estas unidades se sitúan en torno a 10 Ka, ello implicaría que el Ebro y el Inglares habrían sufrido un importante encajamiento durante el Holoceno.

La unidad V, según la argumentación presentada, debería ser más moderna que las anteriores. De este modo, la edad de 56 Ka obtenida para la muestra PAY-8 sería una edad aparente, discordante en base a argumentos geomorfológicos. No obstante, esta muestra, junto con la PAY-1, podría indicar una actividad carbonatogénica durante un estadio isotópico (65-35 Ka) de carácter interstadial cálido en el que se han encontrado travertinos en otros lugares de la Península Ibérica y Europa central (PENTECOST, 1995, y referencias en este trabajo).

En lo referente a la actividad tectónica reciente, las estructuras geológicas conservadas atestiguan deformaciones regionales post-pliocenas (4-5 Ma). Desde ese momento hasta la actualidad se ha producido una incisión importante de la red hidrográfica a un ritmo medio de 0.15-0.20 mm/año. La formación de travertinos en las etapas finales de este proceso es un fenómeno que se puede considerar instantáneo a escala del tiempo geológico (hasta 10 mm/año). Suponiendo que la velocidad de encajamiento de la red fluvial del Inglares y del Ebro haya sido constante desde comienzos del Holoceno hasta la actualidad, aquélla habría sido importante, de 3 a 5 mm/año. Finalmente, los resultados obtenidos de este trabajo son indicativos de actividad neotectónica holocena al menos en relación con diapiros: basculamiento de 15° en la unidad travertínica I en relación con la extrusión salina en el diapiro de Peñacerrada; basculamiento de hasta 90° debido

a las mismas causas en relación con la unidad travertínica V en torno al diapiro de Salinillas de Buradón. Estas deformaciones probablemente son de carácter localizado, no de escala regional, al igual que parece ocurrir en otras áreas de la vertiente plegada meridional del Pirineo (MASANA y SANS, 1996).

El Holoceno habría sido testigo de profundos cambios en los ecosistemas naturales y la geomorfología de la Sierra de Cantabria. Tales alteraciones bioclimáticas habrían llegado a provocar el cese de la precipitación de carbonatos continentales y es posible que hayan estado condicionadas por la acción antrópica. En este sentido, cabe reseñar que en el Sur de la Provincia de Alava, incluyendo el entorno de la Sierra de Cantabria, son conocidos numerosos yacimientos arqueológicos de la época Neolítica final y de comienzos de la edad del bronce (SAENZ DE BURUAGA, 1996). VAUDOUR (1994) sugiere, sobre la base de estudios realizados en formaciones travertínicas del sureste francés, la predisposición del hombre desde la época pre-histórica antedicha (hace 4000 años) a ocupar y modificar según sus necesidades agrícolas (desecando lagunas y provocando el descenso artificial de niveles piezométricos) los ecosistemas húmedos en los que existen construcciones travertínicas.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de este estudio parecen indicar que durante el Cuaternario más reciente (Pleistoceno terminal y Holoceno) la zona de la Sierra de Cantabria ha experimentado importantes cambios climáticos, geomorfológicos e hidrogeológicos. La génesis de las unidades travertínicas reconocidas habría estado controlada en primera instancia por la tectónica regional, la cual condicionó el establecimiento de unidades hidrogeológicas y el encajamiento progresivo de la red fluvial. Cambios del nivel de base de los cursos de agua superficiales y depósito de carbonatos meteogénicos continentales parecen haber sido fenómenos recurrentes durante el Pleistoceno final y Holoceno. En otras regiones, de ambientes en ocasiones totalmente distintos, estos cambios se han relacionado directamente con ciclos de insolación de Milankovich (EDWARDS et al., 1986/87) durante el Cuaternario

o con fenómenos derivados de los mismos tales como el avance y retroceso cíclico del glaciarismo (CLARK y BARTLEIN, 1995) o los ascensos y descensos del nivel del mar (GRANJA y SOARES DE CARVALHO, 1995). En la Sierra de Cantabria, sobre todo en la porción más reciente del Holoceno, el depósito de carbonatos continentales ha podido estar influenciado también por la acción antrópica.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Dr. J.J. Durán Valsero sus comentarios constructivos y correcciones al manuscrito original así como a L. Aparicio su gestión editorial. Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación: UPV 001.154EA.061-95.

REFERENCIAS

- ABALOS, B. y LLANOS, H. (1994): Structure of the "Sierra de Cantabria" (Southern Pyrenean Frontal Thrust, Basque Country, Spain): a new perspective from section balancing. *C. R. de la Acad. des Sciences de Paris, série II*, 319, 475-481.
- BISCHOFF, J.L., ROSENBAUER, R.J., TAVOSO, A. y LUMLEY, H. (1988): A test of Uranium-series dating of fossil tooth enamel: results from Tournal cave (France). *Applied Geochemistry*, 3, 145-151.
- CHOUKROUNE, P. (1992): Tectonic evolution of the Pyrenees. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 20, 143-158.
- CLARK, P.U. y BARTLEIN, P.J. (1995): Correlation of late Pleistocene glaciation in the western United States with north Atlantic Heinrich events. *Geology*, 23, 483-486.
- EDWARDS, R.L., CHEN, J.H. y WASSERBURG, G.J. (1986/87): 238U-234U-230Th-232Th systematics and the precise measurement of time over the past 500.000 years. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 81, 175-192.
- GARCIA RODRIGUEZ, B. y FERNANDEZ ALVAREZ, J.M. (1973): Estudio Geológico de la Provincia de Alava, vols. I y II. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España, nº 83, Madrid; 198 p.
- GEYH, M.A. y SCHLEICHER, H. (1990): Absolute age determination: physical and chemical dating methods and their application. Springer-Verlag, Heidelberg; 503 p.
- GRANJA, H.M. y SOARES DE CARVALHO, G. (1995): Sea-level

changes during the Pleistocene-Holocene in the NW coastal zone of Portugal. *Terra Nova*, 7, 60-67.

HAQ, B.U. y VAN EYSINGA, F.W.B. (1987): *Geological Time Table*, 4rd Edition. Elsevier.

LLANOS, H.J. (1992): Estudio hidrogeológico de la unidad de Urbasa-Montes de Vitoria-Treviño y sectores adyacentes. Tesis Doctoral, Univ. del País Vasco, Bilbao; 334 p.

LLANOS, H., ABALOS, B. y GARFIAS, J. (1995): Análisis de la influencia de las características estructurales en el funcionamiento hidrogeológico de la Sierra de Cantabria (Alava, País Vasco). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, v. 19(7), 407-421.

MARTIN-ALAFONT, J.M., RAMIREZ DEL POZO, J., PORTERO, J.M. y RIBA, O. (1978): Hoja nº 138 ("La Puebla de Arganzón") del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (MAGNA) y memoria explicativa, Publ. del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

MARTINEZ TORRES, L.M. (1984): Geología de la Sierra de Cantabria entre Palomares y Toloño. *Azterlanak*, 4, 68p.

MASSANA, E. y SANS, N. (1996): Deformación neotectónica relacionada con anticlinales de núcleo salino (NE de la cuenca del Ebro, Barcelona). *Geogaceta*, 20, 846-849.

PENTECOST, A. (1995): The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor. *Quaternary Sci. Reviews*, 14, 1005-1028.

PENTECOST, A. y VILES, H. (1994): A review and reassessment of travertine classification. *Geogr. Phys. et Quaternaire*, 48, 305-314.

PLAZIAT, J.C. (1981): Late Cretaceous to Late Eocene paleogeographic evolution of southwest Europe. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 36, 263-320.

PORTERO, J.M., RAMIREZ DEL POZO, J. y AGUILAR, M.J. (1979): Hoja nº 170 ("Haro") del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (MAGNA) y memoria explicativa, Publ. del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

RAMIREZ DEL POZO, J. (1973): Síntesis Geológica de la Provincia de Alava. *Obra Cultural de la Caja de Ahorros Municipal de la Ciudad de Vitoria*; 64p.

RIBA, O. (1976): Tectogenèse et sédimentation: deux modèles de discordances syntectoniques pyrénéenes, *Bull. B.R.G.M.*, ser. 2, sect. 4, 383-401.

SAENZ DE BURUAGA, A. (1996): La antigüedad pre-histórica. En: "Alava, nuestra Historia". Ed. El Correo-Español-El Pueblo Vasco, 33-56.

VAUDOUR, J. (1994): Evolution Holocène des travertins de Vallée dans le Midi Méditerranéen Français. *Géogr. Phys. et Quaternaire*, 48, 315-326.

Original recibido: Marzo 1997.

Original aceptado: Junio 1997.

INVENTARIO DE LOS PUNTOS DE INTERES GEOLOGICO EN ITALIA.

M. BURLANDO (*) y E. GALLEG0 VALCARCE (**)

R E S U M E N

Este artículo resume las investigaciones y los problemas que se debaten en el seno de la comunidad científica sobre la conservación del patrimonio geológico en Italia. Se examinan los aspectos legislativos, el estado de los inventarios en diversas regiones y los criterios metodológicos aplicados en la selección de los lugares, el papel de los puntos de interés geológico en el interior de los espacios naturales protegidos y las perspectivas futuras.

Palabras clave: Patrimonio geológico, Legislación, Puntos de interés geológico, Inventarios, Espacios naturales protegidos, Italia.

A B S T R A C T

This paper represents a framework about geological heritage conservation in Italy. Successively legal instruments, state of regional censuses, geosites selection criteria, connection between geosites and protected areas and future prospects are described.

Key words: Geological heritage, Legal framework, Geosites, Census, Protected natural areas, Italy.

INTRODUCCION

La importancia de la conservación de los espacios naturales, entendidos no sólo por sus factores bióticos (fauna, flora, etc.), sino también como conservación de los elementos físicos del territorio, está reconocida desde hace tiempo tanto a nivel internacional (UNESCO, IUCN, IUGS, Consejo de Europa, etc.) como nacional.

En diferentes y sucesivas fases de la investigación, los estudiosos de todos los países europeos han establecido los criterios de selección de los puntos de interés geológico ("*geotopi*" en italiano, "*geosites*" en la terminología anglosajona), identificándolos como elementos físicos del territorio o características singulares del paisaje que constituyen un atractivo por su componente estético, pero que también presentan atributos de tipo científico, cultural o socio-económico.

(*) SIGEA - Società Italiana di Geologia Ambientale, Casella postale 15244 - 00143 Roma, Italia.

(**) Comunidad de Madrid, c/ Princesa, 3 - 28008 Madrid.

REFERENCIAS A LA LEGISLACION NACIONAL Y REGIONAL

En Italia, la necesidad de conservar y valorar estos aspectos particulares del paisaje se remonta a 1939 con la promulgación de leyes sobre la "protección de los bienes de interés artístico e histórico" (L.1089/39) y la "protección de las bellezas naturales" (L. 1497/39).

Sucesivamente y de manera cada vez más articulada, en especial en estos últimos años, otras leyes de carácter nacional se han interesado por la protección y conservación de los aspectos físicos del territorio, como la ley promulgada por el "*Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali*" (D.L. 657/74) y la ley que identifica y protege las zonas de especial interés ambiental y paisajístico (L. 431/85).

Sin embargo, la ley más significativa de las recientemente promulgadas, es la ley de bases sobre espacios naturales protegidos (L. 394/91).

En su Art. 1 se hace continuamente referencia a la promoción, conservación y valoración del patrimonio natural del país en sus diferentes formas, entre las que se señalan "las formas físicas, geológicas, geomorfológicas, etc.". También en el Art. 1 se habla de "...conservación ... de singularidades geológicas, de formaciones paleontológicas, ...de equilibrio hidráulico e hidrogeológico...".

En el marco de la clasificación de los espacios naturales protegidos, la L. 394/91 (Art. 2) reconoce como áreas a proteger las que presenten, entre otras características, "...una o más formaciones físicas, geológicas, geomorfológicas ... de relevancia internacional o nacional por su valor natural, científico, estético, cultural y recreativo..." (ya sean éstas áreas parques nacionales, parques regionales o reservas naturales).

Asimismo, la L. 394/91 en su Art. 3, establece un importante instrumento de programación para la política de espacios naturales protegidos, denominado "Cartografía de la Naturaleza" ("*Carta della Natura*") (aún en fase de elaboración, cuyo objetivo es presentar un cuadro actualizado del estado del ambiente natural, en el que deben resaltarse los "valores naturales" (entre otros, todos los puntos de interés geológico) y los "perfiles de vulnerabilidad territorial").

Procedimientos de conservación análogos han sido recogidos casi por todas las legislaciones regionales.

En algunos casos se han promulgado leyes que tratan específicamente de la protección y valoración de los lugares de interés geológico, destacando la Región de Lombardía (Italia septentrional), la Región de Las Marcas (Italia central) y la Región de Cerdeña (Italia insular).

En otros casos, las administraciones regionales han legislado de forma muy general el tema de la protección de la naturaleza y del territorio, haciendo referencia a los instrumentos urbanísticos de planificación territorial y a los espacios naturales protegidos. En el marco de estos últimos, a menudo se ha previsto también una figura de protección especial definida como "monumento natural", que engloba las áreas, generalmente reducidas, caracterizadas por fenómenos

naturales o formaciones geológicas especialmente significativas desde el punto de vista paisajístico o natural.

ESTADO ACTUAL DE LOS INVENTARIOS Y CRITERIOS METODOLÓGICOS ADOPTADOS EN LA SELECCIÓN DE LOS PUNTOS Y/O LUGARES DE INTERÉS GEOLOGICO

La conservación del patrimonio geológico constituye, desde hace varios años, un campo de aplicación de considerable interés para los numerosos estudiosos de las Ciencias de la Tierra.

Estas actividades se están llevando a cabo tanto en universidades como en institutos de investigación estatales y asociaciones científicas; en algunos casos, las investigaciones y los inventarios se han visto afectados por una intervención directa y/o indirecta de las Administraciones Públicas, sobre todo en el ámbito del urbanismo y la planificación territorial.

Actualmente, en Italia todavía no se ha puesto en marcha un inventario nacional de puntos de interés geológico, aunque, en cierto modo, esta actividad está prevista por la citada ley de bases sobre los espacios naturales protegidos (L. 394/91) en el marco de la "Cartografía de la Naturaleza" (Art. 3), que encuentra su equivalente en España en la "Cartografía del Patrimonio Natural", incluida en el "Plan Nacional de Cartografía Temática Ambiental" (BUSTAMANTE CALABUIG, M. 1996; GALLEGU VALCARCE, E.; BARETTINO FRAILE, D. 1996).

Así pues, al no existir una coordinación nacional precisa, a nivel local se han llevado a cabo numerosas iniciativas, distribuidas de manera desigual por el país, cuyos resultados constituyen una considerable cantidad de información, que en algunos casos ha dado lugar a publicaciones de textos acompañados de abundante material fotográfico y cartográfico.

A continuación se expone un panorama sintético de las experiencias más importantes realizadas en estos últimos años en algunas regiones italianas.

El primer ejemplo de inventario de puntos de

interés geológico en Italia fue realizado por la Región de Lombardía entre finales de los años '70 y principios de los '80 en el marco de un estudio más amplio que preveía, además, el inventario de los biotopos.

Este estudio tiene en cuenta dos requisitos indispensables:

- que el lugar presente interés natural y científico
- que el lugar no esté gravemente alterado por intervenciones antrópicas.

Comprobada la existencia de estas dos condiciones indispensables, se invocan otros criterios de selección: situación de riesgo inminente, solicitudes a las poblaciones y organismos locales sensibles a la protección del patrimonio natural, distribución geográfica, relevancia de las áreas a proteger en relación con las indicaciones suministradas por las campañas de protección promovidas por organismos internacionales como el Consejo de Europa, IUCN, UNESCO, etc.

La Región de Lombardía ha organizado, además, una vasta red de espacios naturales protegidos, con lugares de un específico interés geológico-geomorfológico que gozan de especiales medidas de tutela, con actividades de protección, gestión y explotación, incluso a nivel turístico.

Considerable alcance tiene la iniciativa de la Región de Las Marcas, que en el marco de la redacción del "*Piano Paesistico Ambientale Regionale*" (1991) prevé una específica actividad de inventario, que ha llevado a la publicación de un voluminoso texto en el que se seleccionan 74 puntos de interés geológico y 73 puntos de interés geomorfológico; esta publicación va acompañada de una amplia documentación fotográfica y de una cartografía en la que se sitúan los diferentes puntos y/o lugares seleccionados.

En la preparación del inventario, los parámetros que han condicionado la selección de los puntos de interés geológico y geomorfológico se han centrado principalmente en el interés científico, valorado en base a estudios realizados anteriormente; por lo tanto, han primado los valores naturales-ambientales asociados con típicos elementos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos, con el valor didáctico y la rareza de los

elementos encontrados, además de con su extensión, exposición y abundancia en el territorio estudiado.

Las actividades llevadas a cabo en Cerdeña, donde en 1989 se promulgó una Ley Regional que declaró 24 monumentos naturales, de los que 22 son puntos de interés geológico/geomorfológico, representan otra importante contribución.

Destacan así mismo las investigaciones emprendidas por la Universidad de Cagliari que desde 1991 ha perfeccionado interesantes criterios metodológicos para registrar monumentos geológicos y geomorfológicos, elaborando inventarios en diferentes zonas de la isla (Meilogu-Lagudoro, Sarrabus, Golfo de Orosei, Montes de Sulcis, etc.); además, para 1997 está prevista la publicación de un volumen que reunirá todos los monumentos naturales de interés geológico-geomorfológico de la Provincia de Cagliari (aproximadamente 150 fichas).

Estos criterios están reunidos en una clasificación de carácter general que comprende tipos que derivan de fenómenos endógenos, estratigráficos, paleontológicos, minerogenéticos, exógenos, antrópicos o poligenéticos.

Para asegurar la uniformidad de la catalogación y la valoración de la importancia del monumento a escala local, nacional y/o internacional, se ha preparado una ficha dividida en cuatro secciones, que comprende los elementos de identificación, los parámetros principales y los complementarios de valoración, el grado de importancia científica e histórico-cultural y, finalmente, el estado de utilización y protección.

En Lacio se registran numerosas actividades de inventario. Entre los trabajos más importantes finalizados, se pueden citar algunos estudios llevados a cabo por iniciativa de la Región de Lacio y del ENEA -como los inventarios de los puntos de interés geológico del Valle Intermedio del Tíber (1992), del Distrito Volcánico de Albano (1996), de la Llanura Pontina, Fondana y de los Montes Ausonios Meridionales (en prensa)- que han surgido de las "categorías" ("categories") establecidas por WIMBLEDON (en ANDERSEN *et al.* 1990), readaptando los criterios de valoración

al atribuir el valor científico a la terminología introducida por la legislación nacional vigente.

Otros trabajos han sido inventario de yacimientos paleontológicos en el área de Terracina (1993) y el reciente estudio elaborado por ENEA y SIGEA por cuenta del Ayuntamiento de Roma denominado "El paisaje geológico y los puntos de interés geológico de la campiña romana" ("*Il paesaggio geologico ed i geotopi della campagna romana*", 1997).

La Región de Liguria, además de poseer un vasto sistema de espacios naturales protegidos, algunos de ellos caracterizados por importantes puntos de interés geológico-geomorfológico, se dotó en 1994 de un inventario oficial de las principales áreas kársticas de especial importancia hidrogeológica, ambiental y paisajística y, sucesivamente, ha publicado una guía cartográfica a escala 1:250.000 que propone lugares de interés geológico e itinerarios naturales de los cuales 15 tienen un específico "interés geológico y geomorfológico" y 5 "interés paleoetnológico y paleontológico".

En estos últimos meses, en otras regiones y provincias italianas se han propuesto, y en algunos casos puesto en marcha, nuevos programas de inventarios que implican a institutos de investigación, universidades, asociaciones científicas y administraciones públicas.

La información se completa con las actividades realizadas por la *Società Geologica Italiana* que desde 1990 realiza periódicamente "guías geológicas regionales" en las que se ilustran los lugares de interés geológico así como las zonas y los itinerarios de especial interés científico y didáctico.

También la SIGEA, *Società Italiana di Geologia Ambientale*, publicó entre 1994 y 1995 algunos dossiers dedicados a los principales paisajes geológicos de Italia, en los que se configuran lugares de interés geológico inherentes a las diferentes disciplinas de las Ciencias de la Tierra.

En resumen, tras una comparación entre las diferentes experiencias, los criterios metodológicos utilizados en los estudios en curso en Italia se

basan en la consideración de un conjunto coordinado de varios elementos:

- interés científico
- características de representación (distribución, extensión, exposición, abundancia)
- unicidad y/o rareza de las formas y de los afloramientos
- diversidad
- asociación con áreas de interés natural, paleoetnológico, arqueológico, histórico, cultural, etc.
- ejemplaridad didáctica
- condiciones de accesibilidad, también con fines educativos
- atracción estética
- estado de conservación
- vulnerabilidad
- grado de interés (de tipo local, regional, interregional, nacional o internacional).

Las disciplinas implicadas en la selección de los puntos de interés representan, además, el amplio abanico comprendido en el ámbito de las Ciencias de la Tierra:

- geología estructural
- geología estratigráfica
- geología marina
- sedimentología
- paleontología
- vulcanología
- petrografía
- mineralogía
- hidrogeología
- geomorfología y geología del Cuaternario
- glaciología
- edafología.

En general, las metodologías adoptadas en las actividades de inventario prevén un preciso esquema de trabajo, dividido en sucesivas fases de profundización:

- planteamiento de criterios guía para la selección de los puntos y/o lugares e identificación de fichas tipo para recoger los datos documentales y de catalogación
- inventario bibliográfico (que incluye la documentación científica y de divulgación, las actas y documentos de planificación territorial, etc.)

- verificación en campo de los datos inventariados en la fase anterior e integración con eventuales nuevas indicaciones
- catalogación en fichas de los puntos y/o lugares de interés geológico inventariados, identificando los elementos característicos (descripción sintética del objeto, valor científico, valencias y grado de interés, estado de conservación, capacidad de ser explotado y necesidad de protección, vínculos ya existentes, referencias bibliográficas, etc.)
- predisposición para cartografía de detalle en cada ficha y producción de cartografía general con ubicación de los puntos y/o lugares de interés geológico inventariados
- producción de documentación fotográfica
- organización de los datos con redacción de notas de introducción relativas a los criterios y a las metodologías adoptadas en el inventario, comentarios legislativos, encuadre hidro-geomorfológico del territorio estudiado
- redacción de una exhaustiva bibliografía.

En algunos casos, los resultados de estas actividades pueden representar un punto de partida para ulteriores desarrollos de la investigación, como por ejemplo:

- informatización de los datos del inventario en entorno GIS, para crear un *banco de datos con los puntos de interés geológico-geomorfológico*, que se puede utilizar a diferentes niveles de planificación territorial
- preparación de centros de visita y/o museos de carácter geológico, paleontológico, mineralógico, etc.
- programas de promoción de determinadas áreas del territorio a fin de fomentar nuevas actividades turísticas eco-compatibles.
- organización de convenios científicos y seminarios sobre el tema de la "conservación del patrimonio geológico".

PUNTOS DE INTERES GEOLOGICO Y ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS

El patrimonio ambiental de interés geológico es especialmente importante en el interior de los parques y de las reservas naturales en las que los aspectos físicos del territorio, junto con puntos

de interés de tipo botánico, faunístico, histórico-arqueológico, etc, constituyen áreas de gran valor, que merecen ser protegidas, valoradas y estudiadas.

Esta condición deriva, como se ha destacado repetidamente hasta ahora, de la vigente legislación nacional y regional que ha reconocido específicamente como territorios a proteger los que contienen, entre otras características, formaciones geológicas o procesos geomorfológicos de especial interés por su valor científico, estético, cultural y recreativo.

En Italia, muchos de los 527 espacios naturales protegidos, que entran en la segunda actualización de la Lista Oficial deliberada el 2 de Diciembre de 1996 por el "*Ministero dell'Ambiente*", y otros oasis y reservas naturales, gestionadas por organismos locales o asociaciones científicas y ambientales, justifican la necesidad de medidas de protección sólo por la presencia de espectaculares elementos del territorio (por su extrema rareza, atracción estética o importancia científica) o por una íntima relación entre estos aspectos paisajísticos (factores abióticos) y valores relativos a la fauna, la flora, etc. (factores bióticos).

Conviene señalar además, el papel fundamental que los puntos y/o lugares de interés geológico están desempeñando en el ámbito de los espacios naturales protegidos (aunque no es el único) con fines turísticos y de divulgación; de hecho, cada vez más a menudo, surgen en el interior de los parques y de las reservas naturales recorridos temáticos en los que con la ayuda de carteles ilustrativos, los visitantes pueden gozar de las espectaculares formas del paisaje, obteniendo, contextualmente, información científica y didáctica inherente a los diferentes aspectos.

Para integrar estas actividades, los Organismos que administran los parques ("*Enti Parco*") han preparado documentación didáctica (guías, audiovisuales, productos informáticos multimedia, etc) y han organizado centros de acogida para los visitantes y/o museos con material científico y de divulgación de interés geológico, paleontológico, mineralógico, etc.

PERSPECTIVAS FUTURAS PARA LAS ACTIVIDADES DE INVENTARIO DEL PATRIMONIO GEOLOGICO

Teniendo en cuenta el estado actual de las iniciativas promovidas a favor de la protección y de la valoración del patrimonio geológico, parece oportuno subrayar la falta de una adecuada coordinación a nivel nacional capaz de fomentar las actividades de inventario y de encauzar el trabajo que se lleva a cabo localmente.

En este sentido, es de esperar una contribución gubernamental más enérgica (a través de una política del *Ministero dell'Ambiente* más sensible), pero también una mayor interacción entre las diferentes estructuras científicas que desde hace tiempo trabajan en el campo de la conservación de los puntos de interés geológico.

Para ello, es fundamental una mayor relación entre las actividades de la SIGEA (*Società Italiana di Geologia Ambientale*, que ha identificado como actividad primaria la promoción del papel de las Ciencias de la Tierra en la política de protección del territorio y de los recursos ambientales, creando un Grupo de Trabajo específico sobre "Puntos de Interés Geológico y Espacios Naturales Protegidos") y las de la Sección Italiana de ProGEO, prosiguiendo así la provechosa colaboración que en Mayo de 1996 permitió organizar con éxito en Roma, el "II Simposio Internacional sobre la Conservación del Patrimonio Geológico".

Fundamental es también la necesidad de incrementar los intercambios entre los investigadores italianos y extranjeros con el objetivo de facilitar la transmisión de experiencias adquiridas en realidades diferentes y de perfeccionar las metodologías de selección adoptadas en otros países.

La consolidación definitiva de las iniciativas de inventario de los puntos y/o lugares de interés geológico puede representar una contribución de importancia estratégica, no sólo en el campo científico institucional propiamente dicho, sino también en el de la función didáctica y recreativa de la naturaleza y del paisaje, además de en una política de protección y valoración del patrimonio natural más consciente y objetiva.

REFERENCIAS

- ANDERSEN, S.; BLACK, G.P.; DUFF, K.L.; ERIKSTAD, L.; GONGGRIJP, G.P.; KONTTURI, O.; SCHONLAUB, H.P.; WIMBLETON, W.A. (1990) - *Earth-Science Conservation. An absolute need for science and education*. Jb. Geol. B.-A., 133, pp. 633-669.
- ARNOLDUS-HUYZENDVELD, A.; GISOTTI, G.; MASSOLINOVELLI, R.; ZARLENGA, F. (1995) - *I beni culturali a carattere geologico: i geotopi. Un approccio culturale al problema*. Geologia Tecnica & Ambientale, 4/95, pp. 35-47.
- ARNOLDUS-HUYZENDVELD, A.; CORAZZA, A.; DE RITA, D.; ZARLENGA, F. (1997) - *Il paesaggio geologico ed i geotopi della campagna romana*. Comune di Roma - III Università di Roma - ENEA - SIGEA. F.lli Palombi Editori, Roma, pp. 61.
- AA.VV. (1991) - *Actes du premier symposium international sur la protection du patrimoine géologique*. Digne-les-Bains, 11-16 Juin 1991. Mem. Soc. Geol. de France, N.S. 1994, 105, pp. 276.
- AA.VV. (1996) - *II° International Symposium on conservation of our geological heritage*. Roma 20-22 May 1996 - Pre-prints, pp. 121. Barca, S.; Di Gregorio, F. (1991) - *Proposta metodologica per il rilevamento dei monumenti geologici e geomorfologici*. Boll. A.I.C., 83, pp. 25-31.
- BARCA, S.; DI GREGORIO, F.; CANNILLO, C. (1992) - *Rilevamento e valutazione dei monumenti geologici e geomorfologici del Meilogu-Logudoro (Sardegna NW)*. Boll. A.I.C., 86, pp. 71-84.
- BARCA, S.; DI GREGORIO, F.; MONTIS, S. (1993) - *Rilevamento e valutazione dei monumenti naturali geologici e geomorfologici del Sarrabus (Sardegna SE) come contributo al G.I.S. (Sistema Informativo Geografico) ed alla pianificazione ambientale*. La Sardegna nel mondo mediterraneo - Quarto convegno internazionale di studi "Pianificazione territoriale e ambiente" - Sassari-Alghero, 15-17 Aprile 1993. Patron Editore, Bologna, 1995.
- BARCA, S.; DI GREGORIO, F.; MULAS, G. (1995) - *Natural rock arches of the Orosei Gulf, Sardinia, Italy*. Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 95, October 24-27, 1995, Tarragona (Spain), pp. 217-229.
- BURLANDO, M. (1996) - *Il ruolo del geologo nelle attività di pianificazione e di gestione delle aree protette*. PARCHI, n.18, pp. 73-76.
- BELTRAMI, F.; BURLANDO, M. (1997) - *Il patrimonio geologico in Liguria*. Verde Ambiente, Anno XIII, n. 1 gennaio/febbraio 1997, pp. 44-47.
- BUSTAMANTE CALABUIG, M. (1996) - *Naturaleza sin secretos. El primer mapa medioambiental de España*. Revista MOPTMA, N° 440, Marzo 1996, pp. 4-9.
- CASTO, L.; ZARLENGA, F. (1992) - *I beni culturali a carattere geologico nella Media Valle del Tevere*. ENEA Ed., pp. 165.
- CASTO, L.; ZARLENGA, F. (1996) - *I beni culturali a carattere*

geologico del Lazio II. Il Distretto Vulcanico di Albano. ENEA Ed., pp. 143.

CASTO, L.; ZARLENGA, F. (1997) - *I beni culturali a carattere geologico del Lazio III. La Pianura Pontina, Fondana ed i Monti Ausoni meridionali*. ENEA Ed. (en prensa).

CRESTA, P.; MARGIOCCO, C. - REGIONE LIGURIA - UFFICIO PARCHI E RISERVE NATURALI (1994) - *Ligurianatura: sessanta itinerari naturalistici (cartoguida)*.

FABBRI, M.; ZARLENGA, F. (1996) - *I beni culturali geologici*. Verde Ambiente, 1/96, pp. 46-48.

GALLEGU VALCARCE, E.; BARETTINO FRAILE, D. (1996) - *El patrimonio geológico en el plan nacional de cartografía temática ambiental (PNCTA)*. II Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico (Soc. Geol. de España - Instituto de Estudios Riojanos), Logroño, 17-19 de Octubre de 1996, pp. 68-73.

NANGERONI, G. (1968) - *Protezione dei fenomeni geologici e geomorfologici in Italia*. Natura, Soc. Ital. Scienze Naturali - Museo Civ. St. Nat. - Acquario Civ. Milano, 69/1, 15.III.1969, pp. 10-22.

PRATURLON, A. (1986) - *Protezione dei beni geologici e paleontologici*. Atti convegni dei Lincei, 76, pp. 81-87.

REGIONE LOMBARDIA - Settore Ambiente ed Ecologia (1982 ?) - *Natura in Lombardia: Biotopi e Geotopi*. Regione Lombardia Ed., pp. 234.

REGIONE MARCHE - Assessorato Urbanistica Ambiente (1991) - *Le emergenze geologiche e geomorfologiche delle*

Marche. Piano Paesistico Ambientale Regionale. Regione Marche Ed., pp. 710.

SOCIETA GEOLOGICA ITALIANA (1990, 1991, 1992, 1992a, 1992b, 1993, 1994, 1994a) - *Guide geologiche regionali: Alpi e Prealpi Lombarde; Alpi Liguri; Le Alpi dal Monte Bianco al Lago Maggiore; Appennino tosco-emiliano; Lazio; Appennino ligure-emiliano; Appennino umbro-marchigiano*. BE-MA Ed.

SOCIETA ITALIANA DI GEOLOGIA AMBIENTALE - SIGEA (1994, 1995) - *I paesaggi geologici italiani* (anexos a la revista Verde Ambiente).

SOCIETA ITALIANA DI GEOLOGIA AMBIENTALE - SIGEA (1997) - *Speciale Parchi & Aree Protette*. Geologia dell'Ambiente, anno V, n. 2., pp. 34.

WIMBLETON, W.A.; BENTON, M.J.; BEVINS, R.E.; BLACK, G.P.; BRIDGELAND, D.R.; CLEAL, C.J.; COOPER, R.G.; MAY, V.J. (1995) - *The development of a methodology for the selection of British geological sites for conservation: part 1*. Modern Geology, Vol. 20, pp. 159-202.

WIMBLETON, W.A.P. (1996) - *National site selection, a stop on the road to a European Geosite list*. Geologica Balcanica, 26.1, Sofia, Mart. 1996, pp. 15-27.

ZARLENGA, F. (1996) - *I geotopi, dalla ricerca scientifica alla pianificazione, controllo e gestione*. Geologia dell'Ambiente, anno IV, n. 2, pp. 3-6.

ZIZZARI, P. (1993) - *Note illustrative della carta dei giacimenti fossiliferi (Foglio 414 - Terracina. Regione Lazio. Assessorato alla Cultura*. Centro Regionale per la documentazione dei beni culturali ed ambientali.

Original recibido: Septiembre 1997.

Original aceptado: Noviembre 1997.

ANALISIS Y SIMULACION FRACTAL DE MEDIOS FRACTURADOS.

Por C. PAREDES (*) y F. J. ELORZA (*)

R E S U M E N

Una gran parte del esfuerzo que se realiza en la investigación y desarrollo de los modelos conceptuales para los medios fracturados, se destina hacia el estudio y la comprensión de las posibles pautas que, espacialmente, pueden seguir las fracturas. Uno de los objetivos prioritarios en la utilización de dichos modelos se encuentra en la simulación del comportamiento hidrogeomecánico de los medios geológicos fracturados. La problemática de su estudio, caracterización, y simulación como un sistema de fracturación fractal se aborda en este trabajo. Se exponen una serie de metodologías apropiadas para su análisis, (técnicas de conteo de recubrimientos, de información y de agregación). Se practican teniendo en cuenta la finalidad con la que se van a utilizar los resultados, ya sea con el objetivo de la conceptualización de un modelo fractal de la red, o para su simulación. Es, en este último caso, cuando el estudio y análisis debe de efectuarse de forma apropiada y acorde con las técnicas de simulación a utilizar.

Palabras clave: Fracturas, Modelización, Simulación, Geometría Fractal, Hidrogeología Estocástica.

A B S T R A C T

A great part of the effort applied in the research and developing of the different conceptual models in fractured media, is destined to the study and understanding of the diverse patterns which could be spatially followed by the fractures. One of the prior objective in the use of those models is found in the simulation of the hydrogeomechanical behaviour of the geological fracture network. The problem of their studying, characterization, and simulation as a fractal fracture net is boarded in this work. Some of different suitable analysis methodologies (such as covering box counting, information, and aggregation) are exposed. They are applied, taking into account the final aim to reach, that is, what is the finality where the results are used, to conceptual model determination, to synthetical simulation of fracture network. In this later one case is when the study and the analysis must be fulfilled in a relevant fashion, according to the used simulation techniques.

Key words: Fractures, Modeling, Simulation, Fractal Geometry, Stochastic Hydrogeology.

1. INTRODUCCION.

El estudio y la aplicación de los modelos estocásticos en la simulación de procesos hidrogeomecánicos como el transporte de solutos, la deformación de macizos rocosos, las series de niveles piezométricos en acuíferos heterogéneos, o incluso la distribución espacial de dichas heterogeneidades, está proporcionando una serie de resultados que permiten la identificación e interpretación de fenómenos que por su complejidad son difíciles de tratar. Particularmente, en rela-

ción con el estudio de fenómenos cuasi-estocásticos, es donde tiene lugar, en la actualidad, véanse los trabajos de (BARTON, LA POINTE, 1995a) y (BARTON, LA POINTE, 1995b), o también en (KORVIN, 1992), (PAREDES, 1995) y (GUMIEL, PAREDES, 1996), la aplicación de la Geometría Fractal en el campo de la Hidrogeología estocástica.

Relacionados con el análisis y la simulación de los medios geológicos (y en este caso de acuíferos) heterogéneos y anisótropos, en este trabajo de investigación se presenta la aplicación de algunas de las metodologías que se han desarrollado para el estudio de procesos que son susceptibles de ser caracterizados y simulados como fractales. A este respecto, mencionar que ésta

(*) *Dpto. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos.* E.T.S.I. de Minas. UPM. C/. Ríos Rosas 21. Madrid 28003. ESPAÑA. (Tel. 91-3367048; Fax 91-3367051)
e-mail: cparedes@dmami.upm.es
jelorza@dmami.upm.es

posibilidad, en el caso de medios geológicos fracturados, ha sido ya analizada, desde los primeros trabajos de (THOMAS, 1987) o de (AVILES et al., 1987) donde se intentó dicha caracterización, sin llegar a una utilización directa de tal.

Añadir que, en cuanto a su carácter hidrodinámico, ya en (NEUMAN, 1990) se vislumbró cómo la permeabilidad de los macizos heterogéneos y fracturados, podía tener un carácter marcadamente fractal. Este comportamiento particular afectaría, por ejemplo, a las dispersiones en los ensayos de trazadores y en otros fenómenos físicos practicados y observados en diferentes formaciones rocosas, y su testificación (CLAUSER, 1992) apoya la presunción de que éste sea de tipo fractal.

2. ANALISIS FRACTAL DE MEDIOS FRACTURADOS.

Quizás sea posible que el estudio de caracterización fractal, o análisis fractal como denominaremos a partir de ahora, permita obtener unos resultados que no sólo se expresen en forma de dimensión fractal (JACQUIN, ADLER, 1987), como se ha realizado y se sigue realizando en muchas de las referencias señaladas. Su interés se encuentra en que, mediante esta nueva geometría, desarrollada por Benoit Mandelbrot hacia finales de los sesenta, es posible estudiar fenómenos irregulares, complejos, y sin una estructura claramente ordenable en una primera instancia. De esta forma, dicho estudio permite crear un modelo conceptual que sea útil en base al descubrimiento de la estructura interna y el orden subyacente a esa irregularidad. Primero, para la comprensión de su funcionamiento y, segundo, para la simulación y generación con aspectos, tanto geométricos como físicos, semejantes a los identificados sobre el terreno.

Así, los medios rocosos fracturados, y por lo tanto los campos de fracturas que comportan, son susceptibles de ser estudiados como fractales. Ya en los primeros análisis de (JACQUIN, ADLER, 1987), o de (SAHIMI, IMDAKM, 1988), se analiza esta posibilidad, incluso se pretendió estudiar como redes de percolación, lo cual permite utilizar esta teoría (STAUFER, AHARONY, 1993) para comprender algunos de sus compor-

tamientos hidrodinámicos. En este trabajo el medio fracturado sólo es analizado en su estructura, como en (WALSH, WATTERSON, 1993), o como se propone en (PAREDES, 1995), para su posterior simulación.

Tomemos por ejemplo los fotolineamientos cartografiados representados en la figura 1, casos de ① a ⑤ de (DERSOWITZ et al., 1992) y ⑥ de (BARTON, HSIEH, 1989). En ella se muestran una serie de medios fracturados de diferentes tamaños, que aparentemente son bastante complejos. Se mostrará como, mediante la geometría fractal, es posible estudiarlos, y aplicarles algunos análisis que pueden utilizarse para definir un modelo conceptual de simulación, que esté de acuerdo con este análisis efectuado.

Análisis fractal de la red de fracturación.

Una gran parte de los trabajos que pretenden relacionar los medios fracturados con la geometría fractal se limitan a realizar un estudio exhaustivo de sus propiedades en función de la escala como en (JACQUIN, ADLER, 1987) o en (KORVIN, 1992), donde se aplican técnicas clásicas sin tener en cuenta cuál puede ser la utilidad de sus resultados, únicamente para la caracterización geométrica, mediante la dimensión fractal, de la red de fracturación observada en superficie.

Estos análisis suelen estar realizados aplicando técnicas de conteo sencillas (AVILES et al., 1987), (DERSOWITZ et al., 1992) aunque costosas de implementar algorítmicamente en un ordenador. Proporcionan unos resultados que no son siempre útiles para la simulación. Esto es, cuando se determina la dimensión fractal de *box-counting* (MANDELBROT, 1986), (FEDER, 1988), (FALCONER, 1990) mediante el estudio del número $N(\varepsilon)$ de conjuntos (o celdas en un mallado superpuesto) de tamaño que recubren el conjunto F (red de fracturas), y se verifica que:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (1)$$

ésta cantidad $N(\varepsilon)$, proporciona una medida de la densidad de fracturación que no es invariante al cambio de escala. De hecho el conteo de celdas ocupadas por al menos una parte del fractal F (o del sistema fracturado en su caso), que se está

analizando, debe de ser ponderado por la masa que posee cada celda en su interior. Por ejemplo, por el número de pixels, por la longitud de fracturas, por el área abarcada, etc. Dicho peso permite determinar la información que se necesita para especificar una parte del fractal a la escala más pequeña en estudio. Escala que puede corresponder con la escala mínima de topografiado, de digitalización, etc., siempre y cuando el análisis llegue a efectuarse a dicha escala. El peso p_i para cada celda i se calcula como la relación entre la medida invariante en la celda i y la medida de todo el sistema F a analizar, que se encuentra embebido en un espacio E , normalmente espacio euclídeo (bidimensional o tridimensional):

$$P_i = \mu(F)|_i / \mu(F)|_E \quad (2)$$

Esta forma de proceder ha sido también discutida en (WALSH, WATTERSON, 1993), donde se manifiestan las posibles incorrecciones a la hora de utilizar *box-counting*, y por lo tanto cómo debe de ser corregido. La obtención de la información $I(\varepsilon)$ de la estructura, se realiza mediante el cálculo del sumatorio para todas las celdas $N(\varepsilon)$ que poseen algún elemento de F , de la información p_i , $\log p_i$ de cada celda i , como:

$$I(\varepsilon) = - \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \cdot \log p_i \quad (3)$$

en la que para el cálculo de $N(\varepsilon)$ se aplica la técnica descrita como *box-counting*, en función de la escala ε . La información, en el caso de variar de forma potencial posee una dimensión fractal asociada (FALCONER, 1990), denominada dimensión fractal de información D_i , que se determina según:

$$D_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)} p_j \cdot \log p_j}{\log \varepsilon} \quad (4)$$

Mediante esta definición de dimensión se puede caracterizar de una manera más apropiada la estructura de la red de fracturación, que si se utiliza sólo la dimensión de recubrimiento, que no recoge ninguna información sobre cómo es la distribución de la densidad del campo de fracturas F dentro del espacio E .

Otra de las formas de analizar esta distribución de masa (de las fotolíneas o fracturas) puede hacerse mediante la función $M(r)$, función de agregación de masa. Determinando la masa contenida dentro de una bola de radio r y de centro un punto χ del dominio en el que se encuentran las fracturas. Muchas veces esta determinación se realiza imponiendo la condición de que $\chi \in F$, para que al menos no haya situaciones en las que $M(r)=0$, lo cual no sería de interés. El análisis de esta función de masa se encuentra en determinar cuales son los intervalos de valores de r para los que $M(r)$ se comporta según una ley de tipo fractal:

$$M(r) \propto r^{D_A} \quad (5)$$

Si se verifica (5), se puede determinar la dimensión fractal de agregación D_A , como el exponente de $M(r)$ dentro de dicho intervalo. Dicha dimensión da idea de la conectividad de la red de fracturas al aumentar la escala (denotada en este caso como r) de las fracturas. De esta forma, se pueden descubrir escalas de diferentes estructuras por diferencias de comportamiento. Estas diferencias pueden cuantificarse como variaciones en el exponente D_A , dentro de diferentes rangos de la escala r .

Los ejemplos de redes de fracturación mostrados en la figura 1 han sido analizados mediante algunas de las técnicas anteriores, y sus resultados se presentan en la tabla I.

En primer lugar, y como puede verse en la tabla I, se han aplicado dos metodologías de cálculo diferentes (como subíndices en las dimensiones mostradas). Una de ellas es la que se utiliza en el programa comercial FracMan (DERSOWITZ et al., 1992) basada en la definición de las fracturas por nubes de puntos (en número como superíndice de las dimensiones) sobre la fotolínea que define. La segunda, es la implementada en el código DFP (Pattern Fractal Dimension) desarrollado por (PAREDES, 1995), y que utiliza todo el segmento que define la fractura. Estas diferencias en la forma de operar, se denotan en los resultados obtenidos en varios sentidos. Sobre la dimensión de recubrimiento D , los valores son acordes con la estructura geométrica de fracturación anali-

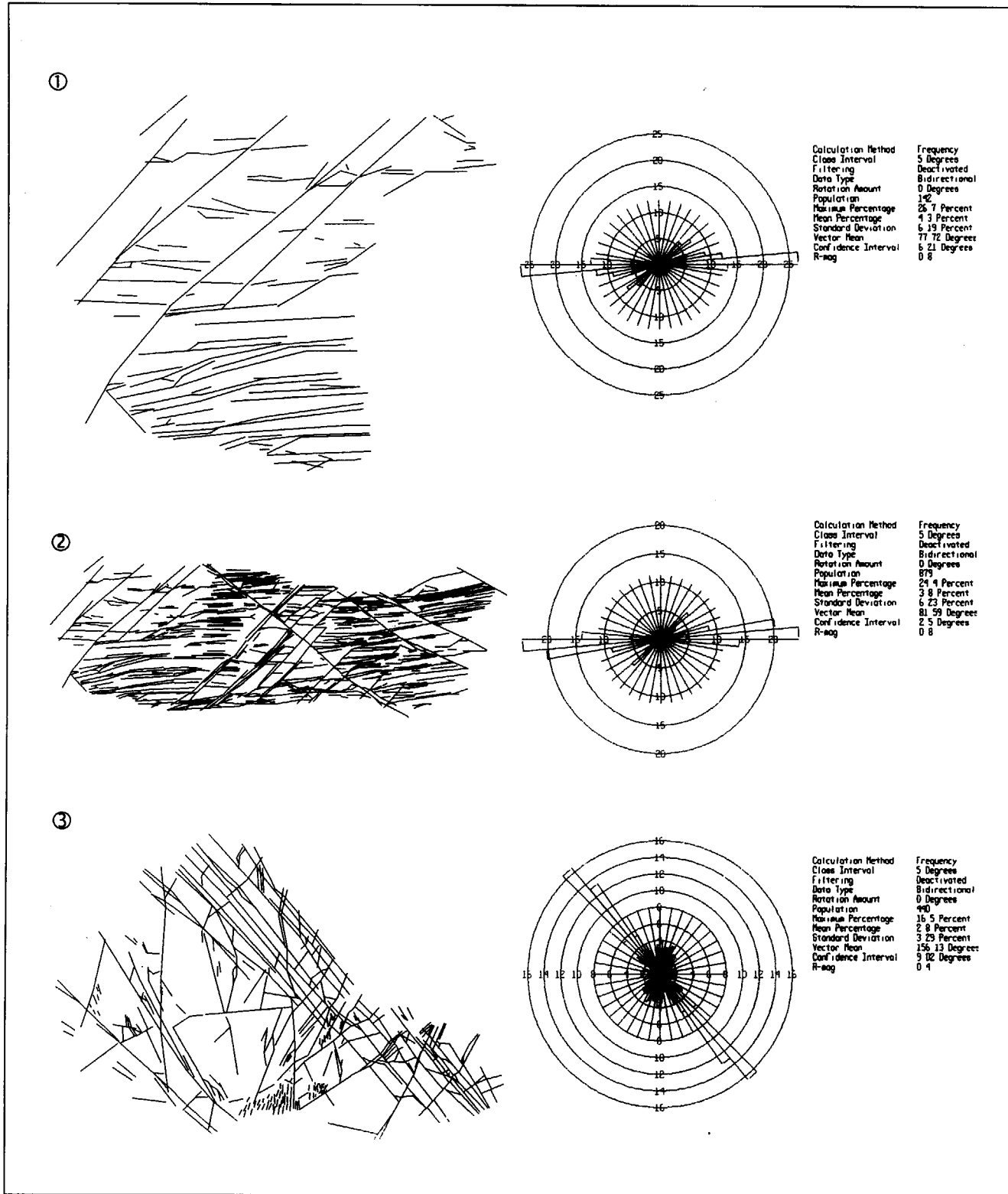
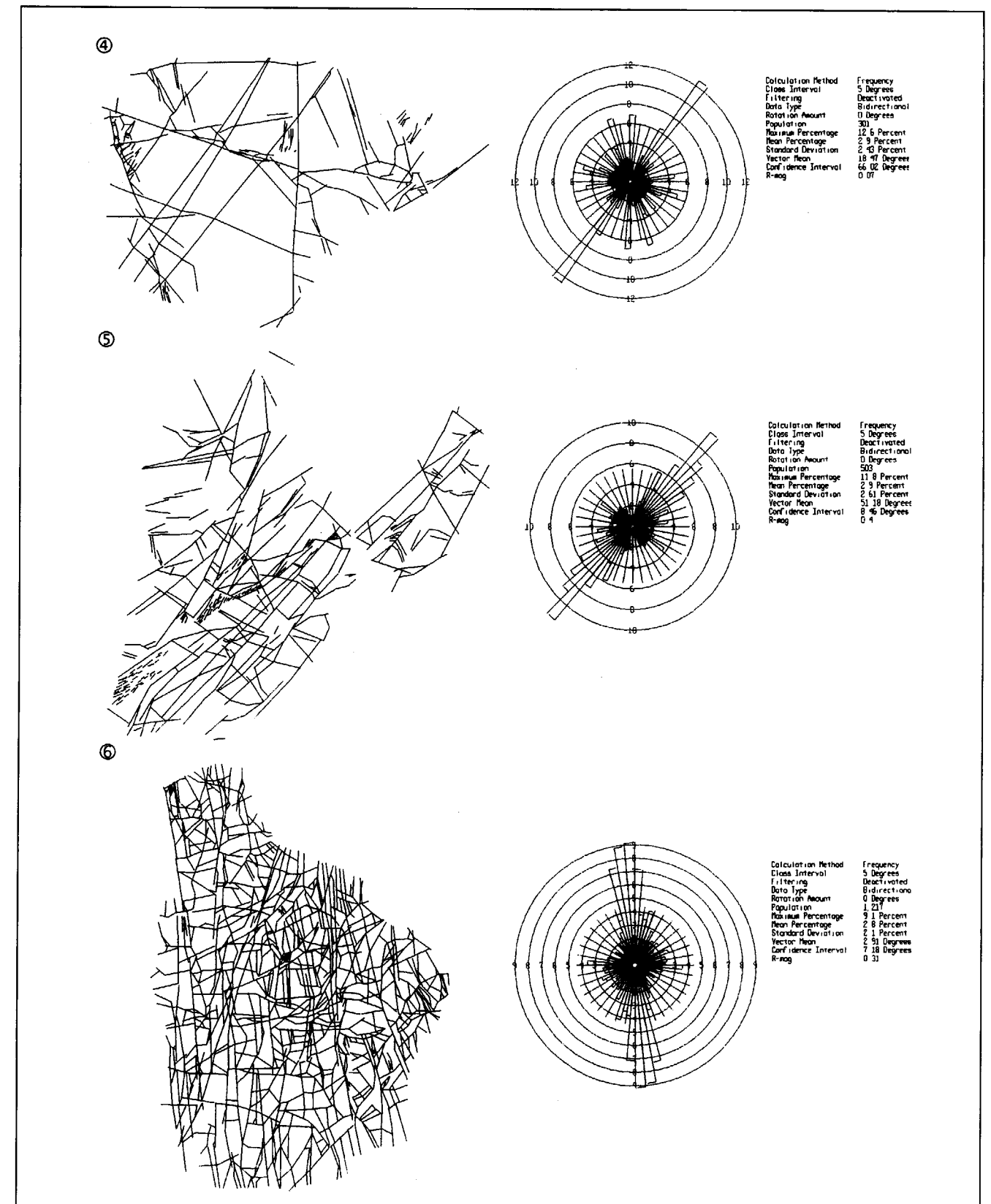


Figura 1. De ① a ③, redes de fracturación analizadas en el trabajo. Histogramas direccionales para cada caso.



CASO	Box Counting		Agregación	
	D_{FracMan}^{300}	D_{DFP}	$D_{\text{A FracMan}}^{300}$	$D_{\text{A DFP}}$
①	1.67	1.82	2.12	1.89
②	1.97	1.90	2.58	2.10
③	1.79	1.67	2.31	1.87
④	1.82	1.68	1.31	1.95
⑤	1.83	1.74	1.46	1.91
⑥	1.98	1.88	1.94	2.10

Tabla I. Resultados del análisis de caracterización fractal de las redes de fracturas.

zada, sin superar el valor de 2.0. La dimensión de agregación responde a la correlación entre las fracturas y no a la que existe entre puntos sobre las fracturas.

Como interpretación breve de éstos resultados puede decirse que, en primer lugar, si bien para los casos analizados, las dimensiones fractales obtenidas son elevadas, tanto para la técnica de recubrimiento (*box-counting*) partiendo de escalas mínimas diversas, como para la de agregación, lo cual permite afirmar que las redes se encuentran muy extendidas en el plano, aunque no lo hacen de manera totalmente uniforme (poissoniana). En cambio para aquellas más elevadas, del orden de 1'9, los valores por agregación son mayores que dos, lo cual no es físicamente interpretable ya que, como máximo, la dimensión que se debe de obtener debe de ser la de E , que en este caso es dos. Esto puede ser debido a deficiencias en el algoritmo de cálculo de la masa $M(r)$, o a la falta de puntos de soporte para determinar la ley (5), esto es, se ha medido sobre pocos círculos de radio r .

Obsérvese cuál es el comportamiento al ir definiendo más puntos sobre cada fractura (ir variando el superíndice) en la figura 2a y la figura 2b, para las dimensiones de recubrimiento y agregación. A medida que se incrementa el número de puntos que la definen, aleatoriamente distribuidos sobre ésta, la curva se hace asintóticamente creciente hacia un valor que corresponde muy aproximadamente con la dimensión fractal de recubrimiento, calculada por DFP (tabla I), de toda la red de fracturas.

Este hecho es relativamente más difícil de apreciar cuando el mismo estudio se realiza aplicando el análisis de agregación. La curva presenta unas oscilaciones más acusadas, que aparentemente disminuyen a medida que más puntos definen la fractura.

Análisis fractal del soporte de simulación.

De los primeros trabajos de análisis realizados sobre fracturas para su posterior simulación es posible citar los de (THOMAS, 1987) en los que pretende simular un campo de fracturas, como planos infinitos irregulares. Esta irregularidad se produce mediante un movimiento browniano fraccionario. Su dimensión fractal se obtuvo a partir del análisis fractal de sucesivos perfiles o secciones perpendiculares a fracturas de la roca. Este método se encuentra precedido de un breve estudio mecánico sobre el por qué de la irregularidad de los perfiles de las fracturas. Posee poca utilidad ya que se limita a escalas muy locales.

Otros, como los de (CHILES, 1989) en el que, aunque se amplía la escala de la simulación, simplemente se menciona la posibilidad de utilizar técnicas fractales, pero sin profundizar en detalles. Y finalmente, los más recientes, pueden encontrarse implementados en códigos comerciales, como el caso de FracMan, que ha sido utilizado en parte como criterio comparativo en la elaboración de este trabajo.

Es por ello, por lo que el análisis del soporte de simulación, se diferencia del anterior, en que no

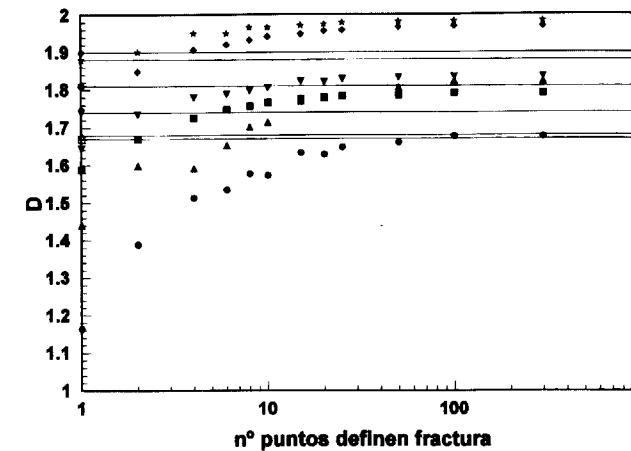


Figura 2a. Efecto de definición de fracturas por puntos en las dimensiones fractales de recubrimiento D calculadas con FracMan (puntos) y con DFP (líneas). (leyenda: ●①, ◆②, ■③, ▲④, ▼⑤, *⑥).

se pretende caracterizar la red de fracturación, sino proporcionar los datos necesarios para efectuar una simulación acorde con el comportamiento observado. Algunas de las técnicas para realizar este análisis, en concreto la última (STOYAN, STOYAN, 1994), (PAREDES, 1995), serán descritas en este trabajo, y pueden proporcionar resultados de relativamente buena calidad, en el sentido de reproducir la estructura irregular de lo observado en campo o foto interpretado.

Actualmente, dentro del campo de la modelización y simulación de medios geológicos heterogéneos se encuentra uno dedicado al desarrollo de métodos estadísticos para los medios cristalinos y fracturados. Estas técnicas para la simulación estocástica de estos medios suelen llevarse a cabo siguiendo tres líneas por separado, que se fusionan en su representación. La primera corresponde con la simulación del proceso espacial de puntos que sirven de soporte a los planos que equivalen a las fracturas, o soporte de simulación. Habitualmente este proceso corresponde a uno de Poisson de densidad no homogénea, que en este trabajo se va a realizar de forma fractal. La segunda línea, consiste en asignar un tamaño a cada fractura, siguiendo una función de distribución dada, ya sea analítica conocida, u obtenida a partir de los datos medidos en campo.

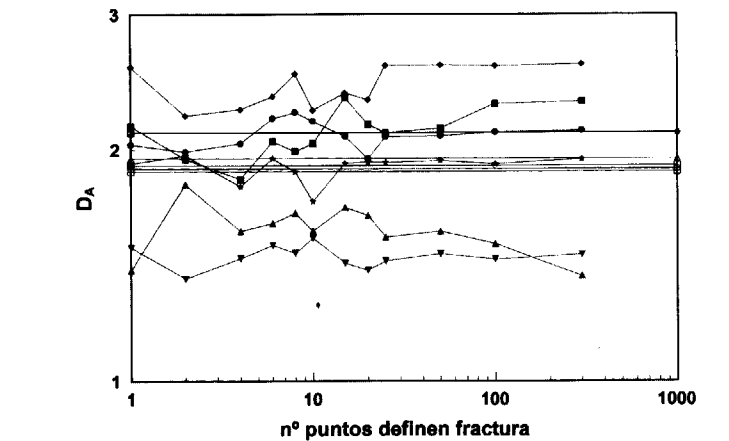


Figura 2b. Efecto de definición de fracturas por puntos en las dimensiones fractales de agregación D_A calculadas con FracMan (puntos) y con DFP (líneas). (leyenda: ●①, ◆②, ■③, ▲④, ▼⑤, *⑥).

Generalmente este tamaño corresponde con el diámetro de una figura plana poliédrica acotada que define un plano de fractura finito. Finalmente, se asigna a cada plano o fractura sintética las componentes direccionales de azimut y buzamiento. Estas suelen ajustarse paramétricamente a unas funciones de distribución tridimensionales esféricas analíticas (siendo las más usuales Fisher, Bingham, Fisher-bivarada, etc.), definidas sobre la esfera estereográfica y cuyos parámetros se han obtenido del análisis direccional (azimut y buzamiento) de los datos.

Por ello, será por lo que se aplique un análisis fractal a la nube de puntos de soporte de las fracturas, que son los que, gracias a su distribución espacial 3D, crean que las fracturas se repartan en el espacio con unas características muy específicas de complejidad. Los resultados de dicho análisis, para los campos de fracturas de la figura 1, se presentan en la tabla II.

Ya que, para este análisis, el del soporte de la simulación, la fractura se simplifica a un punto sobre ésta (centrado o aleatoriamente ubicado), de aquí el superíndice 1 de las dimensiones, los datos de la tabla II, muestran unos valores de dimensión fractal que, en todos los casos estudiados con DFP, es muy inferior a la que posee todo el conjunto de fracturas.

CASO	Box Counting D_{DFP}^1	Agregación $D_{A,DFP}^1$
①	1.75	1.62
②	1.72	1.93
③	1.60	1.75
④	1.62	1.80
⑤	1.56	1.86
⑥	1.86	1.89

Tabla II. Resultados del análisis de caracterización fractal de la nube de puntos de soporte de simulación.

3. DOS PROCESOS FRACTALES DE PUNTOS PARA LA SIMULACION.

Clásicamente el proceso de simulación del soporte de fracturación se realiza mediante técnicas de generación de procesos de Poisson, o de Gibbs (STOYAN, STOYAN, 1994). Pero en el caso de que el análisis fractal practicado describa la nube de puntos del medio real como una estructura con propiedades fractales, deben de aplicarse unas técnicas que simulen esta distribución.

Para ello, se han puesto a punto dos técnicas diferentes las cuales se fundamentan en una metodología iterativa de refinamiento y des-refinamiento de la escala. Ambas técnicas se basan en las propiedades de cambio del número de elementos de recubrimiento del fractal F , y de su distribución de masa $M(r)$. De aquí que hayan sido denominadas como *box* y *radial* respectivamente. A continuación se exponen, en sus fundamentos, brevemente.

Método Box.

Se trata de un proceso para la generación de NP puntos en un dominio multidimensional de lado L , que sigue una ley de potencia (1). Se verifica que cuando los conjuntos $\{U_i\}_{i=1}^{N(\epsilon)}$ que forman el recubrimiento del fractal F , tiene un diámetro que verifica (PAREDES, 1995):

$$\begin{cases} \text{diam}(U_i) = \text{diam}(E) = \epsilon_{max} \Leftrightarrow N(\epsilon_{max}) = 1 \\ \text{diam}(U_i) = \epsilon_{min} \Leftrightarrow N(\epsilon_{min}) = \text{card}(F) = NP \end{cases} \quad (7)$$

Por lo que el proceso iterativo consiste en tomar tantas celdas $N(\epsilon)$ como corresponde a la escala, según:

$$N(\epsilon_{i+1}) = L^D \cdot \epsilon_{i+1}^{-D} \quad (8)$$

e iterativamente, según el índice i , se va refinando la escala ϵ de tal manera que:

$$\epsilon_{i-1} = \epsilon_i / 2 = L / 2^i \quad (9)$$

como se muestra en la figura 3.

Método Radial.

Igualmente a la técnica iterativa anterior, en función del número de puntos NP a situar en el espacio, en este caso (PAREDES, 1995) la ubicación se realiza sobre una corona circular, o esférica en el caso 3D, de tamaño máximo r_{max} y siguiendo la ley de distribución de masa (5), verificándose que:

$$M(r) = B \cdot r^{D_A}; \text{ donde } B = \frac{NP}{(r_{max})^{D_A}} \quad (10)$$

Dependiendo de la forma de llevar a cabo el proceso, se han definido dos técnicas diferentes para el mismo método. La denominada *Radial-Unitario*, en la que se genera un punto en cada nueva corona de cada iteración, con lo que hay que determinar el tamaño de la corona en la que se sitúan el nuevo y único punto. Y, en segundo

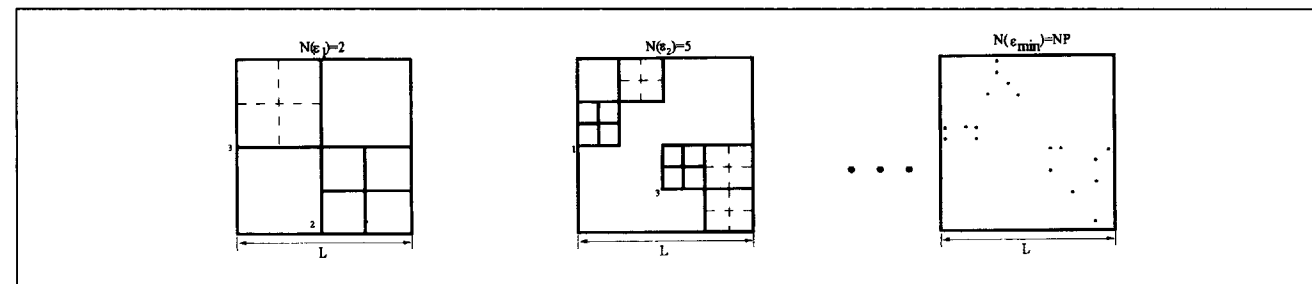


Figura 3. Proceso iterativo general del método Box en 2D.

lugar, la denominada *Radial-Equidistante*, con la que se generan tantos puntos proporcionalmente al área (o volumen) que abarque la corona en cada iteración.

Simulaciones del macizo fracturado.

Siguiendo la metodología propuesta para la generación de fracturas discretas, para las simulaciones que se presentan a continuación se han realizado las siguientes hipótesis en lo que respecta a las distribuciones de orientaciones y tamaños de las fracturas.

Para las direcciones de buzamiento de los planos se ha tomado una función de distribución entre $N0^\circ E$ y $N180^\circ E$ que viene dada por el tipo de histograma direccional que presentan las fotolíneas registradas (rosa direccional para cada caso en la figura 1). Para los buzamientos de estas fracturas se ha tomado una función de distribución uniforme, entre 0° y 90° , debido a que, en dichos seis casos, no se dispone de datos al respecto.

La función de distribución de los tamaños de los discos a generar se ha escogido como log-Normal (en trazo discontinuo en la figura 4), ya que presenta una aproximación aceptable, comparada con la distribución de longitudes que poseen los datos (histogramas de 30 clases en la figura 4). Aceptable en el sentido de los resultados registrados en la tabla III para los test de Kolmogorov-Smirnoff y de χ^2 .

La generación estocástica de dichas variables (orientación, buzamiento y tamaños de fracturas) se ha realizado mediante un muestreo aleatorio simple. En la tabla III se presentan los estadísti-

cos fundamentales para el ajuste de la función de distribución log-Normal de las longitudes de traza L (en metros), así como sus momentos de primer y segundo orden.

La primera de las simulaciones, que se muestra en la figura 5, ha sido realizada utilizando la técnica denominada *box*. Por su formulación, expuesta anteriormente, los datos que deben de ser introducidos son los obtenidos del análisis del soporte de la simulación, así como las dimensiones de la zona de simulación. De esta forma, la dimensión fractal a aplicar debe de ser la de recubrimiento para la nube de puntos formada por los centros de las fracturas (identificada en la tabla II como D_{DFP}^1).

Se puede apreciar cómo, mediante la utilización de esta técnica, lo que se ha recogido es la dimensión de las agrupaciones de los centros de las fracturas, aunque modificada por su distribución estocástica interna.

Seguidamente, mediante la aplicación de la técnica de simulación *radial*, se ha simulado un campo de puntos fractal con una ley de agregación dada por la ecuación (5), respecto al centro del dominio de simulación, de dimensión 1.89, campo que se utiliza como soporte de los planos orientados finitos que constituyen las fracturas. Parte de los 400 discos así generados pueden verse en la figura 6.

En esta segunda simulación puede apreciarse como los cúmulos se distribuyen de forma no homogénea en el espacio, pero dentro de cada cúmulo las fracturas son casi homogéneamente distribuidas.

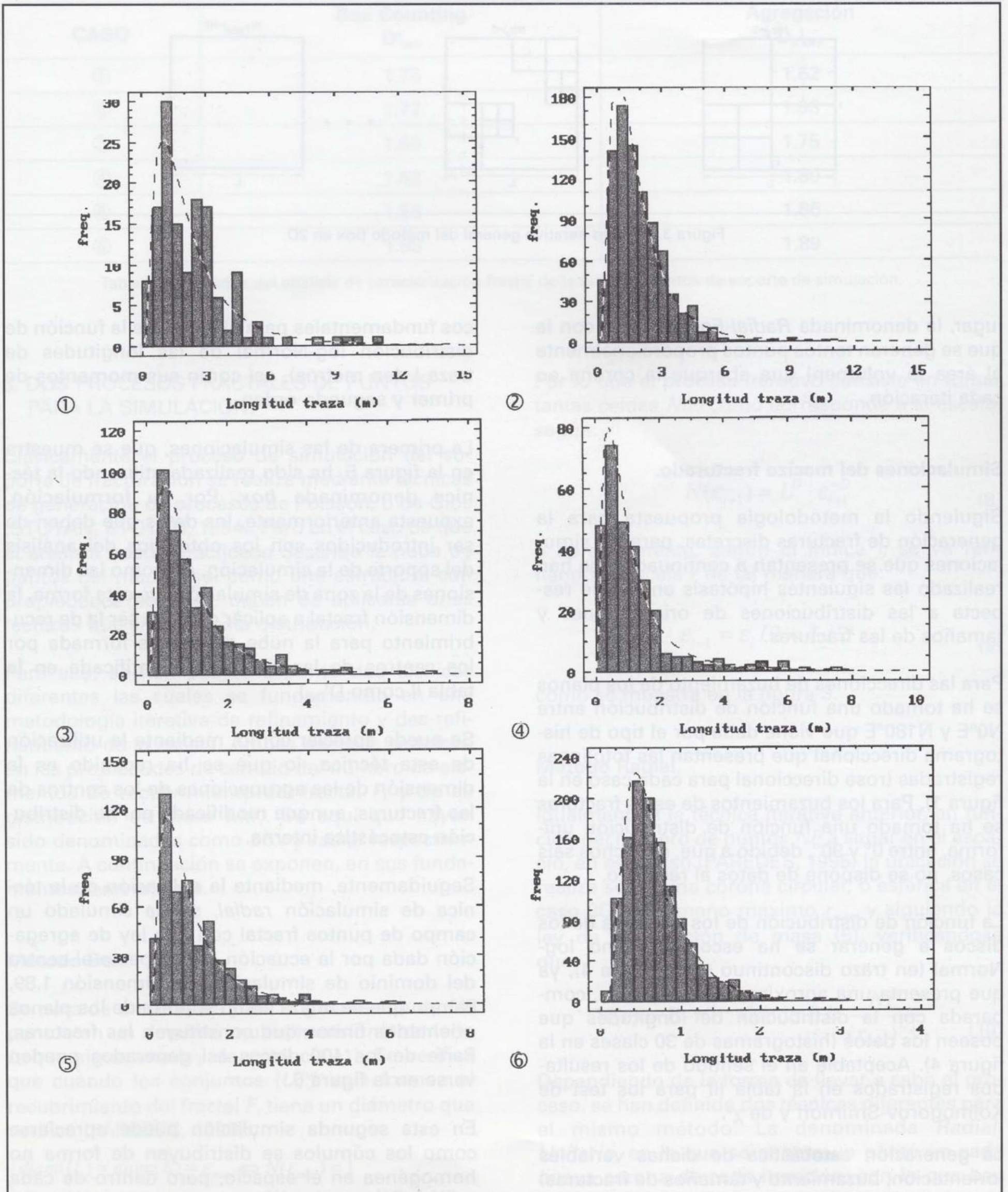


Figura 4. Histogramas muestrales de los tamaños de traza para cada uno de los casos analizados.

CASO	$\mu_L(m)$	$\sigma_L(m)$	K-S _N	α	χ^2	α	g.d.l.
①	2.4545	2.2418	0.0759	0.3854	21.826	0.00944	9
②	1.9697	1.5401	0.0461	0.0476	37.688	0.00032	13
③	1.1914	1.1415	0.0432	0.3819	19.366	0.08001	12
④	1.2048	1.2502	0.0424	0.6499	11.952	0.21599	9
⑤	1.0878	1.0028	0.0477	0.2018	31.106	0.00189	12
⑥	0.6999	0.4320	0.0275	0.3130	27.325	0.02619	15

Tabla III. Estadísticos fundamentales de las longitudes de traza, y estadísticos (Kolmogorov-Smirnov K-S_N y Chi cuadrado χ^2 , y niveles de significación α)

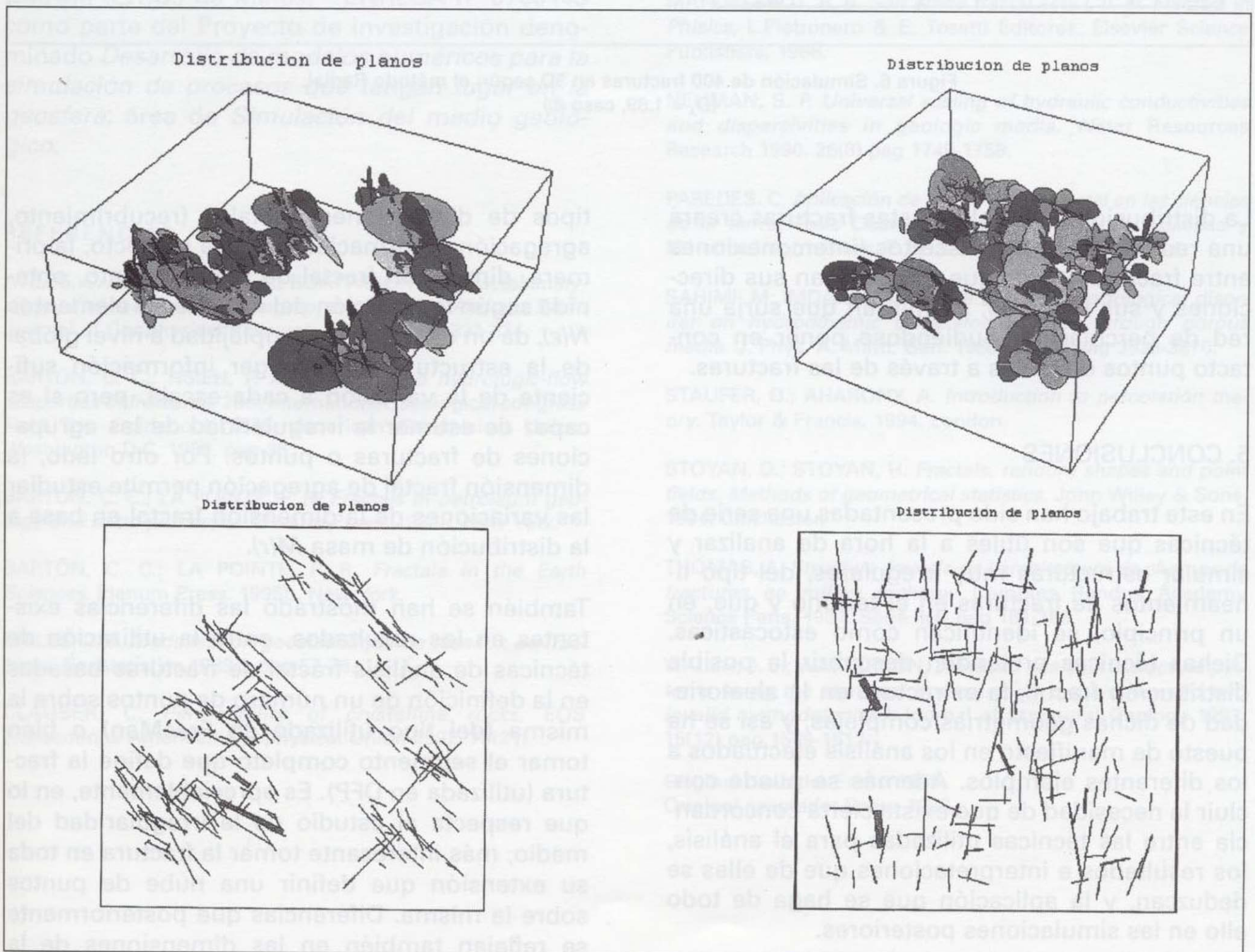


Figura 5. Simulaciones de 200 fracturas en 2D según el método Box.
($D = 1.56$ y $D = 1.86$ respectivamente, casos ⑤ y ⑥)

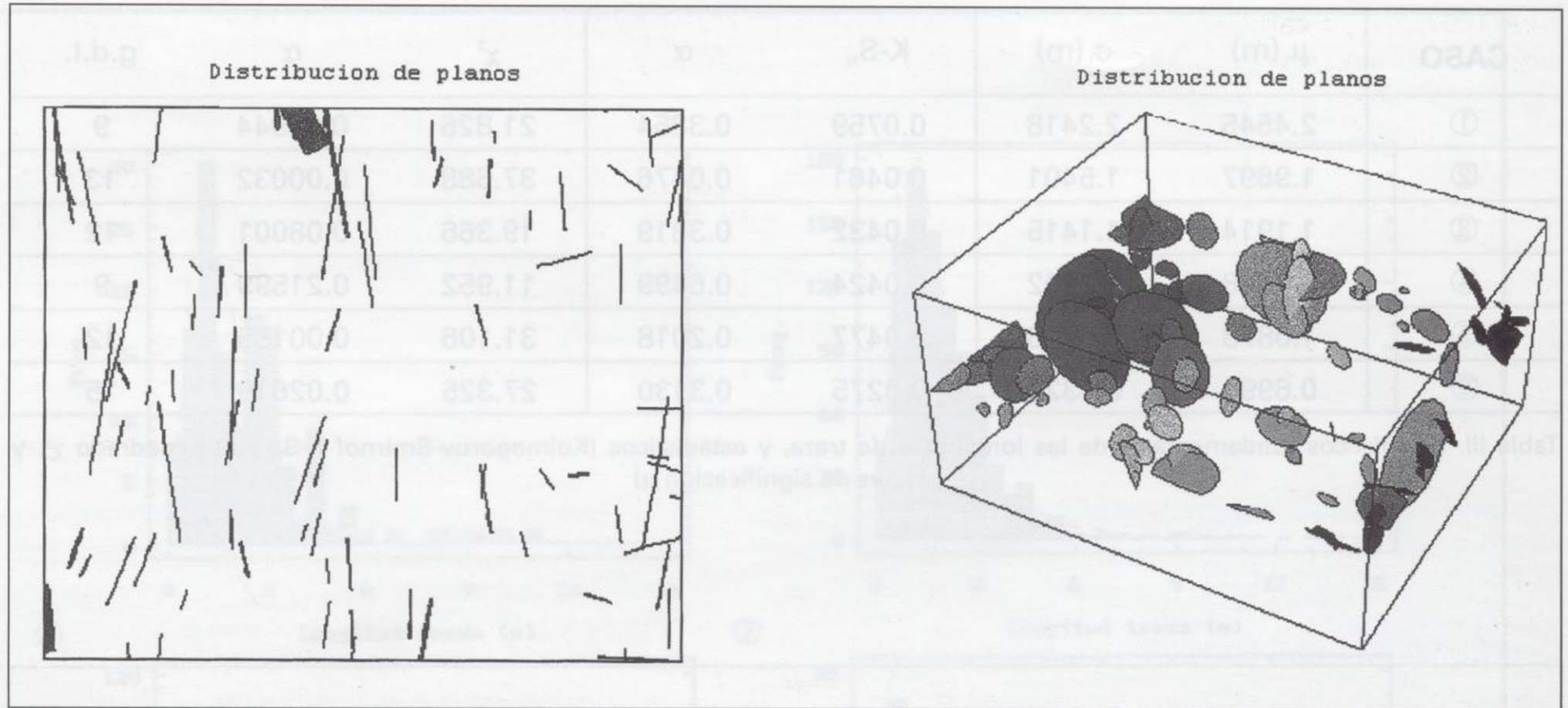


Figura 6. Simulación de 400 fracturas en 3D según el método Radial.
($D_A = 1.89$, caso ⑥)

La distribución espacial de estas fracturas creará una red de conductos discretos (interconexiones entre fracturas) tales que, según sean sus direcciones y sus tamaños, permitirán que surja una red de percolación, pudiéndose poner en contacto puntos distantes a través de las fracturas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo han sido presentadas una serie de técnicas que son útiles a la hora de analizar y simular estructuras muy irregulares, del tipo lineamientos de fracturas en el terreno y que, en un principio, se identifican como estocásticas. Dichas técnicas pretenden descubrir la posible distribución fractal, la estructura en la aleatoriedad de dichas geometrías complejas, y así se ha puesto de manifiesto en los análisis efectuados a los diferentes ejemplos. Además se puede concluir la necesidad de que exista cierta concordancia entre las técnicas utilizadas para el análisis, los resultados e interpretaciones que de ellas se deduzcan, y la aplicación que se haga de todo ello en las simulaciones posteriores.

Igualmente se ha puesto en evidencia las posibles interpretaciones que tienen los diferentes

tipos de dimensiones fractales (recubrimiento, agregación, información). A éste respecto, la primera, dimensión fractal de recubrimiento, obtenida según la variación del número de elementos $N(\epsilon)$, da un orden de la complejidad a nivel global de la estructura, sin recoger información suficiente de la variación a cada escala, pero sí es capaz de estimar la irregularidad de las agrupaciones de fracturas o puntos. Por otro lado, la dimensión fractal de agregación permite estudiar las variaciones de la dimensión fractal en base a la distribución de masa $M(r)$.

También se han mostrado las diferencias existentes en los resultados, entre la utilización de técnicas de análisis fractal de fracturas basadas en la definición de un número de puntos sobre la misma (del tipo utilizado en FracMan) o bien tomar el segmento completo que define la fractura (utilizada en DFP). Es apreciablemente, en lo que respecta al estudio de la irregularidad del medio, más interesante tomar la fractura en toda su extensión que definir una nube de puntos sobre la misma. Diferencias que posteriormente se reflejan también en las dimensiones de la nube de puntos utilizada en la simulación del soporte de fracturación.

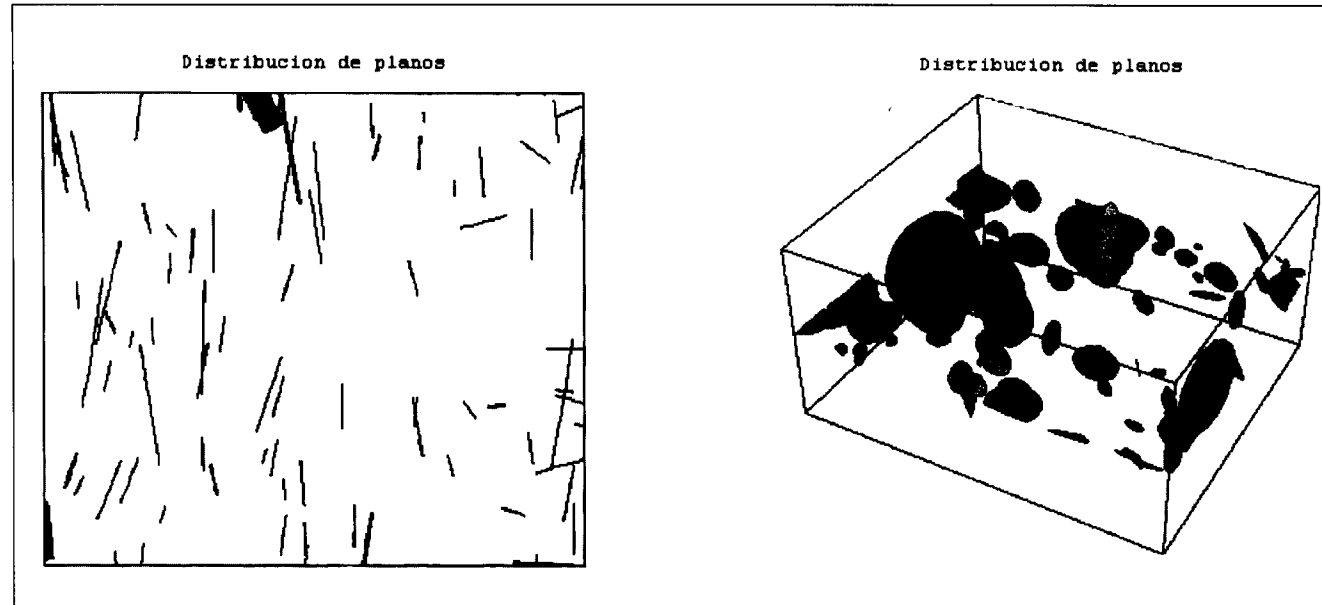


Figura 6. Simulación de 400 fracturas en 3D según el método Radial.
($D_A = 1.89$, caso ©)

La distribución espacial de estas fracturas creará una red de conductos discretos (interconexiones entre fracturas) tales que, según sean sus direcciones y sus tamaños, permitirán que surja una red de percolación, pudiéndose poner en contacto puntos distantes a través de las fracturas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo han sido presentadas una serie de técnicas que son útiles a la hora de analizar y simular estructuras muy irregulares, del tipo lineamientos de fracturas en el terreno y que, en un principio, se identifican como estocásticas. Dichas técnicas pretenden descubrir la posible distribución fractal, la estructura en la aleatoriedad de dichas geometrías complejas, y así se ha puesto de manifiesto en los análisis efectuados a los diferentes ejemplos. Además se puede concluir la necesidad de que exista cierta concordancia entre las técnicas utilizadas para el análisis, los resultados e interpretaciones que de ellas se deduzcan, y la aplicación que se haga de todo ello en las simulaciones posteriores.

Igualmente se ha puesto en evidencia las posibles interpretaciones que tienen los diferentes

tipos de dimensiones fractales (recubrimiento, agregación, información). A éste respecto, la primera, dimensión fractal de recubrimiento, obtenida según la variación del número de elementos $N(\epsilon)$, da un orden de la complejidad a nivel global de la estructura, sin recoger información suficiente de la variación a cada escala, pero sí es capaz de estimar la irregularidad de las agrupaciones de fracturas o puntos. Por otro lado, la dimensión fractal de agregación permite estudiar las variaciones de la dimensión fractal en base a la distribución de masa $M(r)$.

También se han mostrado las diferencias existentes en los resultados, entre la utilización de técnicas de análisis fractal de fracturas basadas en la definición de un número de puntos sobre la misma (del tipo utilizado en FracMan) o bien tomar el segmento completo que define la fractura (utilizada en DFP). Es apreciablemente, en lo que respecta al estudio de la irregularidad del medio, más interesante tomar la fractura en toda su extensión que definir una nube de puntos sobre la misma. Diferencias que posteriormente se reflejan también en las dimensiones de la nube de puntos utilizada en la simulación del soporte de fracturación.

Mediante la utilización de las técnicas de simulación apropiadas se ha mostrado como es posible reproducir la formación de agrupamientos de las fracturas, constituyendo agregados semejantes a los presentes en los medios muestreados. Estas técnicas, denominadas *box* y *radial*, se han desarrollado en función de las propiedades fractales que debe de tener la estructura a simular, y al ser iterativas, permiten que las simulaciones se extrapolen o interpolen a mayor o menor escala según el número de iteraciones efectuadas.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación expuesto ha sido realizado y subvencionado dentro del Convenio DMAMI (E.T.S.I de Minas) - ENRESA nº 0700443 como parte del Proyecto de Investigación denominado *Desarrollo de modelos numéricos para la simulación de procesos que tengan lugar en la geosfera*; área de *Simulación del medio geológico*.

REFERENCIAS

- AVILES, C. A.; SCHOLZ, C. A.; BOATWRIGHT, J. *Fractal analysis applied to characterize segments of the San Andreas Fault*. Journal of Geophysical Research 1987. 92 pag 331-334.
- BARTON, C. C.; HSIEH, P. A. *Physical and hydrologic-flow properties of fractures*. 28th International Geological congress Field Trip Guidebook T385. American Geophysical Union. Washington D.C. 1989. pag 36.
- BARTON, C. C.; LA POINTE, P. R. *Fractals in petroleum geology and earth processes*. Plenum Press. 1995a. New York.
- BARTON, C. C.; LA POINTE, P. R. *Fractals in the Earth Sciences*. Plenum Press. 1995b. New York.
- CHILES, J. P. *Modelisation geostatistique de reseaux de fractures*. Geostatistics 1989 1 pag 57-76.
- CLAUSER, C. *Permeability of crystalline rocks*. EOS Transactions American Geophysical Union 1992. 73(21)

DERSOWITZ, W.; REDUS, K.; WALLMANN, P.; LAPOINTE, P.; AXELSSON, C. L. *The implication of fractal dimension in hydrogeology and rock mechanics*. Version 1.1. SKB Technical Report 1992. 92-17. Stockholm.

FALCONER, K. *Fractal geometry. Mathematical foundations and applications*. John Willey & Sons. 1990. Chichester.

FEDER, J. *Fractals*. Plenum Press. 1988. New York

GUMIEL, P.; PAREDES, C. *Interés de algunas aplicaciones de la geometría fractal en ciencias de la tierra*. Tierra y Tecnología 1996. 14-15(4^{trim}) Madrid. pag 12-21.

JACQUIN, C. G.; ADLER, P. M. *Fractal porous media II: geometry of porous geological structures*. Transport in Porous Media 1987. 2 pag 571-596.

KORVIN, G. *Fractal models in the earth sciences*. Elsevier. 1992. Amsterdam.

MANDELBROT, B. B. *Self affine fractal sets I, II, III. Fractals in Physics*, L.Pietronero & E. Tosatti Editores. Elsevier Science Publishers. 1986.

NEUMAN, S. P. *Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media*. Water Resources Research 1990. 26(8) pag 1749-1758.

PAREDES, C. *Aplicación de la geometría fractal en las ciencias de la tierra*. Tesis Doctoral. Depto. Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. E.T.S.I. de Minas. 1995. Madrid.

SAHIMI, M.; IMDAKM, A. O. *The effect of morfological disorder on hydrodynamic dispersion in flow through porous media*. J. Phys. A. Math. Gen. 1988. 21(19) pag 3833-3870.

STAUFER, D.; AHARONY, A. *Introduction to percolation theory*. Taylor & Francis. 1994. London.

STOYAN, D.; STOYAN, H. *Fractals, random shapes and point fields. Methods of geometrical statistics*. John Willey & Sons. 1994. Chichester.

THOMAS, A. *Structure fractale de l'architecture de champs de fractures en milieu rocheux*. Comptes Rendus Academy Science Paris. 1987. Série II(4) pag 181-186.

WALSH, J. J.; WATTERSON, J. *Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies*. Journal of Structural Geology 1993. 15(12) pag 1509-1512.

Original recibido: Enero 1998.

Original aceptado: Enero 1998.

DETERMINACION DE NIVELES *SEGUROS* DE CONTAMINANTES EN SUELOS A PARTIR DE CONSIDERACIONES DE RIESGO.

Por A. CALLABA DE ROA (*)

RESUMEN

Una cuestión de la máxima importancia en los trabajos de investigación de terrenos contaminados es la definición de niveles de concentración de contaminantes que se puedan considerar seguros. Se presenta una metodología de determinación de niveles seguros recientemente desarrollada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos. En la derivación de éstos se atiende tanto a las características específicas de los terrenos como a consideraciones de riesgo. Se discuten las ventajas de éstos frente a valores de tipo genérico.

Palabras clave: Riesgo, Análisis de riesgos, Niveles seguros, Soil screening levels, Suelos contaminados.

ABSTRACT

An instrumental aspect in the assessment and remediation tasks of contaminated sites is the setting of safe contaminant levels. A methodology recently developed by the U.S. EPA for the setting of safe soil levels is presented. This levels are risk-based and, at the same time, take into account the specific features of sites. Finally their use is discussed in relation with generic levels.

Key words: Risk, Risk analysis, Safe levels, Soil screening levels, Contaminated soils.

1. INTRODUCCION

A diferencia de los otros compartimentos, la contaminación de suelos tiene un carácter particularmente insidioso por cuanto la dinámica de los contaminantes en el mismo es intrínsecamente más lenta y sus efectos no se hacen visibles sino con cierto decalaje en el tiempo. De este modo, es en nuestros días cuando tenemos que afrontar las consecuencias de contaminaciones históricas. Sin agotarlos por completo, sí que conviene señalar los principales efectos de la contaminación de suelos:

- Tienen el potencial de transmitir la carga polucionante hacia los recursos acuíferos con los que están relacionados deteriorando la calidad de las aguas subterráneas.

- Ejercen efectos adversos sobre la salud de los individuos por exposición, directa o indirecta, a la contaminación.

- Ejercen efectos adversos sobre los ecosistemas.

Por otra parte, no hay que olvidar las consecuencias sociales y económicas que se derivan de la misma existencia de suelos contaminados pues allá donde éstos se encuentran hay limitaciones considerables en el desarrollo de determinadas actividades económicas sobre el mismo. En este sentido, debe recordarse que los suelos contaminados suelen localizarse en relación con núcleos industriales situados en áreas de expansión urbana y comprometen eventuales cambios de uso de los terrenos.

La presencia de sustancias contaminantes de origen antrópico en suelos, por definición ajenas a

(*) Fundación Entorno/N.R.M.L. U.S. EPA.

la naturaleza de los mismos, apuntan ya *per se* a la existencia de fenómenos de contaminación. Ahora bien, en nuestros días este fenómeno es de extensión prácticamente global con lo que, haciendo un ejercicio de posibilismo, debemos admitir un cierto nivel de concentración de contaminantes. El problema, por tanto, estriba en determinar qué niveles son los que se pueden considerar tolerables o seguros.

La formulación de una metodología estandarizada para el análisis de riesgos, ha supuesto un considerable avance en la definición de niveles *seguros* de contaminación en suelos. En relación con este extremo, hay dos conceptos que aunque son afines tienen significados diferentes: peligro y riesgo. La existencia de sustancias contaminantes en los suelos supone un *peligro* por cuanto que, si concurren las circunstancias adecuadas, las personas y el medio ambiente (entendiendo tanto sus constituyentes bióticos como abióticos) podrían quedar expuestos a la acción perniciosa de los mismos. La probabilidad de que tal peligro se pueda materializar es el *riesgo*. Por lo tanto, la determinación del riesgo permite pasar de una percepción vaga del peligro a una cuantificación del mismo.

La derivación de niveles de concentración de contaminantes en el suelo que puedan ser considerados admisibles o seguros requiere por tanto de herramientas que permitan hacer una evaluación de riesgos.

2. ANALISIS DE RIESGOS

Se puede entender el análisis de riesgos como un cuerpo de conocimiento que evalúa y determina la probabilidad de que un *efecto adverso* tenga lugar [Molak, 1996]. El significado del término efecto adverso varía según la disciplina a la que se aplique el análisis de riesgos. Así por ejemplo en el campo de la energía nuclear, una de las áreas de conocimiento que más tempranamente han aplicado estas técnicas, el mismo puede entenderse como la probabilidad de que se produzca un fallo en un sistema e incluso de que se produzca un accidente mayor como consecuencia de un conjunto de fallos. En el contexto que venimos tratando el efecto adverso puede entenderse como la probabilidad de que, como conse-

cuencia de una exposición a los contaminantes existentes en el suelo, se produzca un daño sobre la salud de las personas o el medio ambiente.

Las evaluaciones de riesgo en terrenos contaminados pueden diferir considerablemente en su grado de profundidad atendiendo tanto a la especificidad del terreno como del grado de información disponible. A pesar de ello, independientemente del grado de detalle con que se efectúen, se viene en admitir que la metodología es común y comprende cuatro etapas:

- Identificación del peligro.
- Determinación de la relación dosis-respuesta.
- Determinación de la exposición.
- Caracterización del riesgo.

En la **figura 1** se presenta un esquema de la metodología de análisis de riesgos en terrenos contaminados.

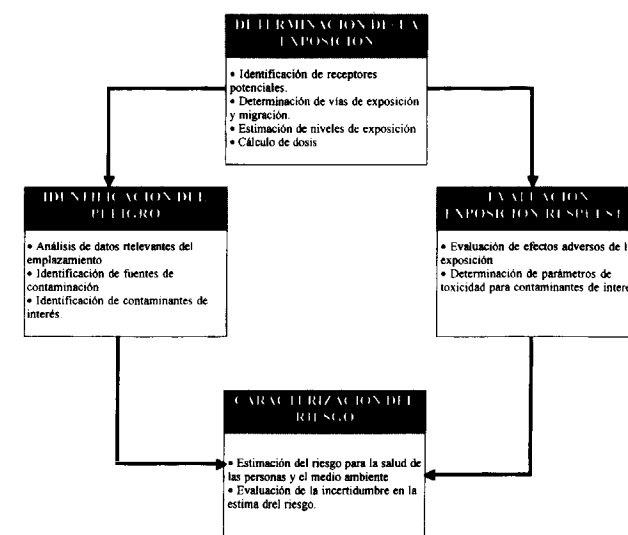


Figura 1. Etapas en el análisis de riesgos.

2.1. Identificación del peligro

En esta etapa se realiza una valoración preliminar de la peligrosidad de los terrenos contaminados. Los trabajos a realizar en esta primera diagnosis incluyen: la determinación de los usos a los que se han destinado los terrenos a lo largo del

tiempo, la identificación de fuentes de contaminantes, la identificación y ponderación de potenciales vías de migración para los contaminantes en virtud de las características físicas y geológicas de los terrenos, la elaboración de una relación de los contaminantes y, por último, la selección de aquellos que, de acuerdo con sus características (toxicidad, potencial de bioacumulación, propiedades físicas y químicas, etc.), pueden resultar potencialmente más dañinos.

Respecto al último punto, en algunas situaciones se ha sugerido incluir en esta relación aquellas sustancias que, aun no habiéndose detectado en las tareas de caracterización, su existencia resulta razonable en virtud de las características del terreno estudiado [U.S. EPA, 1991].

2.2. Determinación de la relación dosis-respuesta

En esta parte del análisis de riesgos se persigue la determinación cualitativa y cuantitativa de los efectos que tiene sobre la salud la exposición a contaminantes ambientales. Se admite que ésta incluye dos grupos de tareas: determinación del tipo de efecto y cuantificación de los efectos.

Considerando los efectos que producen, se consideran dos grandes grupos de contaminantes: carcinogénicos y no carcinogénicos o sistémicos. El modo en que posteriormente vayan a ser tratados unos u otros difiere, de aquí la conveniencia de considerarlos separadamente. Por otro lado, se debe señalar que la frontera que separa un grupo y otro de contaminantes no es, en absoluto nítida, basándose en las evidencias disponibles. La U.S. EPA ha elaborado una clasificación de las sustancias tóxicas más comúnmente encontradas en terrenos contaminados. En la **tabla I** se recogen las categorías distinguidas.

Para el caso de contaminantes no carcinogénicos la valoración de su potencial tóxico se puede hacer en términos de la ingestión diaria admisible (ADI) o de la dosis de referencia (RfD) prefiriéndose, cuando ello es posible, el segundo de los parámetros por considerarse más riguroso [Kofi Asante-Duah, 1996]. La dosis de referencia se define como la máxima cantidad de un compuesto a la que un individuo puede estar expuesto de modo continuo sin experimentar

Categoría de las sustancias	Evidencia
A	efectos carcinogénicos demostrados sobre las personas.
B	efectos carcinogénicos probables sobre las personas.
B1	evidencias limitadas sobre efectos carcinogénicos sobre las personas pero suficientes sobre animales.
B2	sin evidencias carcinogénicas sobre las personas pero con evidencias sobre animales.
C	efectos carcinogénicos posibles sobre las personas.
D	no clasificables como carcinogénicas.
E	evidencias de no ser carcinogénicas para las personas

Tabla I. Clasificación de los contaminantes de acuerdo con su carcinogenicidad.

efectos en su salud. Sus unidades son mg/peso individuo (Kg)/día. Esta dosis se establece tanto para la vía de ingestión (RfD_o) como de inhalación (RfC) denominándose en este último caso concentración de referencia.

La potencia carcinogénica de las sustancias se valora en términos del factor de pendiente (SF) que establece el exceso de frecuencias en la aparición de cánceres por unidad de dosis recibida. Tiene unidades (mg/Kg/día)⁻¹.

2.3. Determinación de la exposición

La determinación de la exposición se entiende como un conjunto de tareas que permiten determinar en qué medida los contaminantes presentes en el suelo pueden alcanzar los receptores. En otros términos, estimar la concentración/dosis a que las personas u otro compartimento ambiental cualquiera pueden verse expuestos. Para ello habrá que determinar y ponderar la importancia de las vías de exposición e igualmente valorar la cinética de los contaminantes en cada vía.

La exposición puede ser determinada por medida directa en el receptor. Sin embargo, los costes económicos y otro tipo de condicionantes han dado lugar al desarrollo de algoritmos que modelizan los fenómenos implicados en el transporte de los contaminantes para las diferentes vías.

2.4. Caracterización del riesgo

En la caracterización de riesgo se obtiene un valor numérico para este atributo a partir del producto del potencial tóxico de una sustancia y el nivel de exposición por las diferentes vías significativas que se puedan haber identificado.

Para el caso de las sustancias carcinogénicas éste se expresa como factor de riesgo (TR) que se define como el incremento en la probabilidad de que un individuo desarrolle algún tipo de cáncer a lo largo de su vida como consecuencia de la exposición. Valores que se consideran razonables para el factor de riesgo oscilan entre 1 en 10.000 ó 1 en 10.000.000. Para los no carcinogénicos se expresa como el cociente de riesgo (HQ) que se define como el valor de la relación entre el nivel de exposición y la dosis de referencia. Suele admitirse como válido un valor de 1.

3. ESTABLECIMIENTO DE NIVELES DE CONCENTRACION DE CONTAMINANTES EN SUELOS

Como se ha comentado previamente, una decisión de trascendencia en el proceso de investigación-recuperación de terrenos contaminados es determinar qué niveles de concentración de contaminantes en suelos se consideran admisibles. En función de los límites que se establezcan, se decidirá incrementar el esfuerzo de investigación o, por el contrario, se descartará la realización de posteriores trabajos.

Hasta el momento se han venido utilizando, casi con exclusividad, límites genéricos y puntuales en que un único valor establecido de antemano determina la calidad del suelo y, sólo en etapas avanzadas del proceso se ha atendido tanto a las especificidades de los terrenos como a consideraciones de riesgo.

Recientemente la U.S. EPA ha desarrollado una metodología para la derivación de niveles de concentración seguros en etapas de investigación (*Soil Screening Levels (SSL)*) [U.S. EPA, 1996]. Este procedimiento proporciona un esquema que permite adaptar los niveles seguros a las características específicas de los terrenos. Además, fijado un valor de riesgo que se considera aceptable, determina estos niveles para distintas vías de exposición.

Para la derivación de los SSL el proceso de análisis de riesgos que se han comentado en apartados anteriores se ve modificado en su orden puesto que en lugar de valorar el riesgo de una situación particular, se parte de un riesgo que se considera admisible y que es prefijado de antemano. Posteriormente, a partir del mismo, se determinan niveles de concentración en suelos que, para un escenario dado, cumplen con tales condiciones.

3.1. Soil Screening Levels

La derivación de estos niveles se verifica en un escenario de exposición deliberadamente conservador. En consecuencia, los niveles obtenidos son igualmente conservadores y se pueden calificar de seguros en la mayoría de las situaciones. Por tanto, la comparación de éstos con las concentraciones realmente encontradas en los terrenos permitiría descartar acciones posteriores en aquellas áreas cuyos valores de concentración se sitúen por debajo de ellos. Adicionalmente, en el caso en que los valores encontrados superasen los definidos como seguros, se cuenta con una útil orientación sobre los contaminantes y las vías de migración que habría que considerar con preferencia en trabajos posteriores. Las premisas sobre los que se derivan los SSL se resumen en las siguientes:

A. Uso del terreno: Residencial

B. Riesgo admitido

- contaminantes cancerígenos: $TR \leq 10^{-6}$
- contaminantes no cancerígenos: $THQ \leq 1$

C. Vías de exposición principales

- Suelos superficiales (< 2 cm): ingestión
- Suelos subsuperficiales (> 2 cm): inhalación de volátiles y agua contaminada

De acuerdo con esto, los SSL se derivan tanto para el caso de vías de exposición directas (inhalación e ingestión de suelo) como vías indirectas (ingestión de agua subterráneas contaminadas).

3.1.1. Cálculo de los SSL en suelos superficiales

Las posibles vías de exposición a tener en cuenta para suelos superficiales son: ingestión directa de suelo, contacto dérmico e inhalación de partí-

culas. No obstante, en una primera aproximación, a no ser que circunstancias particulares aconsejasen lo contrario, tan sólo se considera como significativa la vía de ingestión puesto que se considera que a partir de ésta es posible derivar valores de concentración suficientemente seguros.

La expresión para el cálculo de valores de SSL en suelos superficiales para contaminantes carcinogénicos y no carcinogénicos se recogen en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. Asimismo, en la tabla II se recogen los valores de factores de exposición empleados por defecto:

$$SSL = \frac{TR \times BW \times AT \times 365 \text{ días/año}}{SF_0 \times 10^{-6} \text{ Kg/mg} \times EF \times IF_{s.ad.}} \quad (1)$$

$$SSL = \frac{THQ \times BW \times AT \times 365 \text{ días/año}}{1/RfD_0 \times 10^{-6} \text{ Kg/mg} \times EF \times ED \times IR} \quad (2)$$

No carcinogénicos		Carcinogénicos	
Cociente de riesgo (THQ):	1	Factor de riesgo (TR):	10^{-6}
Peso (BW) Kg:	15	Tiempo medio (AT) años:	70
Tiempo medio (AT) años:	6	Frecuencia de exposición (EF) días/año:	350
Duración de la exposición (ED) años:	6	Factor de ingestión ajustada ($IF_{s.ad.}$) (mg año/Kg día)	114
Frecuencia de exposición (EF) días/año:	350	Factor de pendiente (SF_0) mg/Kg día, específico	
Ingestión diaria de suelo (IR) mg/día:	200		
Dosis de referencia (RfD_0) mg/Kg día:	específico		

Tabla II. Valores de exposición para ingestión de suelo.

Para el caso de la ingestión de suelo, no hay consideraciones sobre las características específicas del emplazamiento. Por esta razón, si se admiten como válidos los factores de riesgo, los niveles derivados serán de aplicación en cualquier terreno.

3.1.2. Cálculo de los SSL en suelos subsuperficiales

En el supuesto de que la contaminación se extendiese más allá de la zona superficial, dos son las vías de exposición que se considera deben valorarse:

- inhalación de volátiles del suelo
- ingestión de aguas contaminadas

Inhalación de volátiles del subsuelo

Las expresiones para el cálculo de los niveles de contaminantes volátiles admisibles en suelos considerando la vía de exposición por inhalación, se recogen en las ecuaciones (3) y (4). La primera es para contaminantes carcinogénicos y para no carcinogénicos. Adicionalmente, en la tabla III se han recogido los valores de exposición por defecto:

$$SSL = \frac{TR \times BW \times AT \times 365 \text{ días/año}}{URF \times 1000 \text{ } \mu\text{g/m}^3 \times EF \times ED \times 1/VF} \quad (3)$$

$$SSL = \frac{THQ \times AT \times 365 \text{ días/año}}{EF \times ED \times [(1/RfC) \times (1/VF)]} \quad (4)$$

No carcinogénicos		Carcinogénicos	
Cociente de riesgo (THQ):	1	Factor de riesgo (TR):	10^{-6}
Tiempo medio (AT) años:	30	Tiempo medio (AT) años:	70
Frecuencia de exposición (EF) días/año:	350	Frecuencia de exposición (EF) días/año:	350
Duración de la exposición (ED) años:	30	Duración de la exposición (ED) años:	30
Concentración de referencia por Inhalación (RfC) (mg/m ³)	específico	Factor de riesgo unitario por inhalación (URF) ($\mu\text{g/m}^3$) ¹	específico

(1) Los valores de dosis/concentración de referencia al igual que los factores de pendientes para los compuestos carcinogénicos se pueden encontrar en la base de datos IRIS para aquellos contaminantes más comunmente existente en terrenos contaminados. Esta base de datos es mantenida y periódicamente actualizada por la U.S. EPA:

Tabla III. Valores de exposición para ingestión de volátiles

En las ecuaciones (3) y (4) aparece, como factor auxiliar, el factor de volatilización (VF) que es una medida de la relación que existe entre la concentración de contaminante en el suelo y el flujo del mismo que volatilizado escapa de este medio. Tiene unidades m³/Kg y se calcula atendiendo a las propiedades químicas del compuesto, a las características específicas del suelo en que éste se encuentra y también a consideraciones de tipo

climático. En la **ecuación (5)** se recoge la expresión de cálculo del factor de volatilización. En esta ecuación se define un segundo factor auxiliar (difusividad aparente (D_A)) cuya expresión de cálculo se recoge en la **ecuación (6)**. Igualmente, en la **tabla IV** se presentan los valores que, en ausencia de otros específicos, pueden utilizarse para la determinación de ambos factores.

$$VF = \frac{Q/C \times \sqrt{\pi \cdot D_A \cdot T \times 10^4 \text{ m}^2 / \text{cm}^2}}{2 \times \rho_b \times D_A} \quad (5)$$

$$D_A = \frac{[(\theta_a^{3.33} \times D_i \times H) + (\theta_w^{3.33} \times D_w) / n^2]}{(\rho_b \times K_d) + \theta_w + (\theta_a \times H)} \quad (6)$$

Factores para la determinación del factor de volatilización			
Q/C (g/m ² s Kg/m ³):	68.81	Difusividad en aire (D)	específica
Intervalo de exposición (T)s	9,5 10 ⁶	Difusividad en agua (D _w)	específica
Densidad seca aparente (ρ _b) g/cm ³	1.5	Constante de Henry (H)	específica
Densidad real (ρ _s) g/cm ³	2.65	Coef de partición suelo-agua (K _d) L/Kg	K _{oc} × f _{oc}
Porosidad total (n)	1-(ρ _b /ρ _s)	Coef de partición m.o.-agua (K _{ow}) cm ³ /g	específico
Porosidad ocupada (θ _w)	0.15	Contenido de C _{org} en el suelo (f _{oc})	específico
Porosidad no ocupada (θ _a)	n-θ _w		

Tabla IV. Valores para la determinación del factor de volatilización.

El factor de volatilización modula la exposición por inhalación a la disponibilidad efectiva de contaminantes volátiles. Para ello, éste valora dos efectos: la emisión de contaminantes hacia el medio aéreo y la dispersión de los mismos. La dispersión se estima a partir del parámetro Q/C mientras que el resto de las variables estiman la emisión.

El parámetro Q/C es dependiente de la climatología del terreno donde se valore así como de su superficie de exposición. Su determinación se ha realizado modelizando el fenómeno en parcelas de tamaño variable distribuidas geográficamente a lo largo de toda la extensión del país abarcando todo tipo de zonas climáticas. Así por ejemplo, el valor de defecto recogido en la **tabla IV** corresponde a una parcela situada en el sur del estado de California con una superficie de ≈ 0.2 Ha (0.5 acres).

La emisión se valora a partir de parámetros que se refieren tanto a propiedades texturales del suelo como a las propiedades químicas de los contaminantes.

Una última puntualización a hacer respecto a esta vía es que, en algunas circunstancias, las concentraciones de contaminantes en el suelo pueden exceder los límites de adsorción sobre los constituyentes sólidos y saturar por completo la atmósfera del suelo y el agua existente en el mismo. En este caso, los contaminantes estarán en el suelo en fase libre bien como sólidos o como líquidos (en fase no acuosa) y la emisión de volátiles se estabiliza, independientemente de la cantidad de contaminantes que haya por exceso. Bajo estas condiciones los niveles derivados suponen una sobreestimación de la exposición por inhalación.

La concentración por saturación de un contaminante se puede estimar a partir de la **ecuación (7)**:

$$C_{sat} = \frac{S}{\rho_b} \times (K_d \cdot \rho_b + \theta_w + H \cdot \theta_w) \quad (7)$$

donde S es la solubilidad en agua. Los valores por defecto para el resto de los parámetros están recogidos en la **tabla III**.

Para aquellos casos en que el nivel de concentración determinado excede el correspondiente al de saturación, el SSL será sustituido por el valor de concentración de saturación.

Protección de aguas subterráneas

El movimiento de los contaminantes desde la zona no saturada del terreno hacia la zona saturada y de aquí hasta los puntos de exposición, es un fenómeno de una gran complejidad por la gran cantidad de reacciones de tipo físico-químico y biológico en las que se ven involucrados los contaminantes. En su conjunto, estas reacciones tienen como resultado final una atenuación de la concentración. Admitiendo cierto número de simplificaciones es posible hacer una estimación de los niveles que se consideran seguros.

La determinación de SSL para esta vía implica la definición de un nivel aceptable de concentración

en agua y la evaluación de un factor de dilución. El producto de ambas cantidades determina la máxima concentración admisible en el lixiviado (C_w).

El factor de atenuación, que es siempre mayor que la unidad (un valor igual a 1 significa una atenuación nula), es fuertemente dependiente de las dimensiones del terreno y de sus características hidrogeológicas. Por defecto se admite que un valor de 20 es suficientemente conservador.

El nivel de concentración admisible en agua subterránea, se puede establecer a partir de criterios de riesgo aceptable o bien a partir de criterios de calidad existentes para aguas subterráneas (p.e. MCL en las regulaciones federales de los Estados Unidos).

En la **ecuación (8)** se recoge la expresión para el cálculo de SSL para esta vía. La **tabla V** recoge los valores que se pueden usar por defecto para esta ecuación.

$$SSL_{\text{mg/Kg}} = C_w \times \left[K_d + \frac{(\theta_w + \theta_a \cdot H)}{\rho_b} \right] \quad (8)$$

Factores para la determinación de niveles de protección para el agua subterránea	
Concentración en el lixiviado (C_w) mg/l	específica
Coef de partición suelo-agua (K_d) L/Kg	K _{oc} × f _{oc}
Coef de partición m.o.-agua (K_{ow}) cm ³ /g	específico
Contenido de C _{org} en el suelo (f _{oc})	0.002
Porosidad acupada (θ _w)	0.3
Porosidad no ocupada (θ _a)	n-θ _w
Porosidad total (n)	1-(ρ _b /ρ _s)
Densidad seca aparente (ρ _b) g/cm ³	1.5
Densidad real (ρ _s) g/cm ³	2.65
Constante de Henry (H)	específica

Tabla 5. Valores para la determinación de SSL para aguas subterráneas

4. DISCUSION

Resulta incuestionable que en cualquiera de las etapas de investigación-recuperación de terrenos contaminados es preciso contar con algún tipo de nivel de concentración de referencia, ya se entiendan éstos como niveles seguros o como objetivos a alcanzar en tareas de recuperación.

En el contexto que venimos tratando, determinación de niveles seguros, la discusión se plantea en términos del tipo de nivel a considerar.

La determinación de niveles seguros según el procedimiento que se ha descrito representa, frente al uso de valores puntuales preestablecidos, una aproximación más efectiva tanto por su especificidad como por la riqueza de información que aportan.

En efecto, resultan ser niveles *ad hoc* por cuanto consideran las peculiaridades de las características terrenos y, en consecuencia, resultan ser mucho más ajustados a situaciones específicas.

Frente a otros niveles de referencia soportados por valores puntuales, los SSL, al estar definidos para distintas vías de exposición, acotan de modo mucho más preciso la naturaleza del riesgo. Para ilustrar este extremo se propone el siguiente ejemplo. La **figura 2** recoge, en un diagrama de cajas, los límites de concentración que

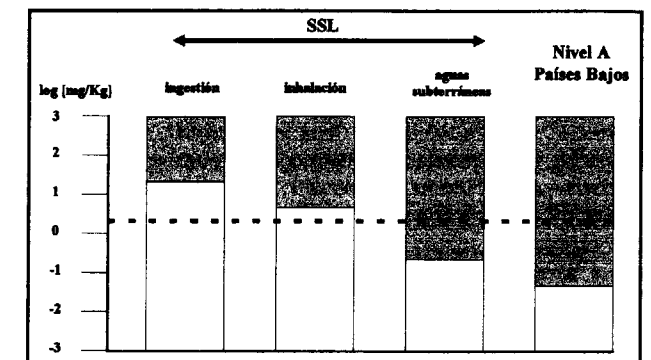


Figura 2. Comparación de SSL frente a valores puntuales.

se consideran seguros para el benceno, las tres primeras representan los SSL para distintas vías de exposición y la última el nivel A¹ establecido para el mismo compuesto en la reglamentación de los Países Bajos. En línea discontinua se ha representado una hipotética concentración de 5 mg/Kg de benceno. Como se puede apreciar, el contraste con los SSL² da una riqueza de matices

(¹) El nivel A en las tablas holandesas es un nivel que se considera seguro. Concentraciones por encima de este requieren, en principio, investigaciones posteriores.

(²) Estos se han determinado utilizando valores de defecto.

mucho mayor que el contraste un valor puntual: mientras que en el último caso lo único que se puede afirmar es que excede los valores de seguridad, la comparación con los SSL para estas vías permite establecer con claridad que tal concentración es segura para las vías de ingestión e inhalación y el problema se restringe al potencial de contaminación de aguas subterráneas.

Como contrapartida, se debe admitir que tales niveles se derivan en un escenario toxicológico de carácter limitado y, además, obliga a un mayor esfuerzo analítico durante la caracterización del emplazamiento. No obstante, es preciso enfatizar que, pese a las limitaciones impuestas por dicho escenario, éstos suponen un notable avance sobre otras metodologías por cuanto desde el primer momento las tareas de investigación se subordinan a la reducción del riesgo que es el objetivo último de estos esfuerzos. Respecto al incremento de los costes y considerando lo elemental de las determinaciones analíticas adicionales, éstos no suponen una cantidad apreciable en el conjunto de los trabajos de caracterización y, en cualquier caso, se ven

sobradamente justificados por la información que aportan.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer las sugerencias recibidas por parte del personal del *National Risk Management Laboratory* de la *U.S. EPA* en el que se encuentra como científico visitante. La financiación de la estancia se debe a la *Fundación Entorno* a la que, igualmente, desea mostrar su agradecimiento.

REFERENCIAS

KOFI ASANTE-DUAH, D. (1996). Management of contaminated site problems. 1996. Lewis Publisher.

MOLAK, V. (1996). Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management. CRC Press.

U.S. EPA. (1991). Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I Human Health Evaluation Manual. Part B.

U.S. EPA. (1996). Soil Screening Guidance.

Original recibido: Octubre 1997.

Original aceptado: Noviembre 1997.

EL HAZARD RANKING SYSTEM. UN SISTEMA PARA LA JERARQUIZACION DE ACTUACIONES EN TERRENOS CONTAMINADOS.

A. CALLABA DE ROA (*)

RESUMEN

Los costes económicos de las tareas de investigación y recuperación de suelos contaminados aconsejan una cuidadosa selección de aquellos terrenos que, en virtud de su peligrosidad, son realmente merecedores de estos trabajos (jerarquización de actuaciones). Los sistemas de jerarquización de actuaciones han demostrado servir como herramienta para la gestión de terrenos contaminados en distintos programas de investigación y recuperación de terrenos en los Estados Unidos. Se describen las características fundamentales del *Hazard Ranking System* (HRS) utilizado por la *U.S. EPA* en el programa *Superfund*. Se discuten las ventajas e inconvenientes de este sistema y se considera la conveniencia de desarrollar un sistema de estas características como herramienta para optimizar las actuaciones consideradas en el *Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados*.

Palabras clave: Suelos contaminados, Gestión de suelos contaminados, Jerarquización, Peligrosidad, *Hazard Rankig System*, *Superfund*.

ABSTRACT

To develop cost-effective risk minimization strategies, it is important to carefully select contaminated sites in which future tasks will take place (hierarchy of tasks). A hierarchy of sites must focus on those which really pose a significant environmental hazard. Hierarchical systems have demonstrated their performance as environmental management tools in some US programs facing risk management at contaminated sites. In this paper basic features of the *Hazard Ranking System*, developed by US EPA for *Superfund*, are described. Advantages and disadvantages are discussed and, finally, the suitability of a system similar to this is considered as a management tool for the Spanish *Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados*.

Key words: Contaminated sites, Management of contaminated sites, Hazard, *Hazard Ranking System*, *Superfund*.

1. INTRODUCCION

Es un hecho reconocido que en nuestro país existe un número no desdeñable de espacios contaminados que representan un problema real o potencial para la salud de la población que habita en sus proximidades y para la calidad de los recursos acuíferos y de otra naturaleza. La existencia de estos habría que buscarla tanto en una incorrecta gestión de residuos, e incluso materias primas, como en una inevitable casuística de accidentes.

Aunque con cierto retraso respecto al resto de

los países industrializados las autoridades ambientales españolas han abordado el problema articulando una respuesta racional, esto es: evaluando la magnitud del problema mediante la realización de sucesivos inventarios de suelos contaminados y elaborando un *Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (PNRSC)* que fue aprobado en 1995 [B.O.E, 1995].

El *PNRSC* tiene vigencia para el período 1995-2005 y en el mismo se fija el volumen de inversiones públicas a realizar en este campo. La dotación de este es de 70.000 Mpta, si bien a nadie se le oculta que esta cifra puede resultar un tanto cargada de voluntarismo teniendo en considera-

(*) Fundación Entorno/N.R.M.L. U.S. EPA

ción la existencia de otras demandas sociales que satisfacer con fondos públicos. Dejando de lado otro tipo de consideraciones, el fin último que se persigue con este Plan es reducir de modo significativo los efectos adversos derivados de la existencia de terrenos contaminados.

Resulta evidente que si se pretende administrar de modo prudente los recursos dedicados a estos menesteres, independientemente de la naturaleza pública o privada de estos, sacando al mismo tiempo el máximo partido (en términos de reducción significativa de efectos nocivos), se debe establecer una jerarquía de actuaciones modulando éstas de acuerdo con la gravedad de las situaciones. Se quiere indicar con ello que, si no se quiere caer en una situación en que se *gaste la pólvora en salvas*, encauzando adecuadamente las inversiones, es sumamente conveniente disponer de un procedimiento formal y estandarizado que permita hacer una evaluación inicial de la contaminación de terrenos a partir de la información de que actualmente se dispone. En este sentido, una de las primeras tareas a realizar en el marco del **PNRSC** sería desarrollar una herramienta de valoración de espacios contaminados que permita establecer un orden de prioridades de actuación fundamentado sobre una base científica.

La necesidad de contar con herramientas de esta naturaleza ha sido percibida en países con una mayor experiencia que el nuestro en la gestión de espacios contaminados. Un buen ejemplo es el de los Estados Unidos. En lo que sigue, se trata de dar unas breves pinceladas de como en este país se ha abordado el tema, en particular dentro del programa *Superfund*. De modo previo se harán una serie de consideraciones acerca de los requisitos que, al menos sobre el papel, debe reunir un sistema de jerarquización.

2. REQUISITOS DE UN SISTEMA DE JERARQUIZACION DE ACTUACIONES

La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos ha publicado recientemente un informe sobre sistemas de jerarquización de espacios contaminados en que se señala que estos deben reunir una serie de características técnicas

[**National Research Council, 1994**]. Entre las fundamentales, se señalan las siguientes:

- El sistema debe incorporar procedimientos para estimar información, ya sea ésta de naturaleza cuantitativa o cualitativa, en aquellos casos en que se carezca de ésta o bien la calidad de la misma sea dudosa.
- Debe ser aplicable a todo tipo de emplazamientos, independientemente del tipo de los contaminantes presentes en éstos e incluso de su naturaleza (vertederos de residuos, acumulaciones de contaminantes puros, penachos de aguas subterráneas contaminadas, etc).
- El sistema debe permitir incorporar información sobre un emplazamiento en la medida en que esta se vaya generando, teniendo efectos sobre el resultado final.
- Debe tener la capacidad de discriminar entre potencial de riesgo a corto y largo plazo.
- Debe incluir estimaciones de costes de tareas de mitigación/recuperación.

Si se considera con cierto detenimiento, estos requisitos que en principio parecen más orientados a salvar los aspectos formales del sistema, vienen a solventar situaciones que en la realidad surgen cuando se está valorando terrenos contaminados. Así, por poner un ejemplo, puede darse el caso que el coste de obtener información adicional sobre un emplazamiento sea superior a los propios costes de mitigación/recuperación en el caso en que éstos sean sencillos (p.e. excavación y traslado a depósito de seguridad de pequeños volúmenes de suelo contaminado, retirada selectiva de acumulaciones de residuos...). De especial interés en nuestro país es la posibilidad de contar con criterios de valoración por defecto, dada la existencia de notorias lagunas de información de carácter medioambiental.

3. EL HAZARD RANKING SYSTEM

En los Estados Unidos, tres son los organismos de ámbito federal que tienen competencia en la gestión de terrenos contaminados: Agencia de Protección del Medio Ambiente (*U.S. EPA*),

Ministerio de la Energía (*D.O.E*) y Ministerio de Defensa (*D.O.D*). Los tres han desarrollado separadamente sistemas de jerarquización como herramientas para la toma de decisiones. Los sistemas han sido denominados respectivamente:

- *Hazard Ranking System (HRS)*
- *Environmental Restoration Priority System (ERPS)*.
- *Defense Priority Model (DPM)*.

Adicionalmente, algunos estados han desarrollado sistemas propios para emplazamientos contaminados excluidos del programa *Superfund* como es el caso del *Ranking Method Scoring* del Departamento de Ecología del Estado de Washington [**Spencer, 1992**].

El HRS es, sin duda alguna, el más calibrado de los sistemas arriba mencionados y sobre sus características generales centraremos nuestra atención en lo que sigue, sin que ello quiera poner de manifiesto superioridad de ningún tipo sobre los otros mencionados.

Como ya se ha mencionado, dentro del programa *Superfund* la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos ha desarrollado un sistema de jerarquización de actuaciones que se conoce bajo la denominación de Hazard Ranking System (HRS). Este sistema, cuya existencia está regulada por la propia legislación *CERCLA* y posteriores, se enfoca básicamente hacia la toma de decisiones en materia de gestión de espacios contaminados [**U.S. Congress, 1980**].

Antes de entrar en ciertos detalles sobre la estructura y los elementos que en el mismo intervienen, conviene repasar de modo sumario el proceso *Superfund* en su conjunto para entender cabalmente el papel que este sistema juega en éste.

3.1. El proceso *Superfund*

En el proceso *Superfund* se diferencian dos grandes grupos de tareas o etapas. Por una parte aquellas encaminadas a evaluar la contaminación de terrenos contaminados o potencialmente

contaminados (extensión, magnitud y efectos) y, de otro lado, si así lo aconsejasen las circunstancias, en una segunda etapa se iniciarían estudios más detallados de caracterización, análisis de riesgos y recuperación. Al final de la segunda fase del proceso se sopesarían las alternativas de recuperación y se seleccionaría aquella con una mayor viabilidad técnica y económica poniéndose en práctica. Conviene hacer notar que los costes de investigación van creciendo de modo no lineal en la medida en que avanza el proceso. De ahí la importancia de contar con una técnica de filtro que oriente las actuaciones sobre objetivos no ficticios. En la **figura 1** se ha recogido un diagrama simplificado del proceso *Superfund*.

La etapa en la que se inscribe el HRS es la de evaluación. Es básicamente una etapa de investigación articulada en dos niveles de complejidad creciente: un primer nivel de evaluación preliminar (PA) y un segundo nivel más detallado de inspección del emplazamiento (SI)

La evaluación preliminar (PA) no va más allá de una recopilación y valoración de la información disponible sobre los emplazamientos potencialmente contaminados. No requiere ningún tipo de muestreo o análisis y los costes económicos de la misma resultan, por tanto, moderados. En esta etapa, la información es convenientemente organizada y, mediante la utilización de listas de comprobación, se detectan posibles hiatos. Una vez recopilada y organizada la información, el emplazamiento es puntuado de acuerdo con las reglas establecidas en el HRS si bien de modo informal. Si el resultado obtenido es inferior a 28.50, se asume que el mismo no requiere ningún tipo de acción o estudio posterior. Si la puntuación resultase mayor que esta cifra, entonces resulta obligado pasar a un nivel más detallado de estudio (SI). Como quiera que en la evaluación preliminar muchas de las variables que intervienen en el HRS son estimadas por defecto, un porcentaje importante de los terrenos estudiados puede sobrepasar ampliamente el límite de corte [**U.S. EPA, 1994**].

La inspección del emplazamiento (SI) ya implica una mejora de la información de que se dispone en el paso previo y en la misma se contempla la toma de un número limitado de muestras que permitan caracterizar con cierto detalle los resi-

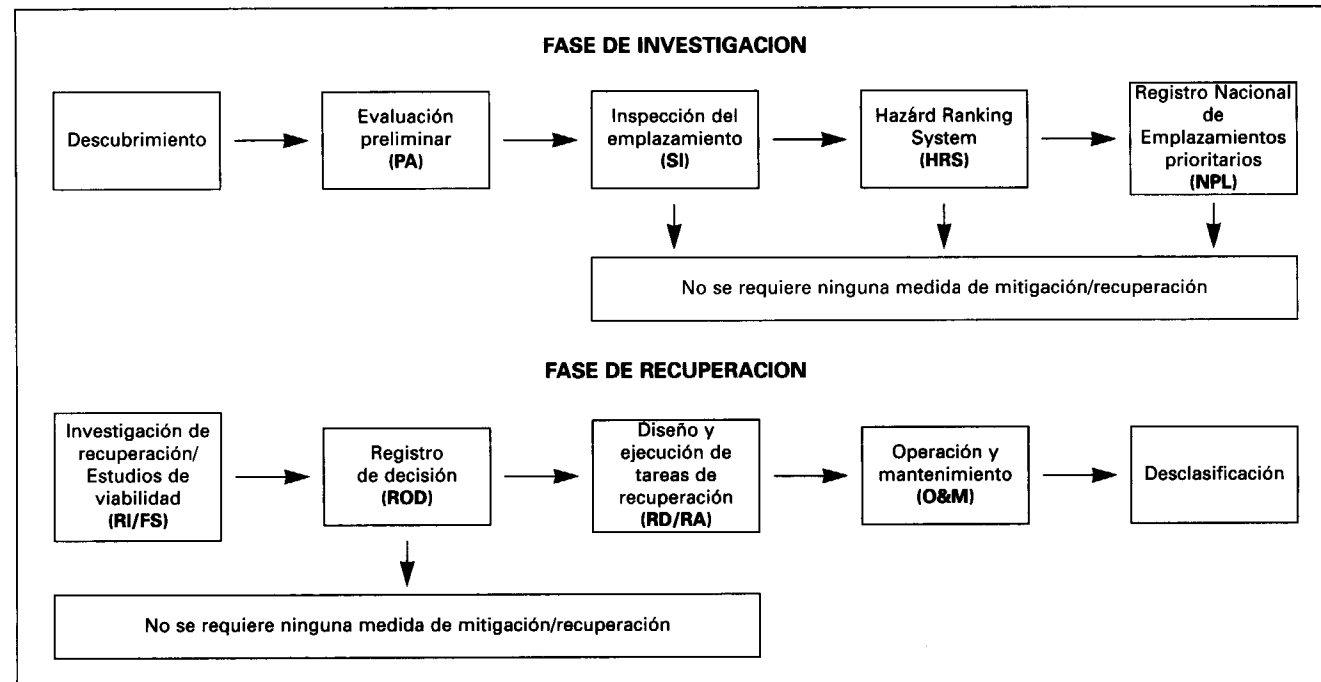


FIGURA 1. Etapas en el procedimiento Superfund

duos/contaminantes existentes, estimar la extensión de la contaminación determinar si ésta afecta o no a otros medios. En buena medida, en esta segunda aproximación uno de los objetivos prioritarios es rellenar las lagunas de información que se hubiesen detectado en la evaluación preliminar. Como fácilmente se puede concluir, los costes de estos trabajos son mayores que en el caso anterior pero todavía se pueden calificar de moderados.

Con los datos disponibles en este momento se vuelve a puntuar informalmente el emplazamiento por el HRS. Si su puntuación es inferior a 28.50, como en el caso anterior, se descartan actuaciones posteriores. Si el resultado fuese superior, ello conlleva la obligación de someterlo a un proceso formal y documentado de valoración mediante el HRS y, eventualmente, a su inclusión en un Registro Nacional de Prioridades (NPL).

De lo expuesto hasta este punto se puede apreciar que el HRS tiene una doble utilidad en el proceso Superfund. De una parte funciona como técnica filtro permitiendo centrar actuaciones posteriores más complejas sobre aquellas situaciones realmente merecedoras de las mismas y,

por otro lado, orienta las propias tareas de investigación.

3.2. Estructura y elementos

El HRS es un sistema estructurado de puntuación que permite valorar la peligrosidad de un emplazamiento asignando a este atributo un valor numérico en una escala arbitraria que va de 0 a 100. La idea que inspira este sistema de valoración, es que la peligrosidad no estriba tanto en la propia existencia del espacio contaminado como en la posibilidad de que la contaminación se extienda y alcance otros medios. De acuerdo con esto, se valoran las posibilidades de migración por distintas vías⁽¹⁾, las características y cantidades de contaminantes presentes en el emplazamiento y los potenciales receptores de la contaminación expresando estos atributos en forma de un factor: LR, WC y T respectivamente.

Aunque en su desarrollo en detalle es bastante complejo, la estructura general es relativamente

(¹) En el HRS se consideran las siguientes vías de migración/exposición: agua subterránea (gw), agua superficial (sw), aire (a) y suelo (s).

simple. En un paso previo se definen las fuentes de contaminación existentes. Posteriormente, para cada una de las rutas de exposición/migración se determina su valor numérico como resultado del producto de los factores arriba mencionado (S_{gw} , S_{sw} , S_a , S_s). Por último, se calcula el valor medio ponderado para el conjunto del emplazamiento (S), por medio de la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{S_{gw}^2 + S_{sw}^2 + S_s^2 + S_a^2}{4}}$$

En la figura 2 se ha representado esquemáticamente la estructura del HRS.

El cálculo de la puntuación para cada una de las vías presenta un número de peculiaridades cuya explicación requiere una extensión considerable. Sin embargo, sí merece la pena considerar en términos generales el significado de los factores de cálculo.

3.2.1. Definición de fuentes

La definición y delimitación de fuentes y de áreas

contaminadas es el punto de arranque del HRS. Se entiende como tal cualquier área donde un residuo o contaminante ha sido depositado, vertido o almacenado incluyendo además aquellos suelos que hayan sido contaminados por el contacto con residuos o contaminantes. El tipo de fuentes consideradas es lo suficientemente amplio para que prácticamente tengan cabida todas las posibles situaciones que es posible encontrar en un terreno contaminado (tanques aéreos, tanques enterrados, zonas excavadas y rellenas de residuos, vertederos, acumulaciones de residuos, balsas de almacenamiento de residuos líquidos....)

En el caso de que existiese más de una fuente, el sistema prevé la posibilidad de, bajo ciertas condiciones, agrupar las homólogas considerándolas como una sola a efectos de cálculo.

3.2.2. Probabilidad de migración (LR)

En la valoración de esta probabilidad es posible encontrar dos situaciones. En primer término se puede constatar la certeza en aquellos casos en que durante los trabajos de investigación inicia-

VIA DE MIGRACION/ EXPOSICION	LR	X	WC	X	T	/ 82500
AIRE (S _a)	- Observada - Potencial		- Toxicidad - Cantidad		- Individuo más próximo - Ecosistemas sensibles	
AGUA SUBTERRANEA (S _{gw})	- Observada - Potencial		- Toxicidad - Cantidad		- Pozo abast. más próximo - Recursos acuíferos	
AGUA DE SUPERFICIE (S _{sw})	- Observada - Potencial		- Toxicidad - Ecotoxicidad - Bioacumulación - Cantidad		- Población abastecida más próxima - Cadena trófica - Ecosistemas sensibles	
SUELO (S _s)	- Accesibilidad - Superficie		- Toxicidad - Cantidad		- Población residente - Ecosistemas sensibles	

FIGURA 2. Estructura del Hazard Ranking System

les se encontrasen evidencias empíricas que así lo indiquen (p.e. existencia observable de infiltraciones en el terreno, concentraciones de contaminantes anómalas en aguas subterráneas próximas...). Si tales evidencias no hubiesen sido apreciadas en los trabajos de investigación, habrá que estimar el potencial de migración. En este último caso la probabilidad es estimada a partir del producto de dos factores secundarios: factor de confinamiento y factor de medio de migración.

El primero de ellos hace referencia al modo en que se encuentran almacenados los residuos/contaminantes en el emplazamiento: tipo de almacenamiento (en depósitos subterráneos, en depósitos aéreos, directamente sobre un suelo sin impermeabilizar, en acopios con o sin cubierta impermeable...), existencia de barreras impermeables... etc.

El factor de medio de migración valora las condiciones que potencian o dificultan la misma. En la **tabla I** se ha recogido una relación no sistemática de ambos para las vías de agua subterránea, aire y agua superficial. Obviamente el suelo no es considerado pues la presencia de contaminantes en el mismo indica que tal migración no es potencial sino efectiva.

El factor de migración toma un valor máximo de 550 puntos en aquellos casos en que se haya constatado empíricamente y un valor que puede oscilar entre 0 y 500 cuando se hace una estimación del potencial de migración.

	FACTOR DE CONFINAMIENTO	FACTOR DE MEDIO
AGUAS SUPERFICIALES	Tipo de estructura de confinamiento Existencia y estado de superficies de techado Existencia de red de recogida de lixiviados Barreras físicas alrededor de las fuentes (p.e bermas)	Frecuencia de avenidas Escorrentía Distancia a masas de agua
AGUAS SUBTERRANEAS	Presencia de líquidos en fase libre Tipo de estructura de confinamiento existencia de impermeabilizaciones de fondo	Precipitación neta Profundidad del acuífero Tiempo de viaje en zona no saturada
AIRE	Existencia de cobertura Existencia de vegetación	Temperatura Presión de vapor Tamaño de grano

TABLA I. Variables consideradas para la estimación de las probabilidades de migración.

3.2.3. Características y cantidades de residuos/contaminantes (WC)

Este factor evalúa conjuntamente tanto las cantidades de residuos/contaminantes como la peligrosidad intrínseca de los mismos (valorada en términos de toxicidad). La expresión general para determinar el valor de este factor es:

WC: cantidad de residuo x toxicidad

La determinación del valor asignado a la cantidad de residuo se puede hacer, en función de la calidad y grado de precisión de la información disponible, de varias maneras. En el caso más favorable se dispondrá tanto de los volúmenes de residuos de cada una de las fuentes como de la concentración media de sustancias contaminantes en los mismos; en este caso bastará multiplicar ambos valores para obtener la masa de los distintos contaminantes presentes. Si se careciera de tal información, este factor puede ser alternativamente determinado a partir del volumen de residuos e incluso a partir de la superficie ocupada por los mismos. En definitiva la cantidad de sustancia puede valorarse alternativamente de las siguientes maneras: en unidades de masa de compuesto puro, en unidades de volúmenes de residuo, en unidades de superficie de residuo/suelo contaminado. En el extremo, para aquellos casos en que la falta de información sea total, el propio sistema provee de valores de defecto para asignar puntuaciones a este factor.

La toxicidad de las sustancias se determina a partir del producto de dosis de referencia (RfD) para compuestos con efectos crónicos, del factor de pendiente para compuestos carcinogénicos o de toxicidad aguda (LD₅₀) por varias vías (dérmica, oral, inhalación) multiplicado por el factor de movilidad². La información relativa a la toxicidad y movilidad de las sustancias contaminantes contempladas en la legislación **CERCLA** se encuentra contenida en la **Superfund Chemical Data Matrix** a la que se accede, entre otros modos, a través del CAS de un compuesto [U.S. EPA, 1996]. En la **tabla II** se ha presentado el valor que se le asignaría a la toxicidad para el caso de compuestos de efectos crónicos.

En el caso de que existiesen varios compuestos, para el cálculo final tan sólo se considerará aquel que presente una mayor toxicidad

RfD	Valor asignado
< 0.0005	10000
0.0005 - 0.005	1000
0.005 - 0.05	100
0.05 - 0.5	10
> 0.5	1

TABLA II. Valores de puntuación para toxicidad

3.2.4. Características de los receptores (T)

Ya se ha mencionado el hecho de que, desde la perspectiva del HRS, la valoración *per se* de la contaminación de los terrenos, en términos del peligro ambiental que esta representa, no tiene mucha razón de ser. El peligro ambiental, potencial o real, cobra valor cuando es ejercido sobre receptores concretos. La naturaleza de los mismos es muy amplia abarcando desde las personas directamente expuestas por una u otra vía hasta ecosistemas singulares pasando por pozos

(²) En el caso de la vía agua superficial la movilidad es sustituida por el factor de persistencia y bioacumulación.

de abastecimiento que pudieran actuar como vector de la contaminación. Partiendo de esta premisa, en el HRS se ha establecido un mecanismo para valorar cuantitativamente el valor del factor receptores. Lógicamente, este factor debe guardar cierta proporcionalidad con la densidad de receptores en el área de influencia. Es necesario por tanto acotar espacialmente el ámbito en que el peligro se ejerce de modo efectivo de manera que sea posible inventariar los receptores incluidos en el mismo. Este extremo se verifica estableciendo los denominados **Target Distance Limit (TDL)** que sirven para fijar los límites del área de influencia. Estos límites varían según la ruta de exposición que se considere y para su determinación el HRS provee de reglas precisas.

Los receptores considerados en este sistema se agrupan, para cada una de las vías de migración, en las siguientes categorías:

- población
- recursos
- ecosistemas singulares

Adicionalmente, para cada una de las categorías se define el individuo más próximo (más expuesto) que será igualmente tenido en cuenta en la determinación del valor de este factor.

Una enumeración no exhaustiva de los receptores considerados para cada una de las vías se recoge en la **tabla III**. Se debe señalar que en este

VIA DE EXPOSICION	PRINCIPALES RECEPTORES CONSIDERADOS
AGUA SUBTERRANEA	- manantiales y surgencias - pozos de agua de abastecimiento regular - pozos de agua de abastecimiento de emergencia - formaciones acuíferas - número de habitantes expuestos por esta vía
AGUA DE SUPERFICIE	- cursos de agua con un caudal inferior a 100 pies ³ /s - zonas de pesca - captaciones de abastecimiento - ecosistemas acuáticos singulares - número de habitantes expuestos por esta vía
SUELO	- población residente en un radio de 200 pies - ecosistemas terrestres singulares
AIRE	- población residente en un radio de 1/4 de milla - ecosistemas singulares

TABLA III. Receptores para distintas vías de exposición/migración.

sistema existen reglas precisas para la asignación de puntuaciones a estos receptores así como para la elección de aquellos que finalmente deben considerarse. El valor que finalmente se le asigne a este factor dependerá en última instancia de la abundancia y calidad de receptores existentes dentro de los límites del área de influencia (TDL) para cada una de las vías.

4. DISCUSION

El HRS, como todo sistema de evaluación, tiene aspectos criticables y notorias bondades intrínsecas. Las críticas de que ha sido objeto se han centrado principalmente en sus limitaciones como herramienta para la gestión del riesgo [National Research Council, 1992]. En este sentido particularmente se critican dos aspectos:

- la imposibilidad de incorporar los costes de recuperación/mitigación como factor añadido de cálculo en su estructura. Contrariamente a otros sistemas existentes (p.e. ERPS).
- la no distinción entre peligro a corto y largo plazo.

Igualmente, se deben reconocer en este algunas bondades que, no por obvias son por ello menos importantes:

- es una herramienta formal y estándar de valoración del peligro ambiental que reduce sensiblemente el margen de subjetividad en la toma de decisiones.
- permite la valoración de todo tipo de emplazamientos independientemente de la naturaleza de los residuos y sustancias contaminantes que se encuentren en el mismo.
- su ámbito de aplicación no se restringe a condiciones geográficas o geológicas determinadas. Prueba de ello es que ha sido aplicado en un país con dimensiones continentales.

Actualmente en nuestro país, a excepción de algunas actuaciones de manifiesta emergencia, estamos aun en los inicios del programa, de modo que de lo que se dispone es de los datos

recopilados en los inventarios realizados tanto por el Ministerio del Medio Ambiente como por instituciones de algunos gobiernos regionales. En una secuencia lógica la siguiente etapa se centraría en el estudio detallado de aquellos emplazamientos que presenten mayor peligrosidad. Sería por tanto particularmente oportuno establecer un sistema de jerarquización de estas características que permita enfocar correctamente las siguientes etapas.

Por otra parte, no hay que olvidar la componente económica. En este sentido la evidencia de los datos disponibles sobre los costes medios de cada una de las etapas de investigación, refuerzan la idea de contar con una herramienta que, de modo objetivo, determine qué terrenos son merecedores de inversiones tan cuantiosas. En la **tabla IV**, se han recogido los costes medios por

ETAPA	Estados Unidos	Países Bajos
Evaluación preliminar	7.000	3.400
Inspección del emplazamiento	25.000 - 100.000	280.000
Investigación de recuperación/ Estudios de viabilidad	1.000.000	325.000
Diseño de recuperación	1.000.000	
Ejecución de recuperación	10.000.000	2.800.000
Operación y mantenimiento/año	345.000	460.000

TABLA IV. Costes económicos de las distintas tareas de investigación/recuperación de suelos contaminados.

emplazamiento para cada una de las sucesivas etapas en el proceso de investigación/recuperación tanto en los Estados Unidos como en los Países Bajos [U.S. EPA, 1992] y [Fedler, 1997].

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer las sugerencias recibidas por parte del personal del **National Risk Management Laboratory** de la **U.S. EPA** en el que se encuentra como científico visitante. La financiación de la estancia se debe a la **Fundación Entorno** a la que, igualmente, desea mostrar su agradecimiento.

REFERENCIAS

FEDLER, L. Com. personal. [8]

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE. (1995). Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados.(B.O.E. 14-02-95).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1994). Ranking Hazardous-Wastes Sites For remedial Action. National Academy Press.

SPENCER, M.J. (1992). Site Hazard Assessment Guidance and

Procedures for Washington Ranking Method. Washington State Department of Ecology.

UNITED STATES CONGRESS. (1980). Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (CERCLA).

U.S. EPA. (1992). Reclamation and Redevelopment of Contaminated Land.

U.S. EPA. (1994). Hazard Ranking System Training Course.

U.S. EPA. (1996). Superfund Chemical Data Matrix.

Original recibido: Octubre 1997.

Original aceptado: Noviembre 1997.

ANÁLISIS PETROESTRUCTURAL DE LAS PERIDOTITAS ASOCIADAS A LA ZONA DE MOVIMIENTO TECTÓNICO DE CARREIRO (COMPLEJO DE CABO ORTEGAL, NO DE ESPAÑA).

Por B. ABALOS (*), J. I. GIL IBARGUCHI (**), y J. AZCARRAGA (*)

RESUMEN

Se realiza un estudio petroestructural de varios afloramientos de metaperidotitas incluidos como "boudins" en el seno de grandes zonas de cizalla dúctil en la porción occidental del Complejo de Cabo Ortegál. Las metaperidotitas contienen asociaciones minerales características de un metamorfismo de alta a ultra-alta presión y microestructuras de origen tectónico desarrolladas bajo condiciones de temperatura elevadas (por encima de 800 °C). El estudio micro y petroestructural de olivino y ortopiroxeno en estas rocas permite reconocer la presencia de fábricas originadas por flujo viscoso a temperaturas elevadas (> 1200 °C) y por flujo plástico en estado sólido (800-900 °C). Este último condiciona la recristalización dinámica del olivino y la formación de orientaciones cristalográficas moderada a fuertemente orientadas según pseudoguirnalda y/o máximos puntuales dispuestos oblicuamente con respecto a los referenciales estructurales, foliación y lineación. Estas estructuras se habrían formado como resultado de un régimen de deformación con componentes rotacionales bajo esfuerzos diferenciales bajos (4-20 MPa) a moderados (30-50 MPa) y tasas de deformación convencionales para la deformación en el manto superior (10^{-11} - 10^{-13} s⁻¹) y la corteza profunda (10^{-12} - 10^{-15} s⁻¹), respectivamente. Los resultados aquí presentados apoyan la hipótesis según la cual el régimen de esfuerzos bajos (0-20 MPa) sería el imperante en la deformación plástica de los niveles más profundos de la corteza continental e incluso a profundidades por debajo del Moho en los ambientes de convergencia litosférica.

Palabras clave: Peridotitas, Microestructura, Petrofábrica, Reología, Cabo Ortegál, España.

ABSTRACT

A petrostructural study is presented on various metaperidotite outcrops which appear as "boudins" within large ductile shear zones from the westernmost Cabo Ortegál allochthonous complex. The metaperidotites contain mineral assemblages that equilibrated under high- to ultra-high-pressure metamorphic conditions as well as microstructures of tectonic origin formed under temperatures well above 800 °C. The micro- and petrostructural study of olivine and orthopyroxene in these rocks enables us to recognize both fabrics formed by viscous flow at high temperature (> 1200 °C) and fabrics formed by solid-state plastic flow at lower temperatures (800-900 °C). Solid-state flow induced olivine dynamic recrystallization and formation of moderate to strong lattice preferred orientations along pseudoguides and/or point maxima oblique to the structural reference framework foliation and lineation. These structures would have formed as a result of non-coaxial deformation regimes under low (4-20 MPa) to moderate (30-50 MPa) paleopiezometrically calculated differential stresses and strain rates characteristic of upper mantle (10^{-11} - 10^{-13} s⁻¹) and deep crustal deformations (10^{-12} - 10^{-15} s⁻¹), respectively. The results presented herein are in support of the hypothesis which suggests that the low stress deformation regime (0-20 MPa) dominates plastic deformation in the deep continental crust and even at depths below the Moho in lithospheric convergence realms.

Key words: Peridotite, Microstructure, Petrofabric, Rheology, Cabo Ortegál, Spain.

1. INTRODUCCION

Las rocas ultramáficas que afloran en diversas posiciones estructurales dentro del Complejo de

Cabo Ortegál (Fig. 1) han sido estudiadas desde múltiples perspectivas que incluyen sus rasgos petrográficos y estructurales esenciales (VOGEL, 1967; MAASKANT, 1970), su estructura interna y fábrica (BEN JAMAA, 1988; GIRARDEAU y GIL IBARGUCHI, 1991) y sus características geoquímicas y geocronológicas (GRAVESTOCK, 1992; SANTOS ZALDUEGUI et al., 1996). La mayor

(*) Dpto. de Geodinámica.

(**) Dpto. de Mineralogía y Petrología. Universidad del País Vasco. Apdo. 644, 48080 Bilbao.

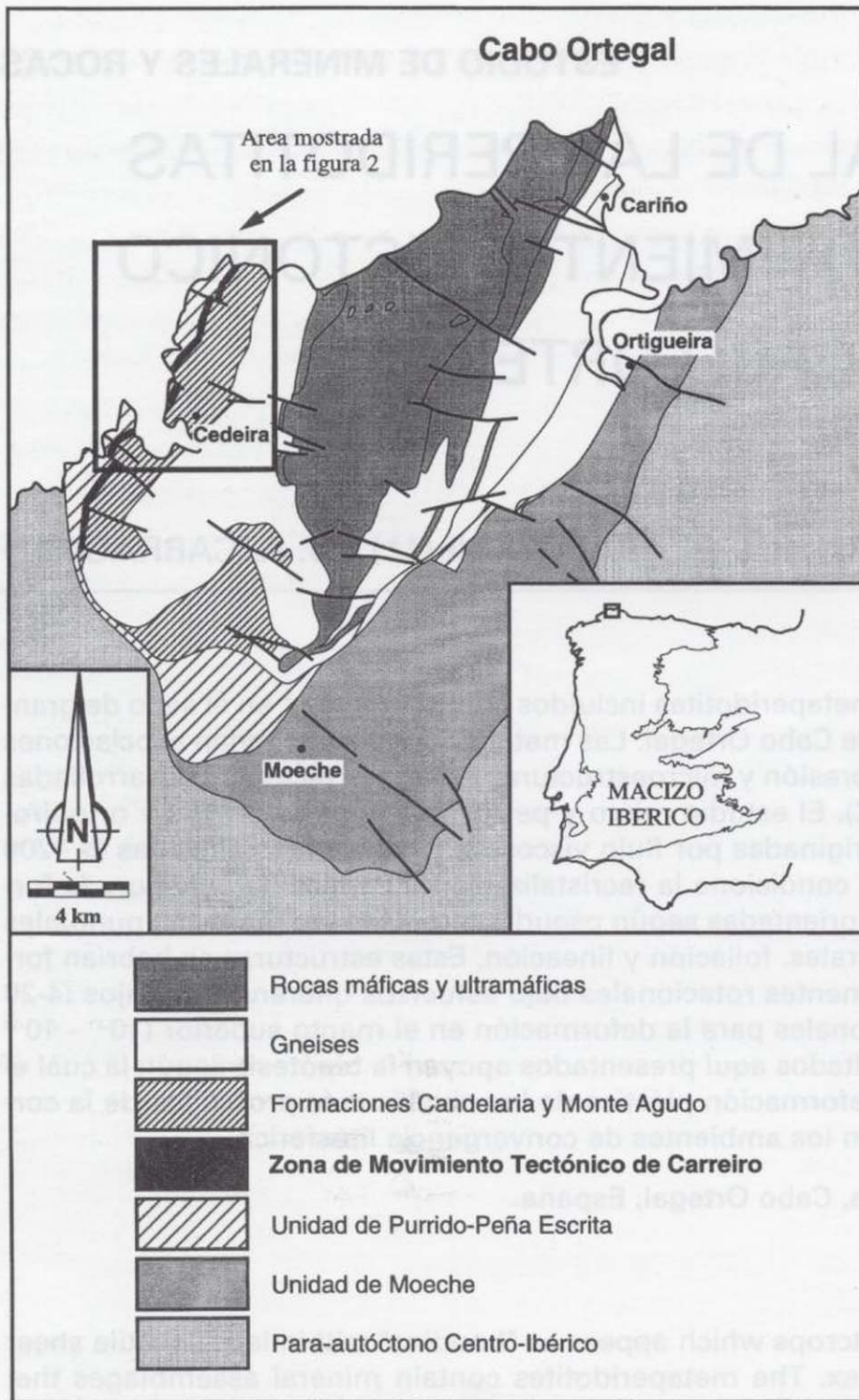


Figura 1.- Mapa geológico simplificado del complejo de Cabo Ortegal.

parte de estos estudios se ha centrado en los macizos peridotíticos de Limo, Herbeira y Uzal, que constituyen unidades de varios centenares de metros de espesor con afloramientos de varios km² de superficie. Estos macizos, así mismo, ocupan la posición estructural más alta dentro del apilamiento de unidades metamórficas de grado alto y alta presión que constituyen los alóctonos superiores del Complejo de Cabo Ortegal (Fig. 1; cf. ARENAS et al., 1986).

Otros afloramientos de rocas ultramáficas dentro del conjunto alóctono superior antedicho se encuentran en la mitad occidental del complejo. Se trata de unidades de dimensiones mucho

menores incluidas en forma de bloques o "boudins" en el seno de grandes zonas de cizalla dúctil o a favor del contacto entre unidades metamórficas. Dentro de este grupo se encuentran los afloramientos de serpentinitas (desde métricos/decamétricos hasta de 200-300 m de espesor y 2-3 km de desarrollo lateral) y ocasionalmente de peridotitas poco retrogradadas ("boudins" de tamaño decamétrico a decimétrico objeto de este estudio) que aparecen en diversos niveles estructurales dentro de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (Fig. 2), así como los esca-

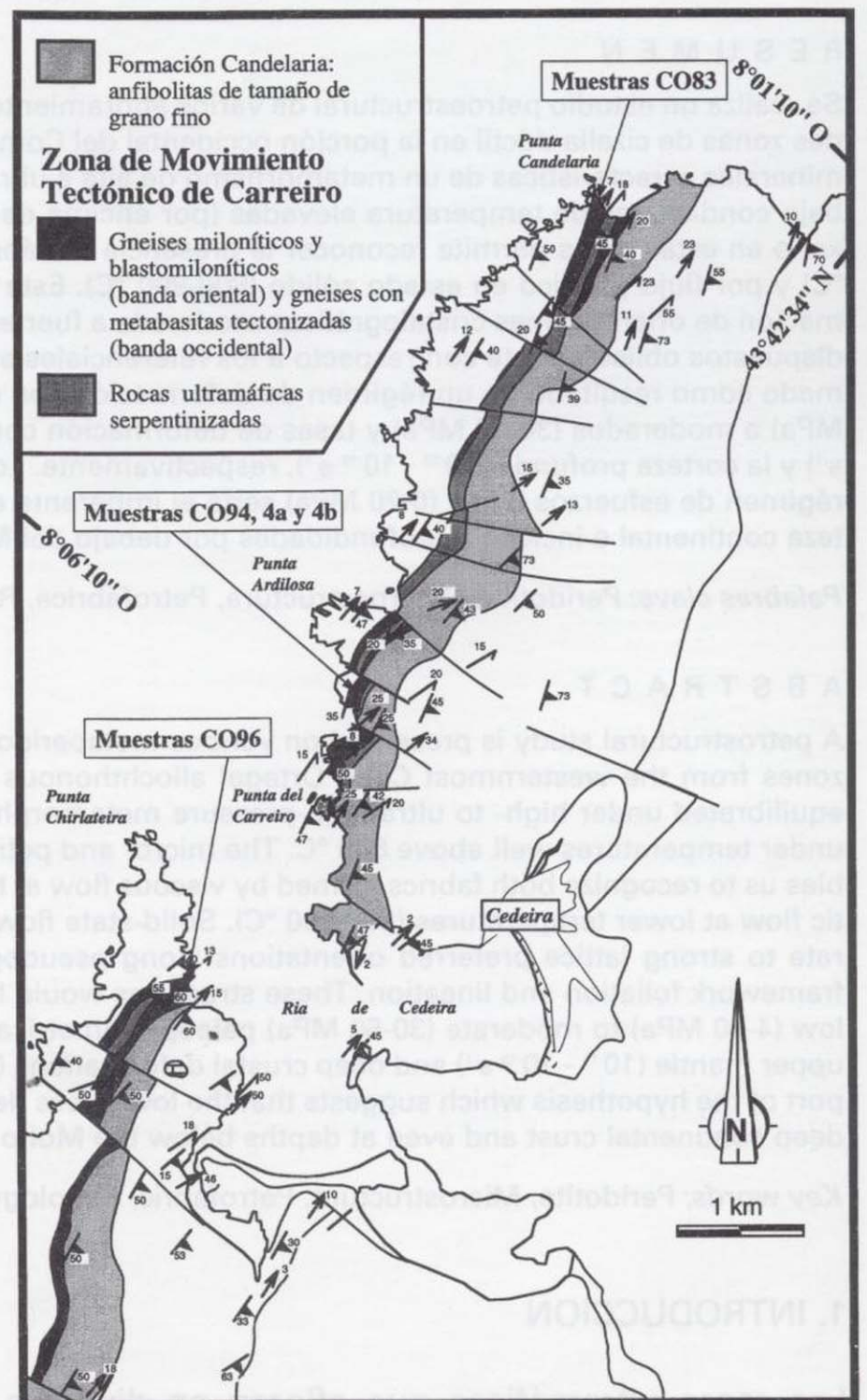


Figura 2.- Mapa geológico de la porción occidental del complejo de Cabo Ortegal mostrando las áreas de afloramiento de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro y de las unidades relacionadas junto con la localización de las muestras estudiadas.

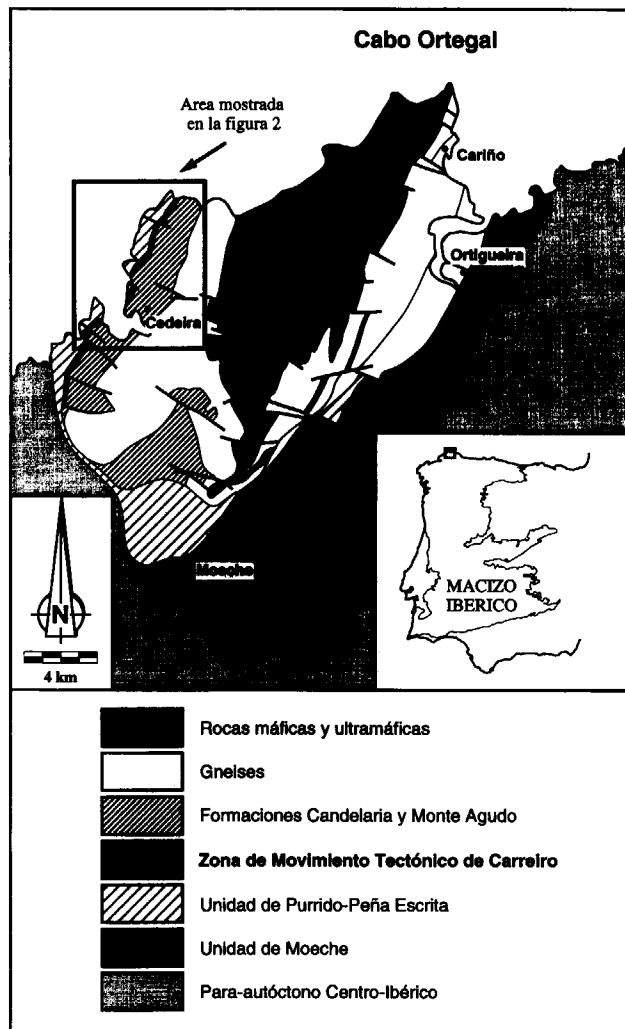


Figura 1.- Mapa geológico simplificado del complejo de Cabo Ortegal.

parte de estos estudios se ha centrado en los macizos peridotíticos de Limo, Herbeira y Uzal, que constituyen unidades de varios centenares de metros de espesor con afloramientos de varios km² de superficie. Estos macizos, así mismo, ocupan la posición estructural más alta dentro del apilamiento de unidades metamórficas de grado alto y alta presión que constituyen los alóctonos superiores del Complejo de Cabo Ortegal (Fig. 1; cf. ARENAS et al., 1986).

Otros afloramientos de rocas ultramáficas dentro del conjunto alóctono superior antedicho se encuentran en la mitad occidental del complejo. Se trata de unidades de dimensiones mucho

menores incluidas en forma de bloques o "boudins" en el seno de grandes zonas de cizalla dúctil o a favor del contacto entre unidades metamórficas. Dentro de este grupo se encuentran los afloramientos de serpentinitas (desde métricos/decamétricos hasta de 200-300 m de espesor y 2-3 km de desarrollo lateral) y ocasionalmente de peridotitas poco retrogradadas ("boudins" de tamaño decamétrico a decimétrico objeto de este estudio) que aparecen en diversos niveles estructurales dentro de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (Fig. 2), así como los esca-

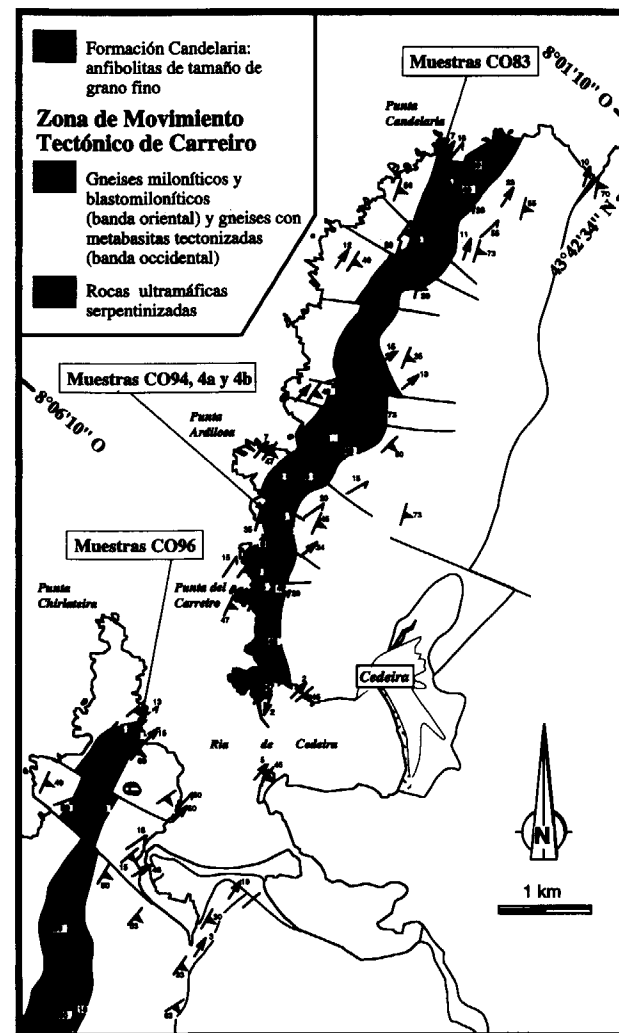


Figura 2.- Mapa geológico de la porción occidental del complejo de Cabo Ortegal mostrando las áreas de afloramiento de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro y de las unidades relacionadas junto con la localización de las muestras estudiadas.

los afloramientos existentes entre las Anfibolitas de Candelaria y los Gneises de Chimparra en la zona de Punta Torroiba (VOGEL, 1967; MAASKANT, 1970).

Los datos previos sobre petrología y estructura de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (AZCARRAGA et al., 1995) así como el descubrimiento reciente entre los "boudins" de metaperidotitas (y de eclogitas) de asociaciones minerales indicativas de metamorfismo de muy alta o ultra-alta presión (GIL IBARGUCHI et al., in press) refuerzan su carácter exótico. Al mismo tiempo, el estudio de estas rocas y su contexto presenta un enorme interés desde tres perspectivas: (1) desde el punto de vista del estudio de los rasgos geodinámicos de las fases tempranas de la subducción/colisión hercínicas en el NO peninsular, (2) para el progreso del conocimiento de los regímenes de la deformación operantes en zonas profundas de la corteza y en el manto superior, y (3) para avanzar en el conocimiento de los mecanismos de exhumación de unidades rocosas desde profundidades en torno a 100 km (SCHREYER, 1995).

2. CARACTERÍSTICAS PETROESTRUCTURALES DE LAS METAPERIDOTITAS

Se han estudiado varias muestras de peridotitas escasamente serpentinizadas asociadas a la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (ZMTC; Fig. 2). Estas proceden: (1) de "boudins" decamétricos que afloran en el contacto basal de la ZMTC con las Anfibolitas de Purrido en la zona de Punta Chirlateira, al Sur de la bahía de Cedeira (muestras CO96), o bien en una posición estructural similar pero en la zona de Punta Candelaria (muestras CO83), y (2) de boudins decimétricos en el seno de los gneises blastomiloníticos (afines petrográficamente a los Gneises de Chimparra) que aparecen dentro de la ZMTC al NO de Cedeira (muestras CO94, 4a y 4b).

2.1. Microestructura

Las muestras CO83 y CO96 son ortopiroxenitas con olivino intersticial (Fig. 3). En algunos casos (muestras CO83) se han reconocido minerales como titanoclinohumita y magnesita en equili-

brio textural con olivino y ortopiroxeno. Esta asociación es indicativa de condiciones de presión muy alta a ultra-alta (superior a 2.5 GPa) durante la cristalización de estas rocas (ENGI y LINDSLEY, 1980; OGASAWARA et al., 1995). Su microestructura está definida por un armazón de cristales tabulares e idiomórficos de ortopiroxeno (más del 80-90 % modal) de hasta 2-3 cm de longitud y varios mm de anchura. La ligera orientación sub-paralela de estos cristales tiende a definir una débil foliación de forma ("shape preferred orientation", SPO). En algunas de las muestras estudiadas el ortopiroxeno carece de cualquier signo de deformación en estado sólido, mientras que en otras se pueden reconocer extinción ondulante, maclas de deformación, suaves curvaturas de los planos de exfoliación, e incluso una incipiente fracturación de los cristales según los citados planos cristalográficos. En los espacios irregulares creados entre el armazón de ortopiroxeno se encuentran agregados policristalinos de olivino intersticial aparentemente sin signos de deformación plástica en estado sólido (ausencia de extinción ondulante). Todas estas características microtexturales parecen indicar que la estructura de estas rocas (débil foliación de forma) es de origen magmático, posiblemente originada por flujo viscoso bajo condiciones de temperatura elevadas durante las fases tempranas de su cristalización.

Las muestras CO94, 4a y 4b son metaharzburgitas, todas ellas con una textura similar (Figs. 4 y 5). Predomina en ellas el olivino, conteniendo cantidades menores de ortopiroxeno (10-20 % modal) y espinela. Las muestras CO94 (Fig. 4) contienen además proporciones reducidas de minerales de significación petrogenética importante tales como clinopiroxeno y granate. Las muestras 4a y 4b (Fig. 5) corresponden a tectonitas caracterizadas por mostrar una microestructura secundaria orientada, porfiroclástica a granuloblástica según la terminología de HARTE (1977), con porfiroclastos de olivino principalmente (de hasta 2.5 mm de longitud y 1 de anchura) y una matriz formada por neoblastos de olivino y espinela de tamaños comprendidos entre 100 y 200 μ m. En secciones delgadas cortadas paralelamente a la foliación macroscópica (dirección estructural XY) se observa cómo la orientación ligeramente alargada de porfiroclastos (con una relación axial de entre 2:1 y 3:1) y

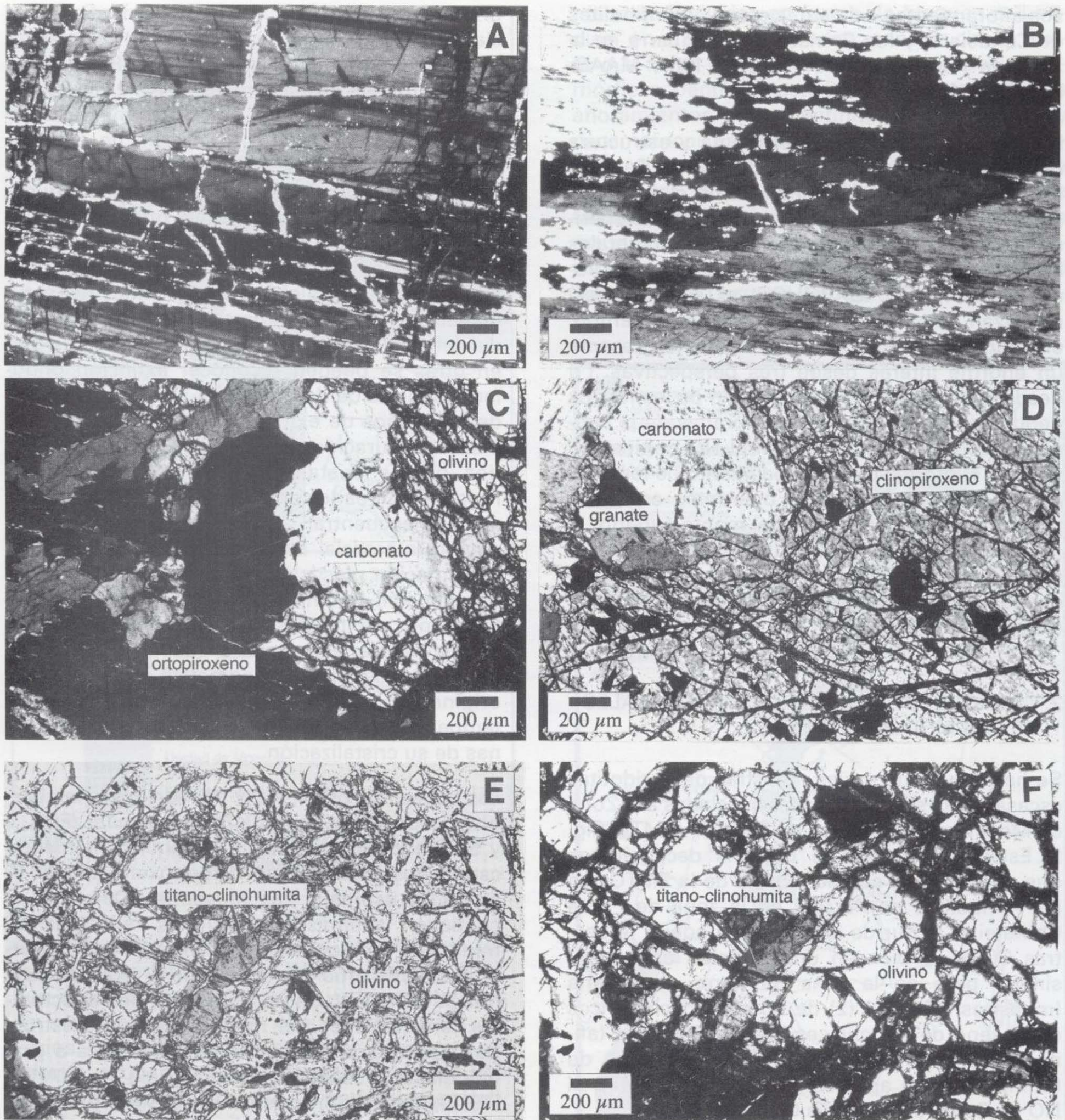


Figura 3.- Microestructuras deformacionales y asociaciones minerales de alta y ultra-alta presión reconocidas en las ortopiroxenitas (muestras CO83 y CO96). Microestructuras de deformación plástica observadas en los megacristales de ortopiroxeno: A) aspecto de una porción de cristal de ortopiroxeno mostrando maclas de deformación y extinción ondulante; B) id. mostrando la presencia de subgranos. Asociaciones características mostradas por los minerales intersticiales: C) asociación olivino-ortopiroxeno-carbonato en equilibrio textural; D) asociación granate-clinopiroxeno-carbonato; E) aspecto con luz polarizada de una inclusión de titanoclinohumita en el interior de un cristal de olivino; F) aspecto de la inclusión de titanoclinohumita anterior. Todas las microfotografías exceptuando la E fueron tomadas con nicóles cruzados.

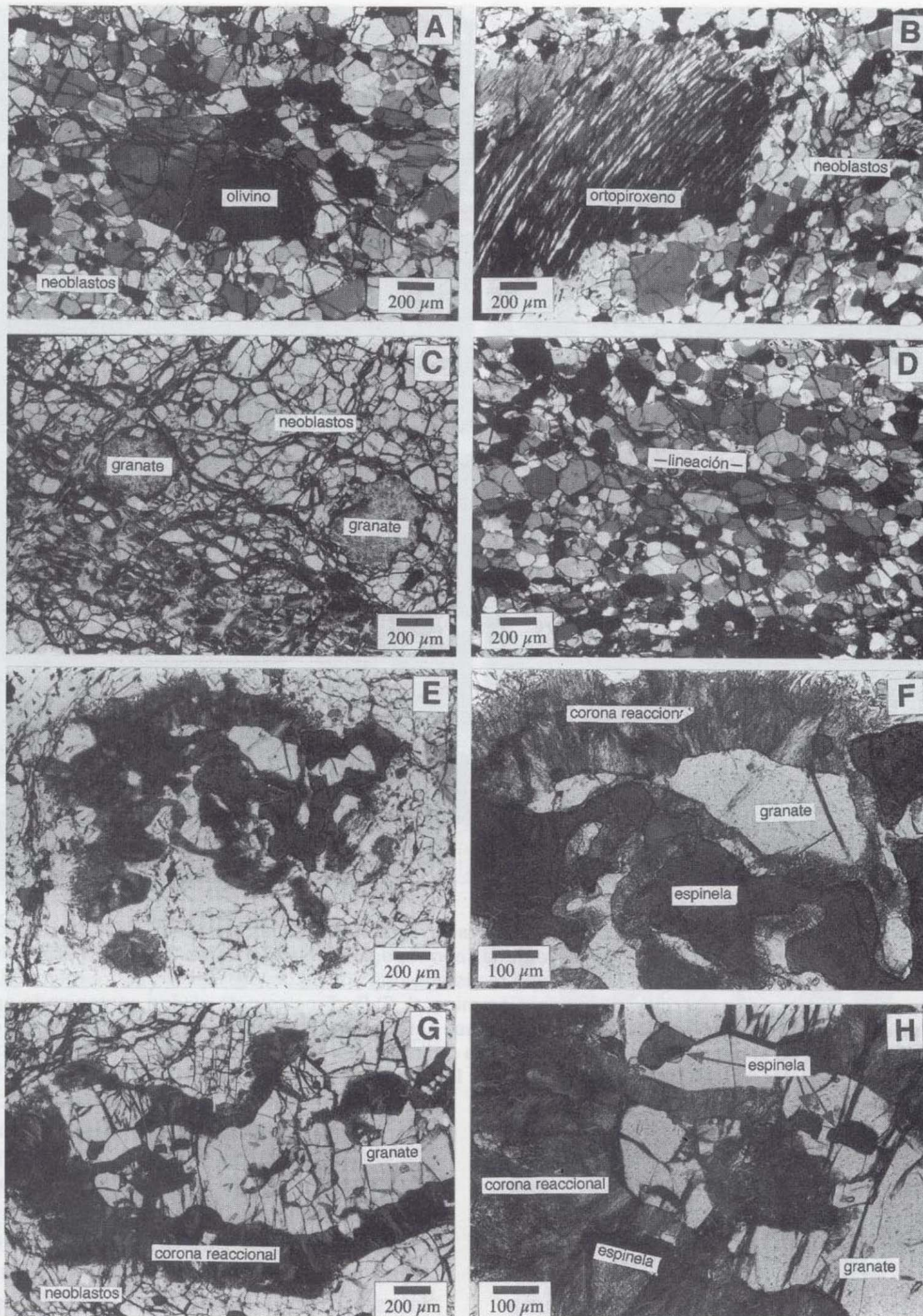


Figura 4.- Microestructuras deformacionales y asociaciones minerales reconocidas en las metaperidotitas con microestructuras porfiroclástica y milonítica (muestras CO94). A) Porfiroclasto de olivino con signos de deformación plástica intracristalina (extinción ondulante) y testimonios de una fase anterior de recristalización (denotada por la presencia de inclusiones de espinela) bajo condiciones de temperatura más elevada. B) Porfiroclasto de ortopiroxeno deformado plásticamente (nótese la curvatura de las maclas de deformación y la presencia de extinción ondulante). C) Porfiroclastos de granate rodeados por la matriz de olivino recristalizada dinámicamente. D) Aspecto de la matriz recristalizada en una sección paralela a la foliación en la que se observan neoblastos de olivino y espinela definiendo una ligera lineación mineral. E) Agregado porfiroclástico de granate, espinela y clinopiroxeno rodeado por una corona de reacción que lo separa de la matriz recristalizada. F) Detalle de la microfotografía anterior en el que se aprecia la existencia de una textura de desequilibrio mineral denotada por la presencia de una corona reaccional que separa granate y espinela. G) Agregado porfiroclástico formado por granate, ortopiroxeno y espinela rodeado por una corona reaccional que lo separa de la matriz recristalizada. H) Detalle de la fotografía anterior en el que se puede apreciar la existencia de pequeños granos de espinela en el interior del granate. Las microfotografías A, B y D fueron tomadas con nicols cruzados, las restantes con luz polarizada normal.

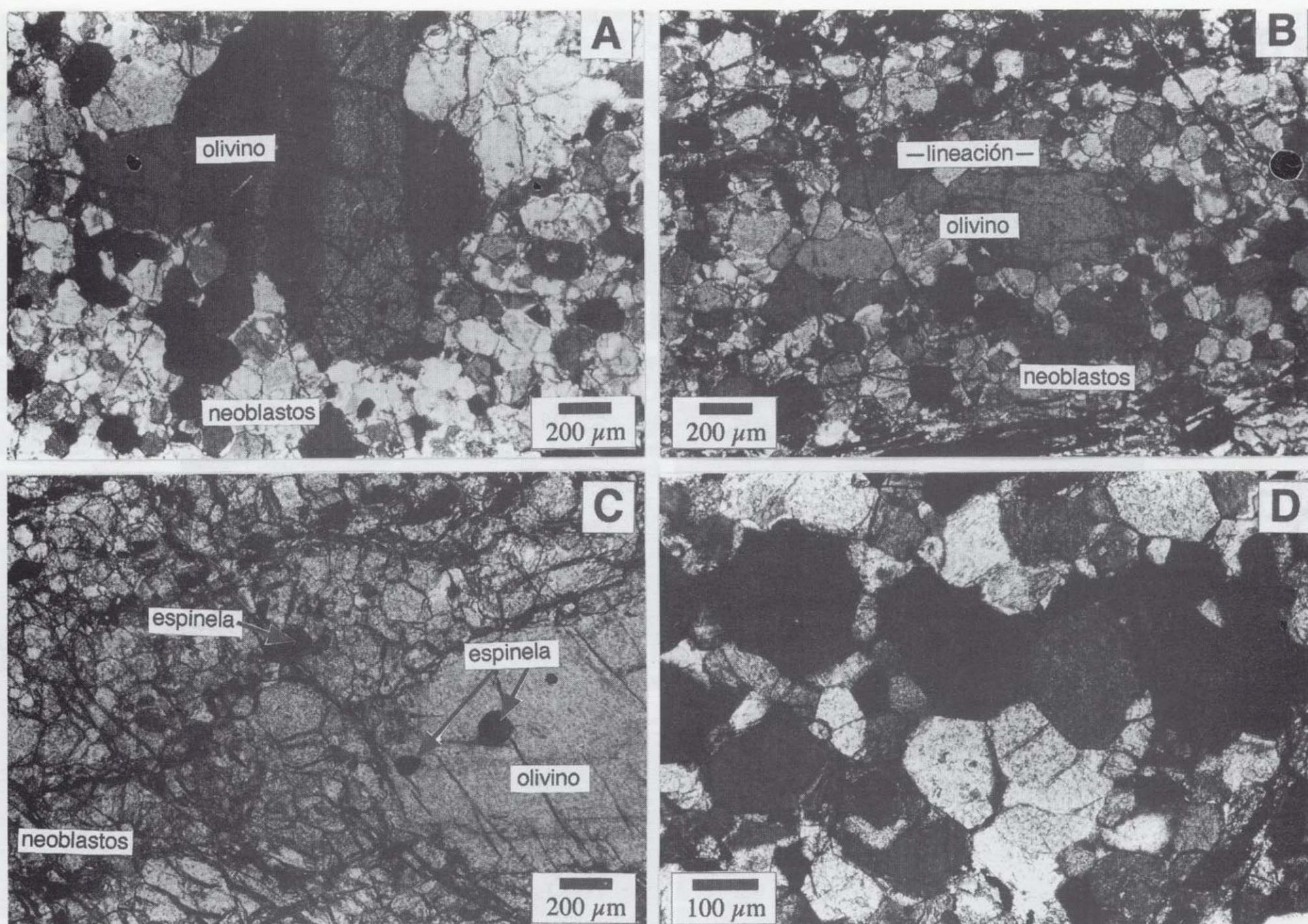


Figura 5.- Microestructuras deformacionales y asociaciones minerales reconocidas en las metaperidotitas con microestructuras porfiroclástica y milonítica (muestras 4a). Todas las microfotografías corresponden a secciones paralelas a la foliación (secciones XY). A) Porfiroclasto de olivino con extinción ondulante y granos recrystalizados en sus bordes (textura "core-mantle"). B) Porfiroclasto de olivino alargado paralelamente a la dirección de la lineación mineral. C) Porfiroclasto de olivino conteniendo en su interior granos redondeados de espinela. Esta microestructura denota una fase anterior de recrystalización dinámica bajo condiciones de temperatura elevadas. D) Aspecto de la microestructura recrystalizada mostrada por los neoblastos de olivino, espinela y ortopiroxeno de la matriz. Las microfotografías A, B y D fueron tomadas con nicóles cruzados.

neoblastos (relación axial igual o menor que 1.5:1) define una lineación mineral (dirección X del referencial estructural).

En las muestras CO-94 se ha reconocido una microestructura relicta del tipo granuloblástico de tamaño grueso (Fig. 4), con: (1) agregados policristalinos de clinopiroxeno, ortopiroxeno, granate y olivino en los que ocasionalmente se observa espinela, y (2) cristales aislados de olivino y ortopiroxeno de 750 µm rodeados por una matriz recrystalizada de tamaño mucho menor (100-200 µm). En secciones orientadas de las

metaharzburgitas los porfiroclastos de olivino muestran con frecuencia (aunque no siempre) signos de deformación plástica en estado sólido tales como extinción ondulante, subjuntas paralelas y granos nuevos en los bordes, confiriendo al sistema en este último caso una microestructura de manto recrystalizado. Los neoblastos de olivino que rodean a los porfiroclastos son generalmente del mismo tamaño y hábito que los neoblastos de la matriz (170 µm como media). No obstante, se han reconocido algunos casos en los que los primeros son de tamaño netamente superior (entre 150 y 375 µm).

Los porfiroclastos de ortopiroxeno pueden contener exsoluciones y maclas de deformación, al igual que otros signos de deformación plástica tales como extinción ondulante y subgranos junto con simplectitas de clinopiroxeno en su interior.

Por su parte, los neoblastos de olivino muestran una textura en mosaico de granos poligonales con límites rectilíneos entre granos, numerosas uniones triples, y una uniformidad notable en cuanto a tamaño de grano. Los neoblastos no muestran extinción ondulante. En numerosas ocasiones neoblastos adyacentes presentan orientaciones cristalográficas muy próximas que posiblemente evidencian un origen por recristalización debida a rotación de subgranos.

Las espinelas suelen mostrar hábitos, tamaños y relaciones texturales similares a las descritas para los neoblastos de olivino. En ocasiones granos subidiomórficos de espinela se alinean en hileras paralelamente a la dirección de la lineación. Los porfirocristales mayores de olivino pueden contener en su interior granos de espinela con las características antedichas. Este rasgo textural es indicativo del carácter secundario (deformacional) de la microestructura (MERCIER y NICOLAS, 1975), de modo que tanto porfirocristales como neoblastos son producto de al menos dos procesos de recristalización dinámica en condiciones ligeramente distintas si bien bajo temperaturas elevadas (superiores a 800 °C) en ambos casos: una primera recristalización a temperaturas del orden de 1000 °C responsable de las microestructuras de tamaño más grueso (porfiroclastos con granos de espinela en su interior), y una segunda recristalización a temperaturas inferiores (800-900 °C) responsable de la formación de las microestructuras de tamaño de grano más fino (miloníticas).

2.2. Petrofábrica

Las fábricas cristalográficas del olivino en las metaharzburgitas han sido estudiadas con una platina universal Leitz de cinco ejes siguiendo el método de WENK (1985). Las distribuciones encontradas se muestran en proyección estereográfica (hemisferio inferior) para secciones estructurales XZ (Fig. 6). Se han realizado tam-

bién diagramas por separado para los dos conjuntos principales de elementos de fábrica presentes en las muestras: porfiroclastos y neoblastos. De ellos se desprende que la recristalización dinámica (sintectónica) por rotación progresiva de subgranos fue un mecanismo de deformación dúctil importante (HUMPHREYS y HATHERLY, 1996; POIRIER y NICOLAS, 1975).

El estudio de la orientación de los ejes cristalográficos del olivino realizado para la muestra 4a (Fig. 6) complementa y afianza los resultados deducidos de las observaciones petrográficas en las metaharzburgitas. Se reconoce en esta muestra la presencia de una fábrica cristalográfica moderada a fuertemente orientada según pseudoguirnalda y/o máximos puntuales dispuestos oblicuamente con respecto a los referenciales

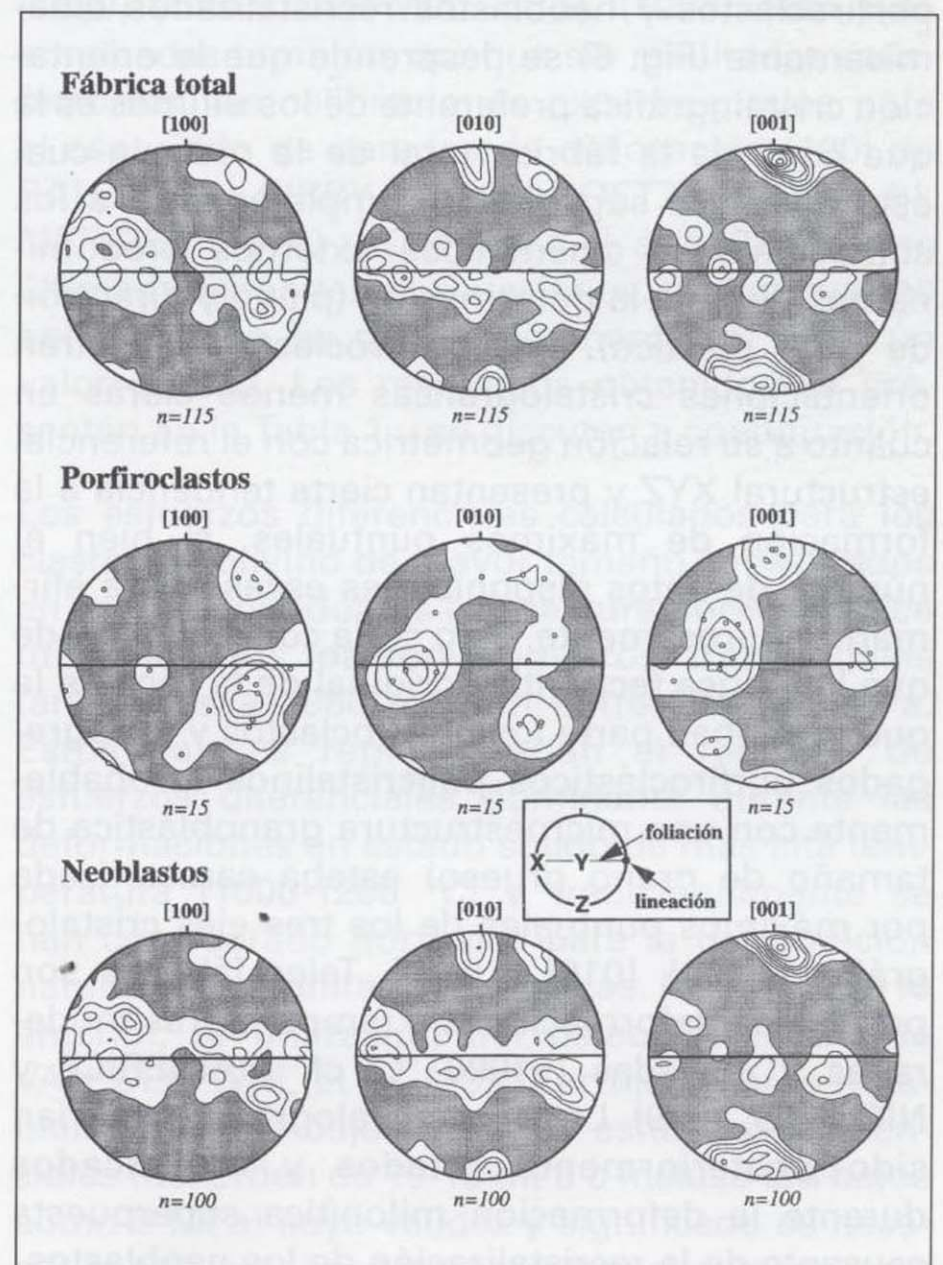


Figura 6.- Diagramas de orientación preferente para los ejes cristalográficos del olivino en la muestra 4a. Se presentan los diagramas obtenidos para el conjunto de la muestra así como los correspondientes a porfiroclastos y neoblastos por separado. Las proyecciones corresponden a secciones estructurales XZ realizadas en el hemisferio inferior de la red equiareal. Contornos en múltiplos de la distribución uniforme.

estructurales foliación (plano XY) y lineación (dirección X). La oblicuidad antedicha permite interpretar en primer lugar que la deformación responsable de las orientaciones cristalográficas preferentes ("lattice preferred orientation", LPO) tuvo componentes rotacionales importantes (régimen deformacional por cizalla simple o por cizalla subsimple) que podrían ser utilizadas para determinar el sentido de cizalla (NICOLAS et al., 1973). Por otra parte, se puede establecer que las fábricas cristalográficas medidas representan deformaciones características del dominio de temperaturas bajas para las peridotitas (800-900°C), con activación de los sistemas de deslizamiento intracristalino (001)[100] y (0kl)[100] (CARTER y AVE LALLEMANT, 1970).

De los diagramas realizados por separado para porfiroclastos y neoblastos recristalizados dinámicamente (Fig. 6) se desprende que la orientación cristalográfica preferente de los últimos es la que controla la fábrica total de la roca, la cual está a su vez supeditada completamente a los condicionantes cinemáticos externos predominantes durante la deformación (plano y dirección de flujo plástico). Los porfiroclastos muestran orientaciones cristalográficas menos claras en cuanto a su relación geométrica con el referencial estructural XYZ y presentan cierta tendencia a la formación de máximos puntuales, si bien el número de datos disponible es escaso para afirmarlo rigurosamente. Esto sería consecuencia de que la fábrica tectónica original de la roca de la que formaban parte los porfiroclastos y los agregados porfiroclásticos policristalinos (probablemente con una microestructura granoblástica de tamaño de grano grueso) estaba caracterizada por máximos puntuales de los tres ejes cristalográficos [100], [010] y [001]. Tales fábricas son propias de deformaciones a temperaturas moderadas y elevadas (>1000 °C; cf. MAINPRICE y NICOLAS, 1989). Los ejes cristalográficos habrían sido posteriormente rotados y modificados durante la deformación milonítica superpuesta causante de la recristalización de los neoblastos.

Las fábricas cristalográficas descritas son comparables a las encontradas por BEN JAMAA (1988) para las harzburgitas con textura porfiroclástica-milonítica de la parte basal del macizo de Herbeira.

3. SIGNIFICADO DE LA FABRICA TECTONICA DE LAS PERIDOTITAS

Si bien la deformación de harzburgitas se ha relacionado con ambientes de subducción (GUEGUEN y NICOLAS, 1980), se ha propuesto también que algunas de las microestructuras preservadas en estas rocas fueron originadas por el flujo asociado a la convección en el manto superior (VAN DER WAL et al., 1993). La interpretación de los rasgos microestructurales relevantes en términos de flujo plástico y recristalización está, sin embargo, basada en estudios de deformación experimental y en estudios petroestructurales de macizos peridotíticos y xenolitos ultramáficos con textura metamórfica (CARTER y AVE LALLEMANT, 1970; NICOLAS et al., 1973; MERCIER y NICOLAS, 1975; GUEGUEN y NICOLAS, 1980). En todos estos casos, las rocas estudiadas se consideran como fragmentos del manto superior emplazados en niveles corticales por mecanismos diversos.

La microestructura mostrada por las muestras CO83 y CO96 es con toda probabilidad de origen magmático, siendo la orientación preferencial de la forma de los ortopiroxenos inducida por un flujo viscoso a temperaturas elevadas (> 1200 °C). En tal sentido, podría ser interpretada tentativamente como una fábrica tectónica de origen astenosférico.

En el caso de las muestras CO94, 4a y 4b, el hábito de las espinelas puede utilizarse como guía para la determinación de los tipos microestructurales presentes en estas rocas y su significado. Las microestructuras son de origen tectónico y pueden asimilarse a las descritas para las texturas secundarias porfiroclástica y equigranular (alargada) de MERCIER y NICOLAS (1975) o bien a las texturas mosaico-porfiroclásticas de HARTE (1977). La presencia de pequeños cristales redondeados de espinela en el interior de porfiroclastos de olivino (cuya recristalización dinámica los ha aislado) refleja una etapa de deformación plástica inicial en condiciones de estabilidad de las peridotitas con espinela superpuesta a la fábrica primaria de origen magmático. Las texturas porfiroclásticas se interpretan en la literatura como debidas al flujo plástico y la recristalización en estado sólido, representando deformaciones de origen litosférico en

niveles someros del manto superior próximos al Moho. En este sentido, la existencia de menos de un 10 % de porfiroclastos sería indicativa de una deformación plástica (milonítica) de intensidad considerable.

4. DEFORMACION Y COMPORTAMIENTO REOLOGICO

4.1. Paleopiezometría

Dado que esfuerzos y parámetros microestructurales están relacionados (POIRIER, 1985), teóricamente es posible determinar los paleoesfuerzos a partir de estudios microestructurales. MERCIER (1985) señala que los paleopiezómetros pueden proporcionar los valores mínimos que habrían alcanzado los esfuerzos máximos relacionados con las últimas deformaciones. NICOLAS (1978) propone para el caso del olivino que los piezómetros estructurales que deben ser considerados son tres: la densidad de dislocaciones, el espaciado de las paredes de dislocación paralelas a (100) y el tamaño de los neoblastos recristalizados dinámicamente. MERCIER (1985) considera que algunas de estas microestructuras no son apropiadas para los cálculos paleopiezométricos debido a que se reequilibran con facilidad durante el emplazamiento de los macizos peridotíticos. De este modo, el tamaño de los subgranos sería sensible a la presencia de agua libre en el sistema y podría verse también afectado por los procesos de recuperación.

En cualquier caso, parece existir un acuerdo general en que la recristalización dinámica del olivino es el paleopiezómetro que reúne las mayores garantías. La recristalización dinámica de agregados policristalinos de olivino ha sido observada tanto en los ensayos de deformación experimental como en la naturaleza (CARTER y AVE LALLEMANT, 1970; NICOLAS et al., 1973; MERCIER y NICOLAS, 1975; CHOPRA y PATERSON, 1981). Este proceso microestructural empieza a ser importante por encima de 1000 °C y para el mismo se ha observado que la relación entre el tamaño de los neoblastos y el esfuerzo diferencial no depende de una forma significativa de la temperatura como tampoco de la presencia o ausencia de agua (POST, 1973; VAN DER WAL et al., 1993).

Los paleopiezómetros basados en el tamaño de los neoblastos recristalizados dinámicamente responden a una expresión matemática del tipo siguiente:

$$\sigma = Ad^p$$

o bien:

$$d = A^{(1/p)}\sigma^{(1/p)}$$

donde " σ " es el esfuerzo diferencial (generalmente en MPa), "A" es una constante pre-exponencial, "d" el tamaño de grano (generalmente en micras), y "p" es también una constante.

En el presente estudio se han empleado las calibraciones geopiezométricas para la recristalización dinámica del olivino de POST (1973), GOETZE (1975b), MERCIER (1976), ROSS et al. (1980) y VAN DER WAL et al. (1993). Han sido empleadas también, aunque sin resultados satisfactorios, las calibraciones experimentales para el espaciado de paredes de dislocación (100) de RALEIGH y KIRBY (1970), GOETZE (1975a, b), MERCIER (1976) y DURHAM et al. (1977). Estas últimas responden a ecuaciones similares a las anteriores en las que el exponente "p" toma un valor unidad. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1 y se discuten a continuación.

Los esfuerzos diferenciales calculados para los clastos de olivino de mayor tamaño conservados en las metaperidotitas con textura porfiroclástica utilizando los paleopiezómetros tradicionales (anteriores a 1980) oscilan entre 20 y 60 MPa. Estos valores representarían el régimen de esfuerzos diferenciales dominante durante las deformaciones en estado sólido de más alta temperatura (1000-1200 °C) y tradicionalmente se han considerado normales para la deformación natural de tectonitas peridotíticas. No obstante lo anterior, la utilización del paleopiezómetro de VAN DER WAL et al. (1993) arroja valores notablemente más bajos para los esfuerzos diferenciales (del orden de 10-15 MPa o incluso tan bajos como 5 MPa) cuya validez y significado es necesario precisar. En este sentido cabe mencionar que fue NICOLAS (1978) quien pusiera de manifiesto que los esfuerzos diferenciales calculados a partir del tamaño de grano recristalizado dinámicamente utilizando los geopiezómetros disponibles en aquellas fechas (POST, 1973; GOETZE, 1973b y MERCIER, 1976) eran significativamente

Tabla 1
Esfuerzo diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$, MPa)

Muestra	Microestructura	Tamaño de grano (μm)	Post (1973)	Goetze (1975b)	Mercier (1976)	Ross et al. (1980)	Van der Wal et al. (1993)
4a	Porfiroclástica (clastos mayores)	2400	8	22	8	11	4 \pm 1
id.	id. (clastos comunes)	2100	9	24	9	12	4 \pm 1
id.	id. (media de los neoblastos)	170	52	84	66	85	30 +16/-9
id.	id. (neoblastos menores)	100	76	110	100	128	43 +26/-14
CO94-30	Granoblástica (blastos relictos)	750	18	40	20	26	10 +4/-2
id.	id. (tamaño medio)	375	30	57	35	45	16 +8/-5
id.	Porfiroclástica (media de neoblastos)	140	60	93	77	99	34 +19/-11
id.	id. (neoblastos menores)	95	78	113	105	134	45 +27/-15

más elevados que los que cabría esperar para un manto superior sometido a un proceso de convección (1-2 MPa según los resultados obtenidos a partir de estudios sismológicos; cf. POIRIER, 1991). Los resultados aquí obtenidos (4-20 MPa) con el paleopiezómetro de VAN DER WAL et al. (1993), así como los obtenidos por los citados autores para rocas de significado similar, se encuentran dentro de un orden de magnitud de los niveles de esfuerzos diferenciales estimados para explicar la convección en el manto.

En el caso de los neoblastos recrystalizados dinámicamente la influencia de la calibración geopiezométrica en los resultados es más notoria. De este modo, los geopiezómetros tradicionales arrojan resultados que, aún superando los 100 MPa (más de 1 kbar), se consideran normales para estas rocas. Estos niveles de esfuerzos fueron igualmente determinados por BEN JAMAA (1988) y GIRARDEAU y GIL IBARGUCHI (1991) para la deformación milonítica a 800-900 °C de la porción basal de los macizos de Limo y Herbeira. El empleo del geopiezómetro de VAN DER WAL et al. (1993) para las mismas microestructuras, sin embargo, da como resultado esfuerzos diferenciales que son significativamente menores (entre 30 y 50 MPa) y del mismo orden de magnitud que los admitidos para deformaciones miloníticas litosféricas por numerosos autores sobre la base del empleo de otros calibres estructurales (e.g.: TWISS y MOORES, 1992; PASSCHIER y TROUW, 1996). Igualmente, son comparables a los resultados obtenidos dentro del Complejo de Cabo Ortegal (utilizando como calibre para la deformación plástica en estado sólido el cuarzo) para las deformaciones asociadas al metamorfismo de

alta presión y grado medio-alto de la Fm. Candelaria y la ZMTC (AZCARRAGA y ABALOS, 1996) y de la unidad eclogítica/granulítica del Concepenido-Vacariza (ABALOS et al., 1996).

4.2. Flujo plástico estacionario

Las leyes de flujo estacionario o ecuaciones constitutivas para la deformación plástica del olivino (tanto para cristales únicos como para agregados policristalinos) responden a una expresión matemática del tipo siguiente:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(\frac{-H}{RT}\right)$$

donde "é" es la tasa o velocidad de deformación, "A" es la constante pre-exponencial, " σ " el esfuerzo diferencial, "H" la entalpía de activación, "R" la constante de los gases, "T" la temperatura absoluta, y "n", el exponente, es también una constante.

Los valores experimentales obtenidos por diversos autores para las constantes anteriores pueden ser muy diferentes debido a múltiples factores. Entre ellos cabe destacar las diferencias en los materiales de partida, en los instrumentos utilizados, y en las condiciones de los ensayos (rango de cargas, temperaturas, presiones de confinamiento, contenidos en agua o fundidos, etc). GUEGUEN y NICOLAS (1980), y más recientemente VAN DER WAL et al. (1993), HIRTH y KOHLSTEDT (1995) y KOHLSTEDT y ZIMMER-

MAN (1996) aportan revisiones históricas comprensivas del efecto de todas las antedichas variables.

Aunque ni los experimentos ni sus resultados son ideales, las leyes de flujo que se pueden predecir a partir de datos experimentales probablemente sobreestiman en una cantidad significativa la resistencia real de las rocas (KOHLSTEDT et al., 1995). No obstante, tal y como afirman estos autores, las predicciones facilitadas por las leyes de flujo tienen la suficiente robustez como para suponer que su grado de indefinición está más condicionado por el desconocimiento de la geometría, mineralogía, estados de esfuerzos y estado termodinámico de las rocas con absoluta precisión.

En la realización del presente estudio se han considerado para las constantes anteriores los valores experimentales obtenidos por CARTER y AVE LALLEMANT (1970), RALEIGH y KIRBY (1970), POST (1973, 1977), CARTER (1975), ROSS et al. (1980) y CHOPRA y PATERSON (1984), junto con los valores teóricos calculados por JI y ZHAO (1994). De todas estas calibraciones, la de CHOPRA y PATERSON (1984) se refiere a monocristales de olivino, mientras que las demás corresponden a experimentos realizados con dunitas en presencia o ausencia de agua. JI y ZHAO (1994) calculan los valores de las constantes para una harzburgita constituida por 80 % de olivino y 20 % de ortopiroxeno a partir de datos experimentales referidos a monocristales (RALEIGH et al., 1971; CHOPRA y PATERSON, 1984).

Los márgenes de error e incertidumbres en las tasas de deformación calculadas resultan de la propagación de errores de varios orígenes: p.ej. los cometidos en la determinación de la presión y temperatura (1.8-2.1 GPa y 800-850 °C, respectivamente, para las rocas consideradas) de la deformación, en el cálculo del esfuerzo diferencial, y los debidos a las calibraciones experimentales. Se alcanzan así incertidumbres de entre uno y dos órdenes de magnitud, por lo que los resultados obtenidos deben tratarse con cautela. No obstante todo lo anterior, en las tablas 2 y 3 se presentan los resultados calculados para las muestras 4a y CO94-30, respectivamente, asumiendo en las mismas que los valores presenta-

dos para las tasas de deformación son aproximaciones de \pm 1-2 órdenes de magnitud.

Según los resultados obtenidos, las deformaciones de más alta temperatura (1000-1200 °C) debieron ocurrir bajo tasas relativamente rápidas de entre 10^{-11} y 10^{-13} s⁻¹. Por su parte, las deformaciones miloníticas verificadas bajo condiciones de temperatura de entre 800 y 850 °C fueron sensiblemente más lentas, entre 10^{-12} y 10^{-15} s⁻¹. En ambos casos los resultados se pueden considerar característicos para la deformación plástica natural en la corteza terrestre y el manto superior. Las diferencias entre uno y otro tipo de deformación son por otra parte lógicas teniendo en cuenta que la viscosidad de las rocas disminuye al aumentar la temperatura. En este sentido, la viscosidad efectiva (cociente entre el esfuerzo diferencial y la tasa de deformación) calculada para las rocas deformadas a mayor temperatura sería del orden de 10^{19} Pa·s (característica de un manto superior en convección), mientras que la calculada para las deformadas a temperaturas más bajas sería de 10^{20-22} Pa·s (característica de niveles profundos de la corteza continental y someros del manto superior litosférico).

5. SIGNIFICADO GEODINAMICO: DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las evidencias de campo y la oblicuidad entre fábricas cristalográficas y los referenciales estructurales foliación y lineación reconocidos en las metaperidotitas aquí estudiadas indican que el flujo plástico en estado sólido es resultado de deformaciones en las que predominan las componentes rotacionales (cizalla simple o subsimple). Además de los grandes porfiroclastos de olivino deformados plásticamente por deslizamiento intracristalino, los granos nuevos recrystalizados se formaron durante el flujo (recrystalización dinámica). Esta recrystalización determina la formación de una orientación cristalográfica importante del olivino. La distribución espacial de las espinelas entre la matriz recrystalizada es indicativa de una deformación intensa (en contraposición a un origen por annealing de la textura recrystalizada) y posiblemente bajo tasas de deformación más altas, que de acuerdo con los resultados de los estudios experimentales favorece la recrystalización dinámica sobre el deslizamiento intracristalino.

Tabla 2
[-log (velocidad de deformación) (s⁻¹)]

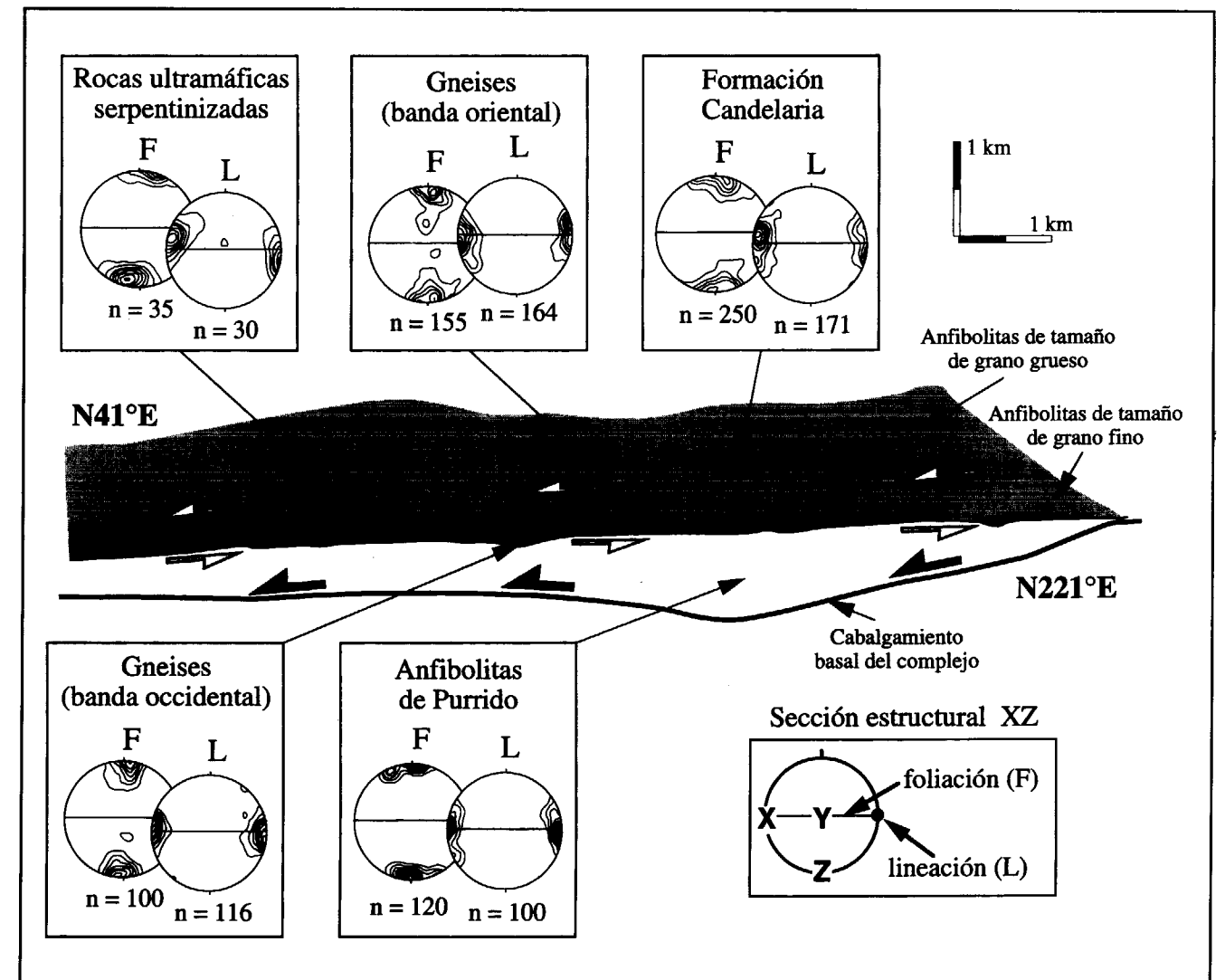
Muestra 4a					Van der Wal et al. (1993)			Media	Desviación estándar
	Post (1973)	Goetze (1975b)	Mercier (1976)	Ross et al. (1980)	σ medio	σ máximo	σ mínimo		
Temperatura de la deformación (T): 1200 °C									
Tamaño de grano (Ø): 2400 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	12,9	10,8	13,0	12,4	14,4	12,6	14,9	13,0	1,4
Raleigh & Kirby (1970)	13,1	11,0	13,2	12,6	14,7	12,8	15,3	13,2	1,4
Post (1973)	13,3	12,0	13,3	13,0	14,2	13,1	14,6	13,4	0,9
Post (1977)	13,4	12,0	13,4	13,0	14,3	13,2	14,6	13,4	0,9
Ross et al. (1980)	11,1	9,5	11,2	10,7	12,3	10,9	12,7	11,2	1,1
Chopra & Paterson (1984)	10,6	9,0	10,6	10,2	11,7	10,3	12,0	10,6	1,0
Ji & Zhao (1994)	9,8	8,8	9,9	9,6	10,6	9,7	10,8	9,9	0,7
T: 850 °C. Ø: 170 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	14,6	13,6	14,1	13,6	15,8	14,1	16,6	14,6	1,2
Raleigh & Kirby (1970)	14,0	13,0	13,5	13,0	15,3	13,4	16,1	14,0	1,2
Post (1973)	16,7	16,1	16,4	16,1	17,5	16,4	18,0	16,7	0,7
Post (1977)	16,8	16,1	16,5	16,1	17,5	16,4	18,0	16,8	0,7
Ross et al. (1980)	12,7	11,9	12,3	11,9	13,6	12,2	14,3	12,7	0,9
Chopra & Paterson (1984)	13,7	13,0	13,4	13,0	14,6	13,3	15,2	13,7	0,8
Ji & Zhao (1994)	11,9	11,4	11,7	11,4	12,6	11,7	12,9	12,0	0,6
T: 800 °C. Ø: 100 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	14,9	14,1	14,3	13,8	16,1	14,3	16,9	14,9	1,1
Raleigh & Kirby (1970)	14,2	13,4	13,6	13,0	15,4	13,5	16,2	14,2	1,2
Post (1973)	17,4	16,9	17,0	16,7	18,1	17,0	18,6	17,4	0,7
Post (1977)	17,4	16,9	17,0	16,7	18,1	17,0	18,7	17,4	0,7
Ross et al. (1980)	13,0	12,3	12,5	12,1	13,9	12,5	14,5	13,0	0,9
Chopra & Paterson (1984)	14,3	13,8	13,9	13,5	15,2	13,9	15,8	14,3	0,8
Ji & Zhao (1994)	12,4	12,0	12,1	11,8	12,9	12,1	13,4	12,4	0,6

Tabla 3
[-log (velocidad de deformación) (s⁻¹)]

Muestra CO94-30					Van der Wal et al. (1993)			Media	Desviación estándar
	Post (1973)	Goetze (1975b)	Mercier (1976)	Ross et al. (1980)	σ medio	σ máximo	σ mínimo		
Temperatura de la deformación (T): 1000 °C									
Tamaño de grano (Ø): 750 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	14,0	12,4	13,9	13,3	15,4	13,6	16,0	14,1	1,2
Raleigh & Kirby (1970)	13,8	12,2	13,7	13,1	15,3	13,4	15,9	13,9	1,3
Post (1973)	15,2	14,2	15,1	14,7	16,0	14,9	16,4	15,2	0,8
Post (1977)	15,2	14,2	15,1	14,8	16,1	15,0	16,5	15,3	0,8
Ross et al. (1980)	12,1	10,8	12,0	11,5	13,2	11,8	13,7	12,2	1,0
Chopra & Paterson (1984)	12,3	11,2	12,2	11,8	13,4	12,0	13,8	12,4	0,9
Ji & Zhao (1994)	11,0	10,2	10,9	10,7	11,7	10,8	12,0	11,1	0,6
T: 1000 °C. Ø: 375 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	13,0	11,7	12,7	12,1	14,3	12,5	15,0	13,1	1,2
Raleigh & Kirby (1970)	12,8	11,4	12,5	11,9	14,2	12,3	14,9	12,8	1,2
Post (1973)	14,5	13,7	14,3	14,0	15,4	14,2	15,8	14,6	0,7
Post (1977)	14,6	13,8	14,4	14,1	15,4	14,3	15,8	14,6	0,7
Ross et al. (1980)	11,3	10,3	11,1	10,6	12,4	10,9	12,9	11,4	0,9
Chopra & Paterson (1984)	11,6	10,6	11,4	11,0	12,6	11,3	13,1	11,6	0,9
Ji & Zhao (1994)	10,5	9,8	10,4	10,1	11,2	10,3	11,5	10,5	0,6
T: 850 °C. Ø: 140 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	14,3	13,4	13,8	13,3	15,5	13,8	16,3	14,3	1,2
Raleigh & Kirby (1970)	13,7	12,8	13,2	12,6	15,0	13,1	15,8	13,7	1,2
Post (1973)	16,5	16,0	16,2	15,9	17,3	16,2	17,8	16,5	0,7
Post (1977)	16,6	16,0	16,3	15,9	17,3	16,2	17,8	16,6	0,7
Ross et al. (1980)	12,5	11,7	12,0	11,6	13,4	12,0	14,0	12,5	0,9
Chopra & Paterson (1984)	13,5	12,8	13,1	12,8	14,4	13,1	15,0	13,5	0,8
Ji & Zhao (1994)	11,8	11,3	11,5	11,3	12,4	11,5	12,8	11,8	0,6
T: 800 °C. Ø: 95 µm									
Carter & Avé Lallemand (1970)	14,8	14,1	14,2	13,7	16,0	14,2	16,8	14,9	1,1
Raleigh & Kirby (1970)	14,1	13,3	13,5	12,9	15,3	13,5	16,2	14,1	1,2
Post (1973)	17,3	16,8	16,9	16,6	18,0	16,9	18,6	17,3	0,7
Post (1977)	17,4	16,9	17,0	16,7	18,1	17,0	18,6	17,4	0,7
Ross et al. (1980)	12,9	12,3	12,4	12,0	13,8	12,4	14,5	12,9	0,9
Chopra & Paterson (1984)	14,3	13,7	13,8	13,5	15,1	13,8	15,7	14,3	0,8
Ji & Zhao (1994)	12,3	11,9	12,0	11,8	12,9	12,0	13,3	12,3	0,6

La deformación dúctil en el seno de la ZMTC y la Formación Candelaria a temperaturas por encima de 600 °C (AZCARRAGA y ABALOS, 1996) en un ambiente cortical profundo, fue debida a un régimen de esfuerzos diferenciales en torno a 10-15 MPa y a tasas de deformación lentas (10⁻¹⁷-10⁻¹⁴ s⁻¹). Los esfuerzos diferenciales antedichos pertenecen al régimen de esfuerzos bajos (0-20

MPa) de TWISS y MOORES (1992). Las relaciones de campo indican que hubo localización de la deformación en el curso del enfriamiento por debajo de 600 °C, de modo que aquella se concentra preferentemente en una banda de 350 m de espesor medio compuesta por la ZMTC y la porción anfibolítica basal de tamaño de grano fino de la Formación Candelaria (Fig. 7). Esta



La deformación dúctil en el seno de la ZMTC y la Formación Candelaria a temperaturas por encima de 600 °C (AZCARRAGA y ABALOS, 1996) en un ambiente cortical profundo, fue debida a un régimen de esfuerzos diferenciales en torno a 10-15 MPa y a tasas de deformación lentas (10^{-17} - 10^{-14} s $^{-1}$). Los esfuerzos diferenciales antedichos pertenecen al régimen de esfuerzos bajos (0-20

MPa) de TWISS y MOORES (1992). Las relaciones de campo indican que hubo localización de la deformación en el curso del enfriamiento por debajo de 600 °C, de modo que aquella se concentra preferentemente en una banda de 350 m de espesor medio compuesta por la ZMTC y la porción anfibolítica basal de tamaño de grano fino de la Formación Candelaria (Fig. 7). Esta

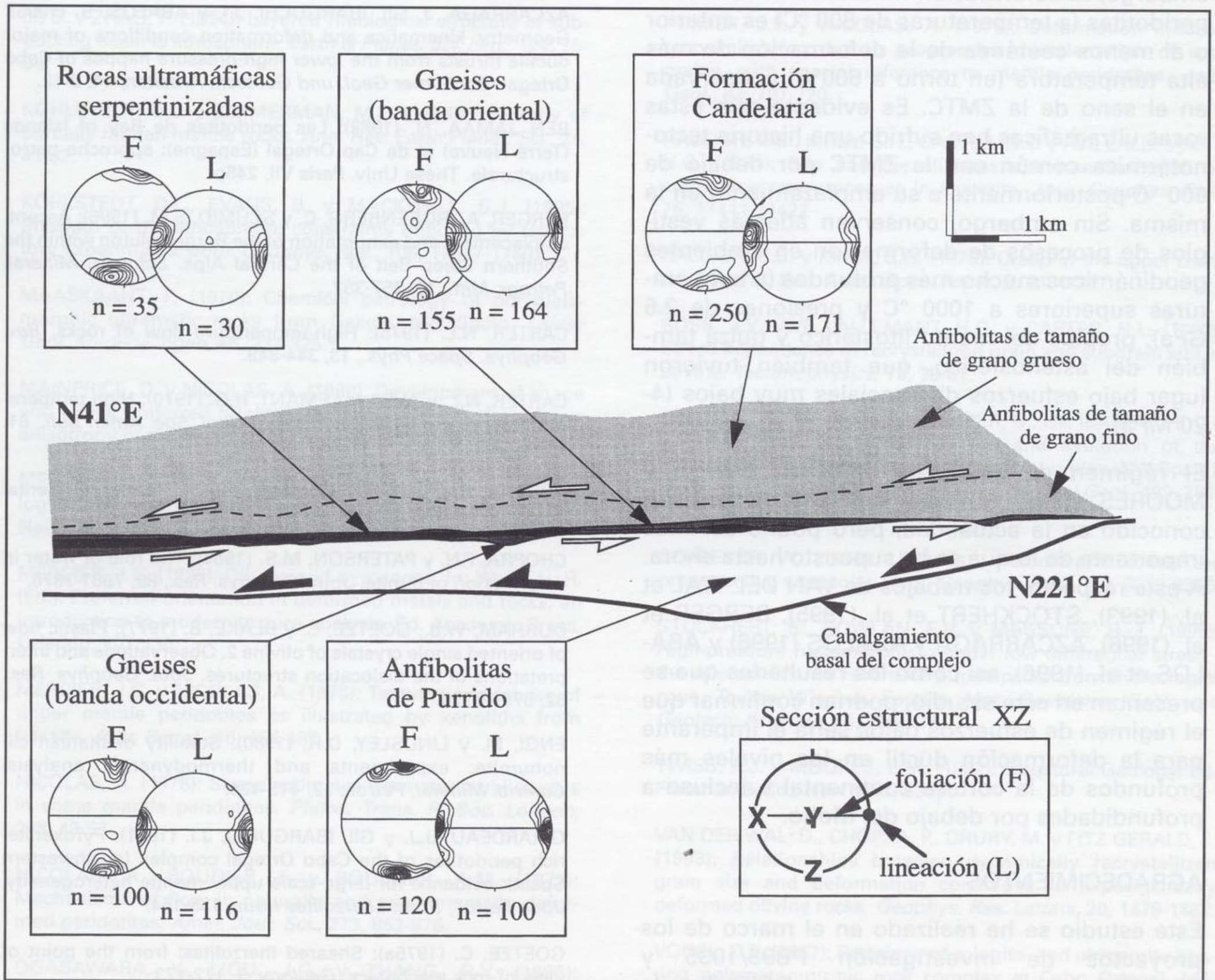


Figura 7.- Reconstrucción estructural (en una sección perpendicular a la foliación regional y paralela a la dirección de la lineación dominante) de la geometría probable de la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro y las unidades asociadas a muro y techo durante el metamorfismo eo-Hercínico de grado medio-alto y alta presión. El plano de proyección tiene una dirección N41°E y buza aproximadamente 50° hacia el NO. Este corte representaría una aproximación a la geometría de una zona de cizalla dúctil de escala cortical realizada paralelamente a la dirección de movimiento tectónico. En el plano de proyección utilizado los polos de las foliaciones y las lineaciones minerales y de estiramiento se proyectan como máximos puntuales en torno a las direcciones estructurales Z y X, respectivamente, aportando de este modo una imagen nítida de la disposición geométrica relativa de los planos de flujo (planos XY/foliación) y de las direcciones de flujo (dirección X/lineación). Destaca sobremanera la concordancia en la disposición de foliaciones y lineaciones entre las diferentes unidades metamórficas implicadas en la reconstrucción.

zona de cizalla concentraría la deformación bajo niveles de esfuerzos diferenciales más altos (probablemente por encima de 30 MPa).

Los niveles de esfuerzos diferenciales moderados antedichos (por encima de 20 MPa) son semejantes a los calculados para la deformación milonítica en estado sólido de las metaperidotitas contenidas como "boudins" en la ZMTC. Sin embargo, la deformación milonítica de las metaperidotitas (a temperaturas de 800 °C) es anterior o al menos coetánea de la deformación de más alta temperatura (en torno a 600°C) conservada en el seno de la ZMTC. Es evidente que estas rocas ultramáficas han sufrido una historia tectono-térmica común con la ZMTC por debajo de 600 °C posteriormente a su emplazamiento en la misma. Sin embargo, conservan además vestigios de procesos de deformación en ambientes geodinámicos mucho más profundos (a temperaturas superiores a 1000 °C y presiones de 2.5 GPa), propios del manto litosférico y quizá también del astenosférico, que también tuvieron lugar bajo esfuerzos diferenciales muy bajos (4-20 MPa).

El régimen de esfuerzos bajos de TWISS y MOORES (1992) no está suficientemente bien conocido en la actualidad, pero podría ser más importante de lo que se ha supuesto hasta ahora. A este respecto, los trabajos de VAN DEL WAL et al. (1993), STOCKHERT et al. (1995), BERGER et al. (1996), AZCARRAGA y ABALOS (1996) y ABALOS et al. (1996), así como los resultados que se presentan en este estudio, podrían confirmar que el régimen de esfuerzos bajos sería el imperante para la deformación dúctil en los niveles más profundos de la corteza continental e incluso a profundidades por debajo del Moho.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco de los proyectos de investigación PB95/1035 y EB034/96 subvencionados por la DGICYT y la Universidad del País Vasco, respectivamente.

REFERENCIAS

ABALOS, B., AZCARRAGA, J., GIL IBARGUCHI, J.I., MENDIA, M.S. y SANTOS ZALDUEGUI, J.F., M. (1996): Flow stress, strain rate and effective viscosity evaluation in a high-pressure nappe (Cabo Ortegal, Spain). *Jour. Met. Geol.*, 14, 227-248.

ARENAS, R., GIL IBARGUCHI, I., GONZALEZ LODEIRO, F., KLEIN, E., MARTINEZ CATALAN, J.R., ORTEGA GIRONES, E., DE PABLO MACIA, J.G. y PEINADO, M. (1986): Tectonostratigraphic units in the complexes with mafic and related rocks of the NW of the Iberian Massif. *Hercynica*, 2, 87-110.

AZCARRAGA, J. y ABALOS, B. (1996): Comportamiento reológico de la Formación Candelaria y la Zona de Movimiento Tectónico de Carreiro (Cabo Ortegal, NO de España) durante el metamorfismo sintectónico eo-Hercínico de grado medio y alto. *Bol. Geol. Min.*, 107, 125-144.

AZCARRAGA, J., GIL IBARGUCHI, J.I. y ABALOS, B. (1995): Geometry, kinematics and deformation conditions of major ductile thrusts from the lower high-pressure nappes of Cabo Ortegal. *Bochumer Geol. und Geotech. Arbeiten*, 44, 9-12.

BEN JAMAA, N. (1988): Les peridotites de Bay of Islands (Terre Neuve) et de Cap Ortegal (Espagne): approche pétrostructurale. Thèse Univ. Paris VII, 245p.

BERGER, A., ROSENBERG, C. y SCHMID, S.M. (1996): Ascent, emplacement and exhumation of the Bergell pluton within the Southern Steep Belt of the Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 76, 357-382.

CARTER, N.L. (1975): High-temperature flow of rocks. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13, 344-349.

CARTER, N.L. y AVE LALLEMANT, H.G. (1970): High temperature flow of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, 2181-2202.

CHOPRA, P.N. y PATERSON, M.S. (1981): The experimental deformation of dunite. *Tectonophysics*, 78, 453-473.

CHOPRA, P.N. y PATERSON, M.S. (1984): The role of water in deformation of dunite. *Jour. Geophys. Res.*, 89, 7861-7876.

DURHAM, W.B., GOETZE, C. y BLAKE, B. (1977): Plastic flow of oriented single crystals of olivine 2. Observations and interpretations of the dislocation structures. *Jour. Geophys. Res.*, 82, 5755-5770.

ENGI, M. y LINDSLEY, D.H. (1980): Stability of titanian clinohumite: experiments and thermodynamic analysis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72, 415-424.

GIRARDEAU, J.J. y GIL IBARGUCHI, J.I. (1991): Pyroxenite-rich peridotites of the Cabo Ortegal complex (northwestern Spain): evidence for large-scale upper-mantle heterogeneity. *Jour. Petrol., Spec. Lherzolites Issue*, 135-154.

GOETZE, C. (1975a): Sheared lherzolites: from the point of view of rock mechanics. *Geology*, 3, 172-173.

GOETZE, C. (1975b): Textural and microstructural systematics in olivine and quartz. *Eos Trans. Amer. Geophys. Un.*, 56, 6.

GRAVESTOCK, P.J. (1992): The chemical causes of uppermost mantle heterogeneities. Ph.D. Thesis, The Open Univ., 299p.

GUEGUEN, Y. y NICOLAS, A. (1980): Deformation of mantle rocks. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 8, 119-144.

HARTE, B. (1977): Rock nomenclature with particular

reference to deformation and recrystallization textures in olivine bearing xenoliths. *Jour. Geol.*, 89, 279-288.

HIRTH G. y KOHLSTEDT, D.L. (1995): Experimental constraints on the dynamics of partially molten upper mantle 2. Deformation in the dislocation creep regime. *Jour. Geophys. Res.*, 100, 15441-15449.

HUMPHREYS, F.J. y HATHERLY, M. (1996): Recrystallization and related annealing phenomena. Ed. Pergamon, Oxford, 497p.

Ji, S. y ZHAO, P. (1994): Layered rheological structure of subducting oceanic lithosphere. *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 124, 75-94.

KOHLSTEDT, D.L. y ZIMMERMAN, M.E. (1996): Rheology of partially molten mantle rocks. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 24, 41-62.

KOHLSTEDT, D.L., EVANS, B. y MACKWELL, S.J. (1995): Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments. *Jour. Geophys. Res.*, 100, 17587-17602.

MAASKAANT, P. (1970): Chemical petrology of polymetamorphic ultramafic rocks from Galicia, NW Spain. *Leidse Geol. Mededelingen*, 45, 237-325.

MAINPRICE, D. y NICOLAS, A. (1989): Development of shape and lattice preferred orientations: application to the seismic anisotropy of the lower crust. *Jour. Struct. Geol.*, 11, 175-189.

MERCIER, J.C. (1976): Natural peridotites: chemical and rheological heterogeneity of the upper mantle. Ph.D. Thesis Univ. New York, Stony Brook, 710p.

MERCIER, J.C. (1985): Olivine and pyroxenes. In: Wenk, H.-R. (Ed.): Preferred orientation in deformed metals and rocks: an introduction to modern texture analysis. Ed. Academic Press, Orlando, 407-430.

MERCIER, J.C. y NICOLAS, A. (1975): Textures and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Jour. Petrol.*, 16, 454-487.

NICOLAS, A. (1978): Stress estimates from structural studies in some mantle peridotites. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 288, 49-57.

NICOLAS, A., BOUDIER, F. y BOULLIER, A.M. (1973): Mechanisms of flow in naturally and experimentally deformed peridotites. *Amer. Jour. Sci.*, 273, 853-876.

OGASAWARA, Y., LIU, J.G. y ZHANG, R.Y. (1995): Petrogenetic grid for ultrahigh-pressure metamorphism in the model system CaO-MgO-SiO₂-CO₂-H₂O. *The Island Arc*, 4, 240-253.

PASSCHIER, C.W. y TROUW, R.A.J. (1996): Microtectonics. Ed. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 289p.

POIRIER, J.-P. (1985): Creep of Crystals. Ed. Cambridge Univ. Press, 260p.

POIRIER, J.-P. (1991): Les profondeurs de la Terre. Ed. Masson, Paris, 136p.

POST, R.L. (1973): The flow laws of Mt. Burnet dunite. Ph. D. Thesis, Univ. of California at Los Angeles, 272p.

POST, R.L. (1977): High-temperature creep of Mt. Burnet dunite. *Tectonophysics*, 42, 75-110.

POIRIER, J.P. y NICOLAS, A. (1975): Deformation induced recrystallization due to progressive misorientation of subgrains, with special reference to mantle peridotites. *Jour. Geol.*, 83, 707-720.

RALEIGH, C.B., KIRBY, S.H., CARTER, N.L. y AVE LALLEMANT, H.G. (1971): Slip and the clinopyroxene transformation as competing rate processes in enstatite. *Jour. Geophys. Res.*, 76, 17411-17422.

RALEIGH, C.B. y KIRBY, S.H. (1970): Creep in the upper mantle. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Paper*, 3, 113-121.

ROSS, J.V., AVE LALLEMANT, H.G. y CARTER, N.L. (1980): Stress dependence of recrystallized grain and subgrain size in olivine. *Tectonophysics*, 70, 39-61.

SANTOS ZALDUEGUI, J.F., SCHÄRER, U., GIL IBARGUCHI, J.I. y GIRARDEAU, J.J. (1996): Origin and evolution of the Paleozoic Cabo Ortegal ultramafic-mafic complex (NW Spain): U-Pb, Rb-Sr and Pb-Pb isotope data. *Chemical Geol.*, 129, 281-304.

SCHREYER, W. (1995): Ultradeep metamorphic rocks: the retrospective viewpoint. *Jour. Geophys. Res.*, 100, 8353-8366.

STOCKHERT, B., NOWLAN, E.V. y MASSONE, H.-J. (1995): High-pressure metamorphism under low differential stress - the microstructural record of a metapelite from the eclogite zone, Tauern Window, Eastern Alps. *Bochumer Geol. und Geotech. Arbeiten*, 44, 229-234.

TWISS, R.J. y MOORES, E.M. (1992): Structural Geology. Ed. Freeman & Co., New York, 530p.

VAN DER WAL, D., CHOPRA, P., DRURY, M. y FITZ GERALD, J. (1993): Relationships between dynamically recrystallized grain size and deformation conditions in experimentally deformed olivine rocks. *Geophys. Res. Letters*, 20, 1479-1482.

VOGEL, D.E. (1967): Petrology of eclogite- and pyroxenite-bearing polymetamorphic rock complex at Cabo Ortegal, NW Spain. *Leidse Geol. Mededelingen*, 40, 121-213.

WENK, H.-R. (1985): Measurement of pole figures. In Wenk, H.-R. (Ed.): Preferred orientation in deformed metals and rocks: an introduction to modern texture analysis. Ed. Academic Press, Orlando, 11-47.

Original recibido: Mayo 1997.

Original aceptado: Julio 1997.

INFORMACION

NOTAS SOBRE LA EVOLUCION HISTORICA DEL CONOCIMIENTO, LAS ESTRATEGIAS Y TECNICAS DE MITIGACION DE LAS INUNDACIONES Y MOVIMIENTOS DE LADERA EN ESPAÑA.

Por F. J. AYALA-CARCEDO (*)

1.- INUNDACIONES

1.1.- Introducción

Las inundaciones producidas por las avenidas fluviales, son un episodio normal en los ríos en todos sus tramos, y todas las culturas y civilizaciones han tenido que enfrentarse a este problema. La situación, habitualmente viene agravada por el frecuente asentamiento de las poblaciones en áreas inundables de las vegas (Sevilla, Valencia y Murcia p.e.) debido a la facilidad del abastecimiento de agua y la fertilidad y planitud de estos terrenos, cuyo paradigma lo constituyeron las Civilizaciones Hidráulicas del Nilo o Mesopotamia.

Las causas últimas del proceso se hallan en las precipitaciones frontales persistentes, principal agente en las avenidas de nuestros ríos atlánticos, la fusión de las nieves, típica en la ribera izquierda del Ebro, o los procesos convectivos propios del área mediterránea y zonas montañosas. Obviamente, a lo largo de toda la Historia, se ha carecido de medios para enfrentarse al proceso en su génesis, concentrándose las actuaciones en los cauces, vegas y cuencas vertientes. El objetivo buscado siempre por las obras, ha sido la disminución del calado a su paso por ciudades o cultivos mediante la derivación de caudales aguas arriba, su almacenamiento en presas o el aumento de la velocidad de

la corriente con canalizaciones. También se han utilizado las repoblaciones forestales, de utilidad para pequeñas inundaciones por la intercepción de la lluvia en las hojas y la hojarasca y la protección del suelo facilitando la infiltración y reduciendo los arrastres. La evitación de zonas inundables, ha sido asimismo muy utilizada, edificando en las terrazas fluviales (Logroño p.e.).

En España, ha habido numerosas inundaciones catastróficas, (catalogadas primeramente por el ingeniero de minas *Horacio Bentabol (1854-1928)* en 1900,² junto el resto de las catástrofes naturales), especialmente en la fachada mediterránea y el Sur, debido a la coincidencia de climas mediterráneos con fuertes precipitaciones y montañas costeras favorecedoras de caudales punta altos en ríos y ramblas con régimen muy irregular. Actualmente, vienen a suponer según los estudios del ITGE, en términos medios anuales, unos 20 muertos al año y unos 35.000 millones de pesetas de pérdidas. Las víctimas, suelen concentrarse en pequeñas cuencas torrenciales con tiempos de concentración horarios que no permiten evacuaciones, como indican los sucesos más desastrosos desde 1960: las inundaciones del Vallés en 1962, las del Sureste en 1973, las del País Vasco de 1983, la de Biescas (Huesca) en 1996 y Badajoz en 1997. Los grandes ríos, con crecidas mucho más lentas, que fueron el terror de las poblaciones ribereñas en el pasado, gracias al progreso de las telecomunicaciones y las obras realizadas, no producen ya catástrofes humanas desde la del Turia

en Valencia en 1957, problema resuelto con la desviación del Plan Sur.

1.2.- La lucha en la Era Preindustrial

Dadas las limitadas posibilidades de la técnica constructiva, los asentamientos se localizaban generalmente fuera de las zonas inundables, tal y como se ve en las ciudades hispanorromanas de Segovia, Clunia (Burgos) o Itálica, a lo cual coadyuvaba la componente militar de los emplazamientos, común también a la anterior etapa celtíbera (Tiermes en Soria, Amaya en Burgos) y a la Alta Edad Media (Burgos, Avila). Era frecuente utilizar la terraza próxima a las vegas, los piedemontes o laderas y los páramos.

Sorprende la generosidad del diseño ante avenidas de los hispanorromanos como evidencia el puente de Alcántara sobre el Tajo de *Cayo Julio Lacer*, que ha permanecido incólume ante subidas del nivel de 30 metros³.

Las presas hispanorromanas, como las que rodean Mérida o la más antigua conservada, la de Alcantarilla en Mazarambroz (Toledo) del siglo II a.n.E. tenían como misión fundamental el abastecimiento, aunque como toda presa, contribuían a laminar la avenida, a reducir el caudal punta del hidrograma.

La técnica más interesante desarrollada probablemente por las poblaciones rurales del Levante en época romana,

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España y Comisión Internacional de Historia de la Geología (UNESCO).

fue la ligada a los riegos con las turbias, las aguas de avenida. Para ello, se derivaban las aguas con azudes en el lecho de las ramblas o ríos-ramblas, o a través de boqueras en malecones laterales. Así conseguían almacenar el agua derivada en el suelo sediento al fin del verano o comienzos del otoño, y laminar la avenida. Técnicas similares fueron también utilizadas para aprovechar la arroyada difusa en la base de los montes, a través de obras colectivas de generaciones.⁴

Complementaria de estas técnicas era el *abancalamiento* de laderas, que aunaba almacenamiento del agua en el suelo y laminación de las avenidas.

Estas técnicas agrícolas levantinas constituyeron a través de los períodos romano, musulmán y cristiano la base fundamental junto a la evitación de las áreas inundables de la estrategia de lucha contra las inundaciones hasta la segunda mitad del XIX, habiendo estado en uso hasta mediados del XX.

Junto a estas técnicas difundidas por todo el territorio, existieron actuaciones puntuales de interés en la Edad Media. Las más relevantes son la "Contra-parada" de *Alhakén II*, realizada a fines del primer milenio en la cuenca del Segura, o el encauzamiento del Turia en Valencia en el siglo XIV, reconstruido a fines del XVI tras la riada de 1589.

El Renacimiento del Quinientos, es sin duda la época cumbre de la Técnica Hidráulica española. Así lo testimonian "*Los veintidós libros de los Ingenios y de las Máquinas*", manuscrito antes atribuido al ingeniero italiano *Juanelo Turriano* y muy probable obra del ingeniero aragonés *Pedro Juan de Lastanosa*⁵ "maquinario" de *Felipe II*, el más importante tratado hidráulico realizado hasta el XVI, pionero de las "Arquitecturas Hidráulicas" del siglo XVIII, o las presas de *Almansa* (1586), obra de los maestros *Pedro de Aguirre* y *Juanes del Temple*⁶ y *Tibi* (1594), obra de los ingenieros *Pedro Izquierdo* y *Antonio Real* en la que intervinieron los *Antonelli*, ingenieros polivalentes al servicio de *Felipe II*. Estas presas fueron las primeras arco-gravedad de la época moderna, y junto a la vertiente de regadío, cumplían importantes funciones de laminación de avenidas.

Cabe destacar también en 1570, la mina de *Daroca*, túnel de desviación de una

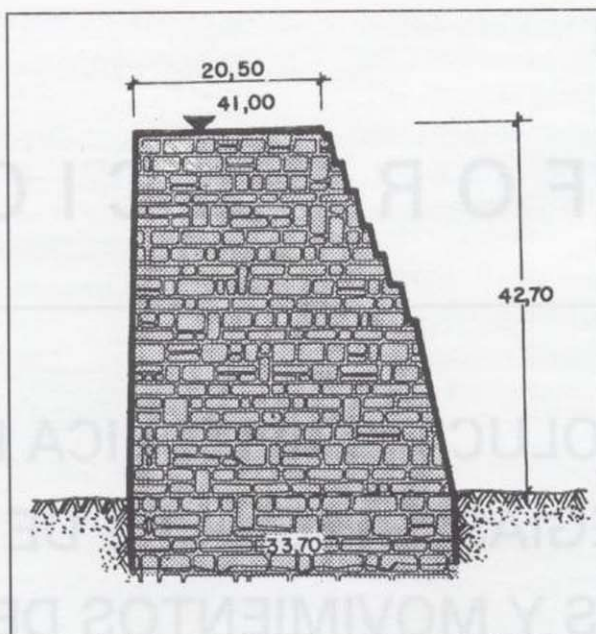


Fig. 1. Presa de Tibi (Alicante). Terminada en 1594 para regar y laminar el Montnegre, de 42,7 m de altura y 3,7 hm³ de capacidad. Primera presa arco-gravedad de la Era Moderna tras la de *Almansa* (1586). Obra de los ingenieros *Pedro Izquierdo* y *Antonio Real* con colaboración de los *Antonelli*. (Inventario Nacional de Presas, MOPU, 1986).

rambla de casi 600 metros, obra del técnico francés *Quinto Pierres Vidal*,³⁵ primer túnel hidráulico europeo de la Era Moderna.

En América, la obra hidráulica es ingente. Cabe destacar el socavón de *Huehuetoca* de 1607, obra del ingeniero alemán *Enrico Martínez* para mitigar las inundaciones en *Tenochtitlán*, después ciudad de *Méjico*³⁵. Igualmente, los

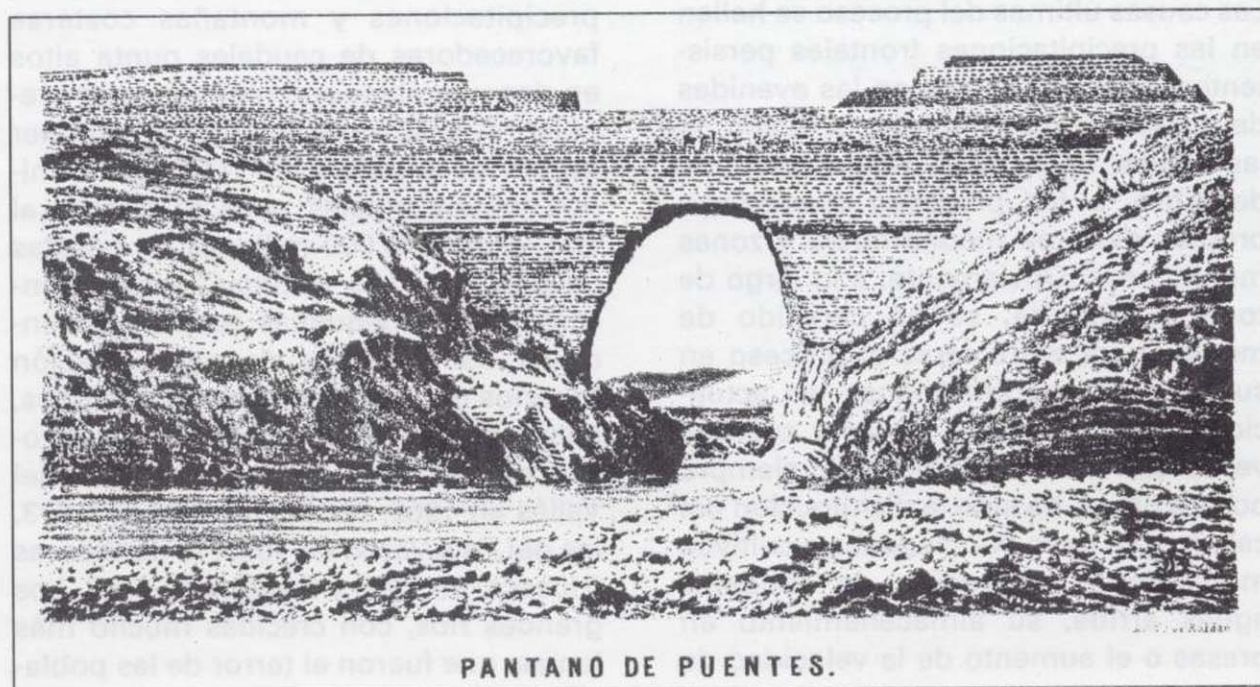


Fig. 2. Presa de Puentes sobre un afluente del Guadalentín, diseñada por el autodidacta *Jerónimo Martínez de Lara*, en el XVIII. Fue destruida por sifonamiento de la cimentación en 1802 provocando 608 muertos en *Lorca*. (En *Botella*, 1879).

encauzamientos en *Lima* y *Santiago de Chile*.

Del período ilustrado del XVIII, son destacables el "Reguerón" murciano de *Sebastián Ferignán*, derivación del bravo *Guadalentín* al *Segura*, de 1745, o la presa de *Puentes* en una unión de afluentes del *Guadalentín*, diseñada y construida por un autodidacta, *Jerónimo Martínez de Lara*,⁸ que sifonada por el cemento en 1802, produjo una riada con 608 muertos. El embalse de *Valdeinfierno*, en el *Luchena*, estaba colmatado en sus dos tercios a su conclusión en 1806 por la alta erosionabilidad de la cuenca vertiente. El período ilustrado se fijó como prioridad fundamental la navegación interior, casi irrealizable por la climatología y el relieve peninsular, (Canal de *Castilla*, finalización del *Canal Imperial*, proyectos quiméricos como el *Guadarrama-Sevilla*), los regadíos y la energía hidráulica.

1.3.- La lucha en la Era Industrial

Durante la primera mitad del XIX, la ruina provocada por la Guerra de la Independencia, el claro retraso del país en el desarrollo y la inestabilidad política propiciaron una baja actividad.⁹ Un positivo elemento, fue la constitución del *Cuerpo Facultativo de Caminos* en 1799 y la *Escuela correspondiente* en 1802, obra de *Agustín de Betancourt*, ilustrado ingeniero polivalente, que posibilitó la formación de hidrólogos fluviales de base científica e ingenieros

hidráulicos que diseñaran obras estables y evitaran desastres como el de Puentes.

A lo largo del XIX, hubo no obstante *dos factores que retrasaron* las actuaciones, especialmente en el campo de las presas. El primero fue la *ideología del Estado liberal* contraria a la intervención pública en la Economía. Así, en 1899, un ingeniero de caminos de la talla de *Eduardo Saavedra*, votaría en la Junta Consultiva de Caminos, Canales y Puertos contra el Avance elaborado por el Cuerpo de un Plan General que asumiría y aprobaría el ministro de Fomento *Gasset* en 1902, por ser contrario a la intervención pública.¹⁰ El triunfo del intervencionismo público en el sector fue bueno para la lucha contra las inundaciones, pero es discutible lo fuera para la racionalidad económica a largo plazo, poco amiga del paternalismo estatal y las subvenciones, y para el progreso de la ordenación del uso del suelo.

El otro factor, fue la *discusión de carácter científico con fuerte trasfondo de control corporativo de la Política del Agua, entre los ingenieros de caminos y los de montes*. En síntesis, los ingenieros de montes defendían que la repoblación forestal era la herramienta fundamental para regular y aumentar los recursos hídricos, junto al control de la erosión y laminación de avenidas; los ingenieros de caminos argüían en contra de estas ideas y colocaban en el punto central la construcción de presas. Esta polémica, prácticamente carente de datos instrumentales foronómicos o de balance hídrico que la soportaran, se saldó en el XIX con la victoria parcial de las tesis forestales, materializada en el Real Decreto de 3/2/1888 que establecía un "*Plan sistemático de repoblación de cabeceras de cuencas hidrográficas*" y la creación en 1901 del Servicio Hidrológico Forestal de la Nación.¹¹ El regeneracionismo de *Costa, Mallada y Picavea*, partidario de la intervención pública y propagandista incansable de los regadíos como palanca fundamental de la regeneración de España (con aguas superficiales y *subterráneas*) acabaría inclinando indirectamente la polémica hacia las tesis hidraulicistas (a pesar de la creencia entonces generalizada de los bosques como inductores importantes de lluvia, compartida por los regeneracionistas), tras la oleada regeneracionista que invadió el país en 1898 exigiendo soluciones inmediatas, ya que las tesis forestalistas exigían largos pla-

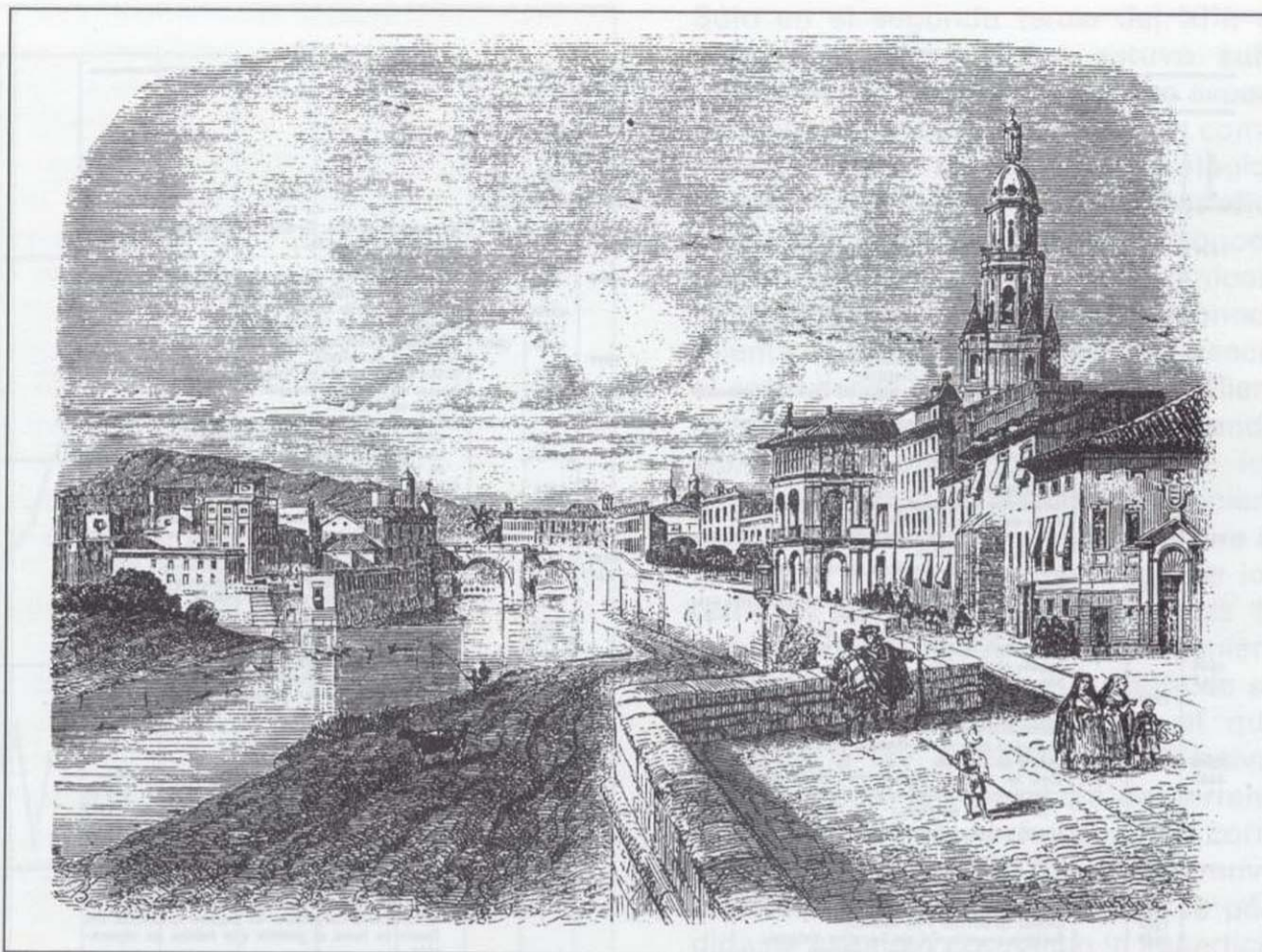


Fig. 3. Las canalizaciones como ésta del Segura en Murcia capital a mediados del XIX, han sido la solución tradicional a la laminación de avenidas de períodos de retorno bajos a medios en los núcleos urbanos.

zos para comprobarse y materializarse en su caso. La polémica virulenta en los años 10 en torno a los Congresos Nacionales de Riegos, zanjada salomónicamente por *Lorenzo Pardo*, dista de haber concluido, debido al avance de los datos instrumentales, que han minorado la importancia de la vegetación.^{13,1}

El Plan Gasset de 1902, que supone el triunfo de las tesis de los ingenieros de caminos, "*Plan General de Riegos y Pantanos*", es el primer Plan integral en torno a la Política del Agua Superficial, que hasta el nonato Plan Hidrológico de 1993, se concebiría básicamente como política de obras, más que como política de gestión del recurso. Índice de la aceleración constructiva, es que de 1841 a 1900 se terminaron 17 presas; de 1900 a 1913, 93.¹⁵ Resulta obvio sin embargo, que el Plan Gasset y los sucesivos, como el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933 elaborado bajo la dirección del ilustre ingeniero de caminos *Manuel Lorenzo Pardo* (auténtico creador de las Confederaciones Sindicales Hidrográficas en 1926)²⁶ en el Centro de Estudios Hidrográficos creado ad-hoc por encargo del Ministro de Fomento socialista *Indalecio Prieto*, o el Plan de Obras Hidráulicas de *Franco*,

tuvieron como resultado un progresivo incremento de la capacidad de embalse y en definitiva un claro efecto laminador de avenidas, especialmente en los medios y grandes ríos. La capacidad de embalse se multiplicaría en el período 1948-1990 por 8,5,¹⁷ de 5.764 hm³ a 48.951 hm³, con una clara tendencia a los rendimientos decrecientes de cara a la eficiencia en el almacenamiento del agua desde 1960, como prueba el progresivo desfase capacidad teórica-lleñado real que puede apreciarse en la Figura adjunta, pero que en todo caso supone una mayor capacidad laminadora de avenidas. Esta acción ha supuesto la regulación de más de un tercio de la aportación anual, mejorando la regulación natural, sólo el 8%¹⁸, a costa de una ingente inversión pública (sólo el nonato Plan Hidrológico Nacional de 1993 contemplaba inversiones de más de 6 billones de pesetas, más del triple de la reconversión del sector eléctrico), cuya racionalidad ambiental y económica fue muy contestada y obligó a la retirada del Plan.

Gracias a este ingente esfuerzo durante todo el siglo XX, las inundaciones desastrosas en las cuencas grandes y medias en términos humanos, han sido

LAS AGUAS DE ESPAÑA			LAS AGUAS DE ESPAÑA		
Años	Tipos de desastres	Descripción	Años	Tipos de desastres	Descripción
1486	Terremoto	Terremoto, huracán y riada en Sevilla. Fue muy seco el invierno de 1472 a 74.	1696	Terremoto	Terremoto en Sevilla. Se heló el Mediterráneo en Valencia y en Marbella.
1487	Neve	Neve durante veinte días en Zamora.	1698	Sequia	Sequia en Zamora, que se extendió a Galicia y Portugal en los años siguientes 99, 97 y 96.
1488	Hambre	Hambre, peste y riada en Sevilla y en Bilbao.	1699	Riada	Riada en Sevilla en 1698 y 97.
1489	Riada	Riada del Tago en Salamanca.	1700	Riada	En 1697 riada del Duero en Zamora.
1490	Grandes lluvias	Grandes lluvias e inundaciones generales.	1701	Grandes lluvias	Grandes lluvias, hambre y peste en Segovia.
1491	Grandes lluvias	Grandes lluvias e inundaciones y hambres en Castilla y Andalucía.	1702	Sequia	Sequia en Andalucía.
1492	Riada	Riada del Tago en Salamanca.	1703	Riada	Riada en 8 de año en Valladolid y en Sevilla.
1493	Sequia	Sequia y hambre en Castilla.	1704	Riada	Riada en Sevilla y Badajoz.
1494	Grandes temporales	Grandes temporales de agua en Castilla. Terremoto y riada en Sevilla.	1705	Sequia	Sequia en Castilla.
1495	Sequia	Sequia, hambre y peste en toda España. Este fue conocido por el nombre «año del hambre». Se secaron muchos cauces y ríos. Hubo que trazar trigo de Sicilia y Roma.	1706	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1706, 7 y 8, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1706 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1497	Riada	Riada en Sevilla.	1707	Sequia	Sequia en Castilla.
1498	Inundación	Inundación en Ciudad Real.	1708	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1708, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1708 y 6, Riada en Valladolid en 1704.
1499	Riada	Riada del Pisuerga en Valladolid.	1709	Sequia	Sequia en Castilla.
1500	Hambre	Hambre y carestía en Castilla hasta la siega. Después grandes azacaes.	1710	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1710, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1710 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1501	Sequia	Sequia y peste en Sevilla a principio de año.	1711	Sequia	Sequia en Castilla.
1502	Riada	Riada en Sevilla.	1712	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1712, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1712 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1503	Riada	Riada en Valladolid, Burgos y Toledo.	1713	Sequia	Sequia en Castilla.
1504	Riada	Riada en Valladolid, Burgos y Toledo.	1714	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1714, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1714 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1505	Sequia	Sequia en Castilla.	1715	Sequia	Sequia en Castilla.
1506	Sequia	Sequia en Valladolid y Zamora a principios de año.	1716	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1716, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1716 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1507	Lluvias	Lluvias generales en Andalucía y Castilla durante todo el año. Inundaciones en Toledo.	1717	Sequia	Sequia en Castilla.
1508	Lluvias	Lluvias e inundaciones en Andalucía y Castilla.	1718	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1718, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1718 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1509	Sequia	Sequia en Zamora.	1719	Sequia	Sequia en Castilla.
1510	Sequia	Sequia en Zamora.	1720	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1720, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1720 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1511	Sequia	Sequia en Zamora.	1721	Sequia	Sequia en Castilla.
1512	Sequia	Sequia en Zamora.	1722	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1722, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1722 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1513	Sequia	Sequia en Zamora.	1723	Sequia	Sequia en Castilla.
1514	Sequia	Sequia en Zamora.	1724	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1724, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1724 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1515	Sequia	Sequia en Zamora.	1725	Sequia	Sequia en Castilla.
1516	Sequia	Sequia en Zamora.	1726	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1726, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1726 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1517	Sequia	Sequia en Zamora.	1727	Sequia	Sequia en Castilla.
1518	Sequia	Sequia en Zamora.	1728	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1728, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1728 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1519	Sequia	Sequia en Zamora.	1729	Sequia	Sequia en Castilla.
1520	Sequia	Sequia en Zamora.	1730	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1730, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1730 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1521	Sequia	Sequia en Zamora.	1731	Sequia	Sequia en Castilla.
1522	Sequia	Sequia en Zamora.	1732	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1732, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1732 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1523	Sequia	Sequia en Zamora.	1733	Sequia	Sequia en Castilla.
1524	Sequia	Sequia en Zamora.	1734	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1734, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1734 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1525	Sequia	Sequia en Zamora.	1735	Sequia	Sequia en Castilla.
1526	Sequia	Sequia en Zamora.	1736	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1736, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1736 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1527	Sequia	Sequia en Zamora.	1737	Sequia	Sequia en Castilla.
1528	Sequia	Sequia en Zamora.	1738	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1738, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1738 y 8, Riada en Valladolid en 1704.
1529	Sequia	Sequia en Zamora.	1739	Sequia	Sequia en Castilla.
1530	Sequia	Sequia en Zamora.	1740	Grandes lluvias	Grandes lluvias en Zamora con riada del Duero en 1740, 7 y 6, causando con ellas graves averías en el puente. Riada en Sevilla en 1740 y 8, Riada en Valladolid en 1704.

Fig. 4. El ingeniero de minas de la Comisión del Mapa Geológico Horacio Bentabol, realizó en 1900 un inventario histórico de inundaciones, sequías y otros desastres naturales.

prácticamente vencidas salvo para las correspondientes a períodos de retorno grandes, por encima de los 100-200 años, como puso de relieve el caso de la presa de Tous en 1982.

Durante la segunda mitad del XIX, las diversas catástrofes motivaron a menudo actuaciones de defensa.¹⁹ Así, las inundaciones del Júcar en 1864 produjeron un informe del ingeniero de caminos Gómez Ortega que recomendaba canalizaciones.²⁰ La riada de Sta. Teresa en el Segura de 1879 que produjo 800 muertos, motivó un minucioso estudio del ingeniero de minas de la Comisión del Mapa Geológico Federico de Botella con recomendaciones para su mitigación.²¹ Así mismo, fue el origen (junto a la riada de la Ascensión de 1884) de un importante trabajo de los ingenieros de caminos Ramón García Hernández y Luis Gaztelu en 1886, el "Proyecto de obras de defensa contra las inundaciones en el Valle del Segura", primer plan integral en este campo. En él, ambos ingenieros analizan las diversas técnicas existentes concluyendo que lo más acertado es una adecuada combinación de las mismas, conclusión

válida cien años después.¹³ El proyecto, se llevaría a la práctica a partir de 1890. También motivaría un "avisador eléctrico de avenidas" patentado por el ingeniero de caminos Arturo Soria, más conocido como creador de la "Ciudad Lineal".

La evolución de la Tecnología de presas (que de la mampostería evolucionó a la del hormigón, que dominaría hasta entrados los 60, y las modernas presas de tierra posibilitadas por el desarrollo de la Mecánica de Suelos y la maquinaria de movimientos de tierra) ha jugado un papel importante en la mitigación de estos desastres. En los 90, el SAIH, Sistema Automático de Información Hidrológica, está suponiendo un gran avance para la mitigación en ríos grandes y medios, aunque dados los cortos tiempos de concentración de las avenidas torrenciales que en pequeñas cuencas en España producen hoy la práctica totalidad de los muertos, no es probable

(*) Tiempo de concentración: aproximadamente, tiempo en que se alcanza el caudal máximo en una avenida.

tenga efecto significativo sobre este aspecto, que reclama más bien la estricta aplicación de la legislación existente prohibiendo la construcción en las áreas inundables torrenciales de edificaciones vulnerables (campings, viviendas de un piso, fábricas, etc.). En general, el énfasis en la obra, especialmente presas, retrasó la puesta en marcha de criterios de ordenación urbana en la línea p.e. de EE.UU. desde los 60.

Un aspecto destacable desde 1860, es la legislación general sobre avenidas, con importantes precedentes medievales en el Fuero Juzgo (¿654?) y las Siete Partidas.²² Así el Real Decreto de 19/4 de 1860, que regula provisionalmente con carácter previo a la primera Ley de Aguas, la de 1866, establece los criterios para las aguas torrenciales, con el doble propósito de asegurar el uso del agua y mitigar las crecidas. La de 1879, vigente hasta 1985, reconoce los beneficios derivados del abancalamiento en sus artículos 70 y 71, y regula la utilización de las turbias en la Sección Cuarta, aspectos no tenidos en cuenta en la Ley de 1985. Debe señalarse también la Ley de Canales y Pantanos de 1870.

En 1958, el Reglamento de Policía de Aguas, prohibía la construcción en "los cauces públicos que queden en seco" como las ramblas, prohibición que ha sido violentada con frecuencia con resultados catastróficos como en las ramblas de Albuñol (Granada) o Puerto Lumbreras (Murcia) en 1973. Esta catástrofe está en la base del Decreto 2.508 de 1975 estableciendo que el Ministerio de Obras Públicas determinaría las zonas inundables con período de retorno de 500 años, entendiéndose que en su defecto comprendía 100 metros a cada lado del álveo del cauce, labor que tampoco se llevó a cabo hasta el proyecto LINDE en los 90. Estos criterios han sido recogidos en la legislación hoy vigente, la Ley de Aguas de 1985 y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que establece en su artículo 9 limitaciones de uso en la zona de policía de 100 metros a cada lado del cauce.

La creación de la Comisión Nacional de Protección Civil y la Dirección General en 1980, junto a la Ley de Protección Civil de 1985, han permitido la organización a nivel nacional, autonómico y local de este vital servicio a la comunidad, y la elaboración de unas Directrices Básicas sobre diversos riesgos naturales: inundaciones, sísmico y volcánico

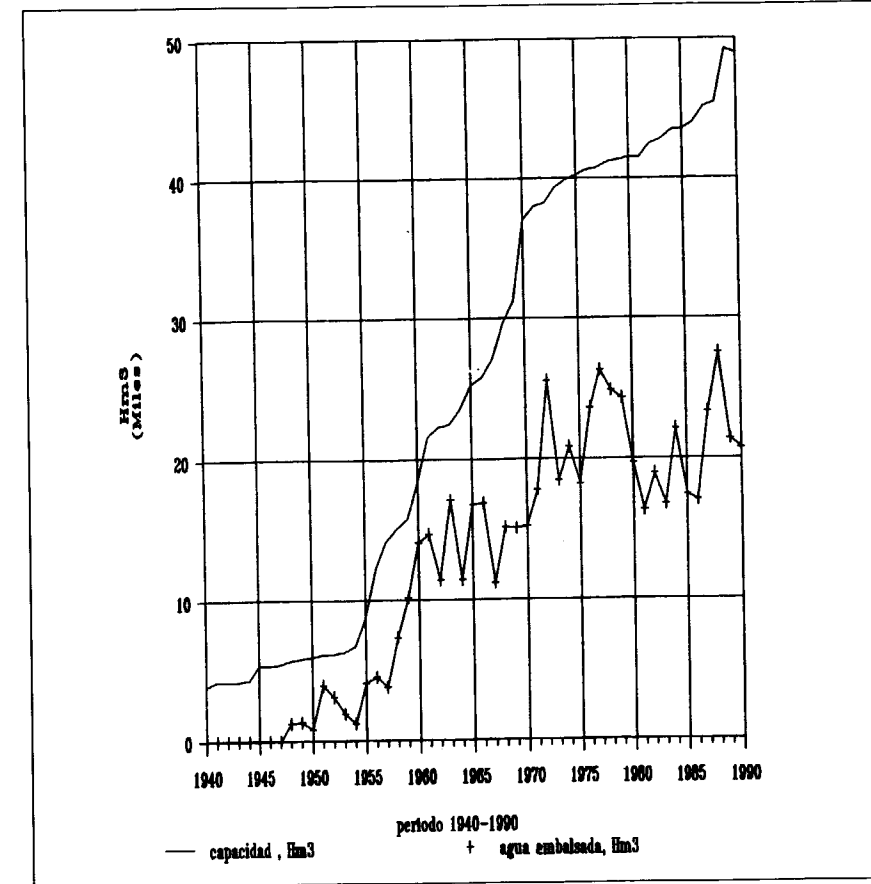


Fig. 5. Evolución de la capacidad de embalse y el agua embalsada en España, 1948-1990, que hacen al país el primero de Europa en este aspecto. Obsérvense los rendimientos decrecientes del sistema de embalses desde 1960, con el consiguiente aumento de costos del agua superficial de un lado, y de otro una mayor eficacia para laminar avenidas. (D.G. de Obras Hidráulicas, 1994).

en los años 95 y 96. En los 80, el Instituto Geológico y Minero de España en el campo de los mapas de peligrosidad por inundaciones (cuya validez han confirmado recientemente los casos de Biescas, Badajoz o Ecija cara a la previsión espacial), y la Dirección General de Obras Hidráulicas en el inventario histórico y de puntos conflictivos, llevaron a cabo coordinadamente con Protección Civil valiosos trabajos.

Las recientes inundaciones de Biescas (Huesca) en 1996 y Badajoz en 1997 con 87 y 25 muertos respectivamente cuestionaron los criterios estructurales de lucha contra inundaciones, y la inminente reforma de la Ley del Suelo parece va a recoger por fin el estudio de los riesgos.

2.- DESLIZAMIENTOS Y DESPRENDIMIENTOS

Los deslizamientos del terreno al romperse las laderas o taludes por corte y los desprendimientos de bloques rocosos, se dan principalmente en las áreas montañosas, especialmente cantábricas, pirenaicas y béticas, o en relieves más o menos acantilados. La acción humana, al excavar para explotaciones mineras o carreteras principalmente, produce también este tipo de movimientos, que hoy vienen a suponer, de acuerdo con las estadísticas del ITGE, junto a los aludes de nieve la muerte anual de 6 personas y pérdidas de unos 6.000 millones de pesetas. Un desprendimiento de una masa yesífera en Azagra (Navarra) produjo en 1874 casi un centenar de muertos.

Sólo en el segundo tercio del XIX, el conocimiento geológico estuvo suficientemente desarrollado en sus aspectos estratigráficos y tectónicos como para permitir la modelización geológica de los deslizamientos allí donde los afloramientos eran suficientes. El conocimiento de los aspectos mecánicos, requirió más tiempo, a pesar del conocimiento de la ley general de la resistencia al corte desde 1776 gracias al ingeniero militar francés Coulomb o de las condiciones del equilibrio plástico de los terrenos desde 1857 gracias al ingeniero inglés Rankine. Ello fue debido a que el papel del agua en la mecánica de los terrenos sólo fue clarificado tras la publicación en 1925 por el ingeniero mecánico austriaco Karl Terzaghi de su libro "Erdbaumechanik", en el que exponía la ley de la presión efectiva, según la cual la resistencia del terreno por fricción ante esfuerzos de corte como los producidos en estos movimientos, resulta disminuida por la pérdida de esfuerzo normal en la superficie de corte en la misma cuantía que la presión del agua intersticial.

Previamente, sin embargo, se habían desarrollado esfuerzos para la modelización mecánica de deslizamientos sencillos por la estratificación en Suiza, y Fellenius, había desarrollado un sistema para analizar roturas circulares por la base en arcillas en los ferrocarriles suecos, que permitía un análisis en tensiones totales al resistir sólo por cohesión, el método de las dovelas. Taylor, en 1937, desarrollaría ábacos de estabilidad, pero el análisis riguroso debería aguardar el desarrollo de métodos como los de Janbu y Bishop en 1954 y 1955 respectivamente que se verían fuertemente potenciados por su informatización en los 60, al igual que los métodos de elementos finitos de la mano de Zienkiewicz. La Mecánica de Rocas, se desarrolló fuertemente en los 50 y 60 al impulso de las grandes minas a cielo abierto y subterráneas, las presas y los túneles.

Durante los siglos XVIII y XIX los ingenieros que se vieron enfrentados al problema utilizaban principalmente muros de contención (para cuyo cálculo Coulomb había desarrollado un método que aún se emplea), galerías y pozos drenantes; en el caso de los desprendimientos, se provocaba la voladura, o al igual que en los deslizamientos, se evitaban, estrategia que aún hoy sigue siendo la mejor. Con el desarrollo de la tecnología de perforación y sondeos,

apareció ya en el siglo XX, la posibilidad de drenar con sondeos subhorizontales, los drenes californianos, o de "coser" con bulones o anclajes, o de inyectar. El desarrollo de la maquinaria de movimientos de tierras moderna en los años 30 y 40, posibilitó la estabilización por desmontes en cabecera.

A continuación se exponen algunos datos históricos procedentes buena parte, de una investigación llevada a cabo en el Instituto Tecnológico Geominero de España, por **Ernesto Gallego Valcárces** y **Mercedes Ferrer**.²³

En España, en 1864, el ingeniero de minas **Casiano de Prado** (1797-1866), hacía referencia en su Memoria geológica sobre Madrid a los "derrumbes y deslizamientos del terreno", describiendo correctamente los de Oreja (1851) y Olmeda de la Cebolla (1864),²⁴ y el francés **Edouard Lallou**, en un trabajo describiendo la problemática y soluciones aplicadas en el tramo de Beasain del Ferrocarril del Norte, ponderaba la importancia del drenaje en la estabilización y la necesidad de hacer "cunetas de circunvalación" en las laderas.²⁵ En 1875, el ingeniero de minas **Justo Egozcue** analizó un movimiento en Arnedillo (Rioja), atribuyéndolo incorrectamente a una explosión de gases.²⁶ En 1881, se produjo una reactivación de un deslizamiento en Puigcerdá que motivó dos artículos de sendos ingenieros de minas, **Luis Mariano Vidal** (1842-1922), destinado en Cataluña²⁷, y **Daniel Cortázar** (1844-1927), de la Comisión del Mapa Geológico,²⁸ y del ingeniero de

caminos destinado en Lérida **Luis Corsini**.²⁹ Vidal insistió, como Corsini, en una causa ligada "a la pérdida de cohesión de las tierras por exceso de humedad", y hundimiento de oquedades subterráneas, mientras Cortázar subrayó la importancia de las lluvias precedentes y la posibilidad de fenómenos volcánicos. Vidal recomendó cambiar el pueblo (40 casas) de ubicación por entender que era muy problemático parar el movimiento, y Corsini recomendó repoblar para "reducir la intensidad de las corrientes" (subterráneas). El conjunto de estos trabajos evidencia el limitado desarrollo del conocimiento existente en España a fines del XIX, lo que no impidió llevar a cabo soluciones técnicas basadas en la observación y reflexión probablemente poco optimizadas.

En 1897, el ingeniero de caminos **Narciso Puig de la Bellacasa**,³⁰ expuso las obras de contención utilizadas en el Ferrocarril Huesca-Francia, muros drenantes principalmente, y atribuyó los deslizamientos observados a los horizontes meteorizados, dando un conjunto de recomendaciones para evitar los problemas.

En 1903, el ingeniero de caminos **Sr. Fatjo**³¹ y el de minas **Sr. Fonrodona**³², analizaron sucintamente un deslizamiento de unas 3 ha, ocurrido en Serchs, atribuyéndolo al reblandecimiento del manto arcilloso por las copiosas lluvias.

El naturalista **Darder** y **Pericós** analizaría un deslizamiento del Triás en Fornalutx,

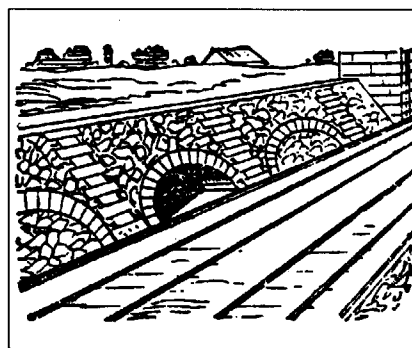


Fig. 7. Estabilización de un desmonte con muro de arquería (Pelayo Clairaut, 1877).

Mallorca en 1924³³; y otro naturalista, **Giménez de Aguilar**, estudiaría otro similar en 1930 en Villora, Cuenca³⁴. **Francisco Hernández-Pacheco**³⁵, estudiaría en 1952 los grandes deslizamientos ("argayos") cercanos a Ventas de Baños (Palencia) en las formaciones miocenas. Un ingeniero de caminos, **Clemente Sáenz padre**, realizó un detenido análisis en los 50 de los deslizamientos de Alcoy, con análisis de estabilidad por el método del círculo de rozamiento, quizá aplicado por primera vez en España.

El verdadero desarrollo del conocimiento, arranca en los 60 en España. A fines de los 60, los Estudios Previos de Terrenos para carreteras elaborados por el Servicio Geológico de Obras Públicas, incorporaron sistemáticamente la cartografía de peligrosidad de base geomorfológica. La primera cartografía cubriendo todo el país a una escala 1.400.000 en este aspecto, fue realizada por el Instituto Geológico y Minero de España en los 70, el Mapa Geotécnico General. Ambas instituciones y el CEDEX, junto a diversas Universidades y Escuelas (Caminos, Minas, Geológicas), han desarrollado notablemente el conocimiento del país y los procesos. A nivel científico-técnico, la constitución de la Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería a comienzos de los 70, y especialmente la consolidación de los Simposios Nacionales de Taludes y Laderas Inestables desde 1983, han posibilitado el encuentro de los especialistas, que en 1996 han organizado la VI Conferencia Internacional sobre Deslizamientos, prueba de la madurez alcanzada. Las técnicas de estabilización, gracias a las grandes obras viarias de los 80, o las grandes

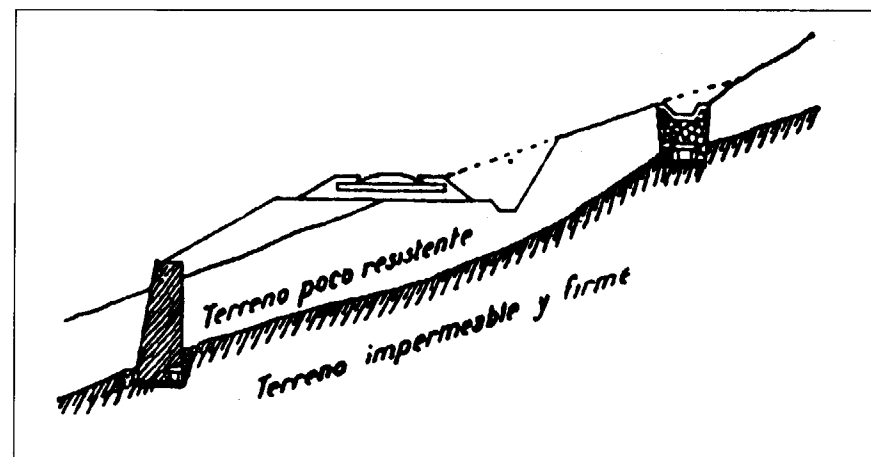


Fig. 6. Sistema de estabilización de laderas con dren de intercepción y muro de contención utilizado en el F.C. Huesca-Francia. (N. Puig de la Bellacasa, 1897).

minas a cielo abierto, han mejorado espectacularmente. No obstante, las actuaciones preventivas, de evitación, siguen resintiéndose de falta de cartografías a escala media.

Un efecto positivo del mejor conocimiento científico de los deslizamientos, fue la posibilidad de optimizar el diseño de las presas de tierra, que a partir de los 60 han experimentando en España un fuerte incremento relativo contribuyendo a una mayor laminación de las avenidas.

El conocimiento científico de los aludes en España, ha sido desarrollado por la Universidad Autónoma de Madrid, el Servicio Geológico de Catalunya, la Universidad de Barcelona y el ITGE, a partir de los 80.

REFERENCIAS

- GENOVES, JOSE CARLES (1989). *Prevención y control de inundaciones*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas". Armando Alberola Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- BENTABOL, HORACIO (1900). *Las aguas de España y Portugal*. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España. Tomo V, 2ª Serie. Edic. facsímil del ITGE en 1995.
- ARENILLAS, MIGUEL Y SAENZ, CLEMENTE (1987). *Los Ríos. (Guía Física de España, 3)*. Alianza Editorial. Madrid
- MORALES GIL, ALFREDO Y BOX, MARGARITA (1995) *Boqueras y azudes: el aprovechamiento exhaustivo de las aguas esporádicas en el Sureste peninsular*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- GARCIA TAPIA, NICOLAS (1992). *Del Dios del Fuego a la máquina de vapor*. Ed. Ambito. Valladolid.
- NAVARRO, JOSE RAMON (1995). *De Tibi a Isber. Cuatrocientos años de presas históricas alicantinas*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- LOPEZ GOMEZ, ANTONIO (1995). *Las presas españolas del siglo XVI. Antecedentes e innovaciones revolucionarias*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- HERNANDEZ FRANCO, JUAN; GRIS, JOAQUIN Y MULA, ANTONIO, J. (1989). *Avenidas y obras hidráulicas en el Guadalentín (siglos XVII-XIX)*. In "Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo". Itto. Univ. de Geografía. Univ. de Alicante.
- GIL OLCINA, ANTONIO (1972). *Embalses españoles de los siglos XVIII y XIX para riego*. Estudios Geográficos 129.
- SAENZ RIDRUEJO, FERNANDO (1993). *Los ingenieros de caminos*. Col. de Ing. de Caminos. Madrid.
- GOMEZ MENDOZA, JOSEFINA Y ORTEGA CANTERO, NICOLAS (1989). *Inundaciones históricas y la génesis de la acción hidrológico-forestal en España (1855-1933)*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- LOPEZ ONTIVEROS, ANTONIO (1995). *Situación y Planificación de las obras hidráulicas en España según los Congresos Nacionales de Riegos (1913-1934)*. In "Planificación Hidráulica en España", Gil Olcina, A. y Morales, Gil, A. Edit. Fundac. Caja del Mediterráneo.
- LLORENS, PILAR (1993). *Hydrological implication of afforestation of abandoned lands: water balance simulation of a small Mediterranean mountainous basin*. In "Assesing Hydrological Changes", Llorens, P. y Gallart, F. Acta Geológica Hispánica v. 28, nº 2 y 3. Barcelona.
- GARCIA RUIZ, JOSE; WHITE, SUE M.; MARTI, CARLOS; VALERO, BLAS; ERREA, Mª PAZ Y GOMEZ VILLAR, AMELIA (1996). *La Catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal*. CSIC. Itto. Pirenaico de Ecología. Zaragoza.
- BELLO, SEVERINO (1913). *Coste de las Obras Públicas en España*. I Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza.
- FRUTOS, LUISA Mª (1995). *Las Confederaciones Sindicales Hidrográficas (1926-1931)*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- Mª DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (1994). *Estadística sobre embalses y producción de energía hidroeléctrica en 1990 y años anteriores*. D.G. de Obras Hidráulicas. Madrid.
- Mª DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (1993). *Plan Hidrológico Nacional*. D.G. de Obras Hidráulicas. Madrid.
- LEMEUNIER, G. Y PEREZ PICAZO, M.T. (1989). *La sociedad murciana frente a las inundaciones (1450-1900)*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- MATEU BELLES, JOAN F. (1995). *Planificación Hidráulica de las Divisiones Hidrológicas (1865-1899)*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- DE BOTELLA, FEDERICO (1879). *Inundaciones y Sequías*. Bol. de la Sociedad Geográfica de Madrid. Tomo X. 1881.
- MORALES GIL, ALFREDO; BOX, MARGARITA Y MARCO MOLINA, JUANA. (1981). *El aprovechamiento de las aguas de avenida*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (1994). *Scientific and Technical Notes on historical landslides in Spain until 1950*. MEFISST Project, Task 1, CEC, Inf. no publicado. Area de Ingeniería Geoambiental.
- DE PRADO, CASIANO (1864). *Des-*

- cripción Física y Geológica de la provincia de Madrid. Junta de estadística. Madrid. Edic. facsimil del Colegio de Ing. de Caminos en 1975.
25. LALLOUR, EDOUARD (1864). *Observaciones prácticas sobre la estabilidad y consolidación de las obras de tierra*. Rev. de Obras Públicas nº 17. Madrid.
26. EGOZCUE, JUSTO (1875). *Nota sobre la constitución geognóstica del suelo de Arnedillo y explicación de un accidente que se supone volcánico*. Bol. de la Comisión del Mapa Geológico de España. Tomo II. Madrid.
27. VIDAL, LUIS MARIANO (1881). *Acerca de los hundimientos ocurridos en la Cuenca de Tremp (Lérida) en 13 de enero de 1881*. Bol. de la Comisión del Mapa Geológico de España. Tomo VIII. Madrid.
28. CORTAZAR, DANIEL (1881). *El hundimiento de Puigcercós en 13 de Enero de 1881*. Bol. de la Comisión del Mapa Geológico de España. Tomo VIII. Madrid.
29. CORSINI, LUIS (1881). *Sobre los hundimientos ocurridos en Puigcercós*. Rev. de Obras Públicas. Tomo XXIX, nº 11. Madrid.
30. PUIG DE LA BELLACASA, N. (1897). *Obras de consolidación de la línea de Huesca a Francia por Canfranc*. Rev. de Obras Públicas. tomo II, Serie 7ª, nº 1. Madrid.
31. FATJO (1903). *Los hundimientos de Serchs*. Rev. de Obras Públicas. Tomo II, nº 1424. Madrid.
32. FONTRDONA (1903). *Los hundimientos del terreno en la provincia de Barcelona*. Rev. Minera, Metalúrgica y de Ingeniería. Tomo LIV. Madrid.
33. GIMENEZ DE AGUILAR, J. (1930). *El deslizamiento de tierras de Villora (Cuenca)*. Conf. y Reseñas Cient. de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Tomo V (2). Madrid.
34. HERNANDEZ-PACHECO, FRANCISCO (1952). *Los grandes argayos de las cuevas del Mioceno de Castilla la Vieja*. Bol. de la Sociedad Española de Hª Natural, Tomo I, nº 1. Madrid.
35. GONZALEZ TASCON, IGNACIO (1995). *Ciencia y Técnica Hidráulicas en la España del Quinientos*. In "Cuatro siglos de técnica hidráulica en tierras alicantinas", Armando Alberola. Ed. Inst. de Cultura Juan Gil-Albert, Diput. Provinc. de Alicante.

LA CONSERVACION DEL PATRIMONIO MINERO METALURGICO EUROPEO: INVENTARIO, ACTUACIONES DE CONSERVACION, ARCHIVOS Y MUSEOS.

Por O. PUCHE RIART y L. F. MAZADIEGO MARTINEZ (*)

RESUMEN

Se relacionan las principales actuaciones europeas en el campo del Patrimonio Minero-metalúrgico. En este continente unas quinientas minas antiguas y su entorno se han configurado como museos histórico minero, minas museos, museos del territorio, ecomuseos, espacios naturales protegidos, parques recreativos, etc. Al ser la minería, durante todos los tiempos, uno de los pilares básicos de la economía, quedan restos patrimoniales importantes. No sólo se trata de bienes muebles e inmuebles, sino de las raíces culturales de las comunidades donde se asentaban las explotaciones. Ahora urge la recuperación de todo este conjunto.

LOS PRIMEROS MUSEOS Y EXPOSICIONES HISTORICO-MINERAS.

En 1790, aparece en Francia la primera Instrucción para el inventario de máquinas, planos y documentos con valor histórico. Poco después se crearía el *Conservatoire des Arts et Métiers* de París (1791), considerado el primer museo técnico del Mundo (1). Algo parecido se haría, poco después, en Londres.

El otro ejemplo pionero que tenemos, en esta línea, procede de España; se trata de la Real Orden de 15 de marzo de 1850 para la creación del *Museo Industrial*. Pero el proyecto se quedó en

(*) E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.

los papeles, por el déficit que iban acumulando los presupuestos del Estado. La consolidación de tal Museo hubiera permitido la conservación de numerosos útiles y máquinas de la Minería, ya que debía contar con una sección dedicada a esta rama de la Economía (2).

En España, a mediados del XIX, hubo un gran auge de la Minería que llegaría a sus cotas más altas hacia finales del siglo pasado-principios del XX. Esto supuso la puesta en marcha de innumerables labores antiguas, muchas de ellas de época romana, en las que apareció valioso material arqueológico. En 1845, JOAQUIN EZQUERRA DEL BAYO propone que se conserven varios hornos antiguos que habían aparecido en unos escoriales del Campo de Cartagena y, en 1858, Revista Minera daba la noticia del descubrimiento de un horno antiguo de fundición en la provincia de Huelva que pensaba ser conservado por el Director de Minas de Tharsis. En dicho contexto se empezó a formar el primer *Museo Arqueológico-Minero* que tengamos noticias, obra de FEDERICO BOTELLA Y HORNOS, Ingeniero Jefe del Distrito Minero de Murcia. Según artículo anónimo publicado en *Revista Minera* (1862): "Se ocupa de formar en Cartagena un Museo arqueológico en que figuren todos los objetos que se encuentren en las excavaciones y terrenos antiguos..." (3). En la misma zona, cuenta FELIPE NARANJO (1865) que en la mina San Juan Bautista, de la Sociedad "El Fraile", había un verdadero museo de antigüedades romanas encontradas en las explotaciones (4).

Asimismo, en 1864, RAMON RUA DE FIGUEROA (5) señala que: "Es sensible que en nuestra Escuela de Minas (de Madrid) 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". El autor no expone una idea original suya, sino que reproduce lo expresado en la obra de FOURNET (6).

El ingeniero de minas CASIANO DE PRADO, gran aficionado a la Arqueología, fue quien descubrió por primera vez el Paleolítico en España, en 1862, e inició las primeras expediciones arqueológico-mineras, tal es el caso de la visita a Cerro Muriano, en 1866. Encargado de organizar, por parte española, la Sección de Minería de la *Exposición Internacional de París* (1867), reclama, a los Jefes de Distrito, no sólo minerales, sino útiles arqueológicos encontrados en las minas y en cavernas. Debido a la muerte de PRADO, estos objetos fueron presentados por su compañero AMALIO MAESTRE. La colección formada fue a parar a la Escuela Especial de Ingenieros de Minas de Madrid, constituyendo una de las primeras colecciones arqueológicas donde se expusieran materiales antiguos procedentes de minas (7).

Tales certámenes siguieron en esta línea, así en la *Exposición Internacional de Viena* (1873) en la Sección 2ª, Minería, se incluyeron los objetos prehistóricos (Grupo 7ª). Al ubicarse la

Arqueología en la Sección Minera, con estos materiales se mezclaban los útiles históricos mineros. También en la **Exposición Nacional de Minería, Artes Metalúrgicas, Cerámica, Cristalería y Aguas Minerales de Madrid (1883)** hubo una gran exhibición de materiales arqueológico-mineros, pongamos sólo el ejemplo de lo presentado por la Escuela de Minas de Madrid (8):

- 1. Hachas de Madrid, Jaén, Horcajo, Olmedilla, etc.
- 2. Puntas de lanza de Madrid.
- 3. Idem de flecha de idem.
- 4. Martillos de Sierra Morena, Plasenzuela, Oviedo.
- 5. Cráneo humano de la mina El Milagro (Onís).
- 6. Mandíbula humana de idem.
- 7. Entibación de mina, en madera de pino, de Río Tinto.
- 8. Lámparas de mina romanas y árabes de Río Tinto, Cartagena y Hellín.
- 9. Vasos de tierra de Hellín y Río Tinto.
- 10. Pateras de idem, de Pedroso e idem.
- 11. Lacrimorios de Río Tinto, Cartagena y Villaricos.
- 12. Vajilla de barro de Sierra Almagrera.
- 13. Tapón de ánfora de Cartagena.

Asimismo, se remitieron objetos mineros antiguos, desde la Escuela, a las **Exposiciones Universales de Sevilla y Barcelona (1929)** (9).

De todas formas, el primer gran museo minero tal vez haya sido el **Deutsches Bergbau-Museum de Bochum**, situado en el centro de la gran cuenca minera del Ruhr, siendo inaugurado en 1930. Desde sus comienzos, recuperaron antiguos útiles (mazas, palas, picos, lámparas, cestos, etc.). También recrearon a escala de operación máquinas e instalaciones (bombas, perforadoras, motores de vapor y electricidad, entibación, etc.). Asimismo, una de sus primeras medidas fue la instalación del castillete de la antigua mina Germania de Dormund (10). Por último, señalar que en 1969 se establecería en este museo, el **Centro de Archivos Históricos**, pretendiendo preservar los archivos de las empresas mineras alemanas. En la actualidad, recibe unos 400.000 visitantes/año.

Ese mismo año al cerrarse la minería de Oberharzer (Clausthal-Zellerfeld) se tomó la decisión de establecer un

Museo Nacional en el lugar (Fig.-1), consistente en mostrar una imagen de como vivían y trabajaban los mineros.

Como se puede comprobar, la tendencia en el XIX e inicios del siglo XX, fue conservar pequeños útiles e inclusive algunas máquinas en museos ubicados generalmente en zonas urbanas, alejadas de las cuencas mineras, aunque también se conservó algo "in situ".

NACIMIENTO DE LA ARQUEOLOGIA INDUSTRIAL.

En 1906, por iniciativa de ARTHUR MILLER, se crea el **Deutsches Museum von Meisterwerken der Naturwissenschaft und Technik**, de Munich. Este autor acuñaría el término **monumento cultural técnico**, ya que hasta el momento estos no eran considerados como tales. Hoy en día el Museo dispone de 55.000 m² de exposición permanente, dedicando parte del sótano y planta baja a la Minería. También recordar que en su sede se ubica el **Instituto para la Investigación de la Historia de la Técnica y las Ciencias**.

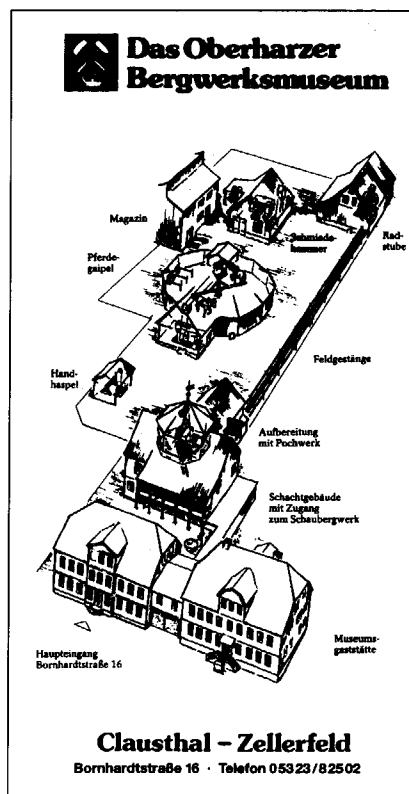


Fig.-1

Pero tal vez la primera recuperación de un monumento técnico minero-metalúrgico sea el ejemplo de **Ekilstuna**, la antigua ferrería sueca **Radermacher**, convertida hoy en un museo. En España no ocurre situación similar hasta 1952, año en que el ingeniero PATRICIO ECHEVERRÍA y Dña. TERESA AGUIRRE organizan la reconstrucción de la **Ferrería de la Mirándola** (siglo XV), en Legazpi, Guipúzcoa.

Pero hasta que en 1959 se crea, en el marco del **Council British Archaeology**, una sección para la salvaguarda de los monumentos industriales: **The National Survey of Industrial Monuments**, no empieza a funcionar la Arqueología Industrial como algo institucionalizado. Como señala J.M. SANTACREU (1992) el proceso fue largo: "El barón de VERNEILH, en Francia, e ISAAC FLETCHER, en Gran Bretaña, utilizaron por primera vez el término arqueología dentro del contexto de la revolución industrial, y durante la década de 1950, los profesores DONALD DUDLEY, RENEE EVNARD y MICHEL RIX ya habían establecido el término arqueología industrial" (11).

Pero para algunos autores el nacimiento de la Arqueología Industrial se estructura a partir de la destrucción, en 1962, de la **Euston Station** de Londres, cuando historiadores y científicos británicos reivindican este monumento. En dicho contexto la nueva disciplina pasa a la Universidad de Bath, de la mano de AUGUST BUCHANAN. Para este autor: "trata de investigar, registrar, preservar los restos industriales del pasado" (12). Ante este movimiento social, en los años sesenta empezaron a funcionar en Gran Bretaña las primeras Sociedades conservacionistas mineras (13).

En 1959, en la fundición **Coalbrookdale** se descubrieron los primeros hornos de cok, que habían sido inventados por ABRAHAM DAVY en 1709. Poco después, en 1968, se crea la **Fundación Museo del Valle del Iron Bridge**, buscando la rehabilitación de los elementos industriales locales. En 1972 se inicia esta labor con la restauración del Puente de Hierro, el más antiguo de los de su clase, y en 1979, se crea el **Museum of Iron**, para posteriormente ir recuperando uno a uno los edificios industriales. En él se encuentra la sede del **Instituto de Arqueología Industrial**, de la Universidad de Birmingham.

De todas formas, en 1932, tenemos una

de las primeras minas de interior abierta al público, se trata de la **Cueva del Yeso de Hinterbrüll** (1932), situada en Mödling, cerca de Viena. La actividad extractiva se desarrolló entre 1848 y 1912, cesando el laboreo por una fuerte avenida de agua que la inundó, dejando un gran lago subterráneo. Tras recuperar las galerías y montar iluminación eléctrica se establecería un servicio de visitas en barca (14) (Fig.-2). Recordemos que la primera caverna que se electrificó para el turismo fue, en 1871, **Dovinska**, en Checoslovaquia.

En el valle del Iron Bridge se celebró, en 1968, el **1.º Congreso de Arqueología Industrial**. Estamos en una época donde empiezan a aparecer numerosas publicaciones sobre este tema, tales como: HUDSON, K. **Industrial Archaeology. An introduction** (1963), PANELL, J.P.M. **The techniques of Industrial Archaeology** (1966), RIX, M. **Industrial Archaeology** (1967), BUCHANAN, R.A. (Ed) **The theory and practice of Industrial Archaeology** (1968), GALE, W.K.W. **Industrial Archaeology** (1969), COSSOM, N. y HUDSON, K. **Industrial Archaeologist' Guide** (1971), RAISTRICK, A. **Industrial Archaeology** (1972), KLINGENDER, F. **Arte i Rivoluzioni Industriali** (1972), BUCHANAN, R.A. **Industrial Archaeology in Britain** (1972), HUDSON, K. **Exploring our industrial past** (1975), SANDE, T.N. **Industrial Archaeology. A new look at de American Heritage** (1976), BURTON, A. **Industrial archaeological sites of Britain** (1977), NEGRI, A. **L'Archeologia**

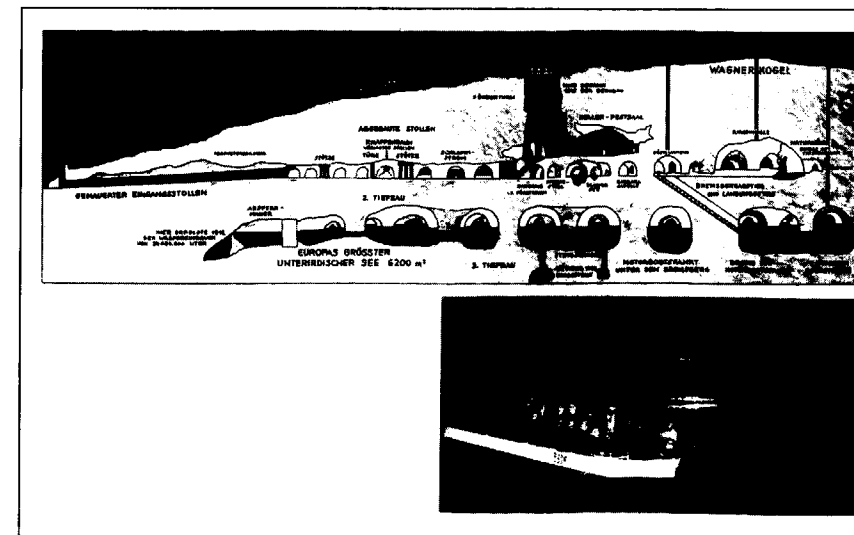


Fig.-2: Minas de yeso de Hinterbrüll. Cortesía de Quarry & Constuction.

Industriale (1978), BUTT, J. y DONNACHIE, I. **Industrial Archaeology in the British Isles** (1979), DUMAIS, M. **L'Archéologie Industrielle en France** (1980). Como podemos observar, estos trabajos se inician en la Gran Bretaña, en los años sesenta, para progresar hacia Italia, EEUU y Francia en los setenta. En España el primer trabajo que hemos localizado es el de ARACIL, R. et al. **Arqueología Industrial de Alcoy** (1980).

Todo este movimiento cultural tuvo su marco científico a través de los Congresos, Sociedades y Comités organizados al efecto. En 1973, en el Museo del Iron Bridge se celebró **The International Conference for the Conservation of the Industrial Monuments**, debatiéndose sobre la definición conceptual del patrimonio, fondos documentales, inventario, recuperación, conservación y aspectos sociales. El siguiente de estos congresos se realizaría en el Museo de la Minería de Bochum, en 1975, se planteó la necesidad de organizar **The International Comitée for the Conservation the Industrial Heritage**, cuyos estatutos quedaron aprobados en el siguiente Congreso Internacional, celebrado en Grangarde, Suecia, en 1978. Desde entonces estas reuniones se celebran cada tres años: Lyon y Grenoble (1981), Lowell, EEUU (1984), Viena (1987), Bruselas (1990), Madrid (1993).

Como vemos estamos ante un movimiento principalmente europeo, por eso

no es de extrañar que la **Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa** tomara cartas en el asunto en 1975, adoptando una **Recommandation relative à l'Archéologie Industrielle**, desarrollando años más tarde una serie de sesiones de trabajo al respecto. La primera fue en Lyon-Vaulx en Velin (1985), luego vinieron las de Madrid (1986), Bochum (1987) y Londres-Durham (1989). En la de Bochum se planteó el tema de la preservación del Patrimonio Minero: **Les monuments techniques de la mine, patrimoine culturel**.

ANALISIS DE LA CONSERVACION DEL PATRIMONIO MINERO POR PAISES.-

GRAN BRETAÑA.

En 1960 se inició el cierre de empresas mineras, naciendo enseguida una serie de Sociedades conservacionistas locales. En 1979, el **Independent Charitage Trust**, crea el **Museo Minero de Chatterley**. Ese mismo año, se funda la **National Association of Mining History Organisations (NAHMO)**, por iniciativa de estas Sociedades, así como de empresas y consultorías mineras, Instituto de Minería y revistas del ramo. En esta organización actualmente se encuadran más de 20 museos de mina (15 de metales, 3 de carbón y 2 de la piedra), asimismo cuenta con unos 2000 socios, de los cuales casi la mitad pertenecen a tres Sociedades: **Peak District Mines Historical Society** (unos 400), **Northern Mine Research Society** (unos 300) y **Shropshire Caving & Mining Club** (unos 100). Estos museos los ha ido montando **NAMHO** contando con voluntarios y personal contratado. Aunque su carácter es privado la NAMHO certifica su idoneidad para la puesta en marcha. Esta organización también se caracteriza por el establecimiento de códigos de actuación, tal es el caso de los: **Code of practice for mineral collecting at disused mines**, **Code of practice for mine exploration** y **Code of practice for removal of artefacts**. También ha establecido un sistema de archivo de datos y normas para redacción de informes, así como seguros para sus miembros.

Según señala EUSEBI CASANELLES (1993): "En Inglaterra la conservación del Patrimonio Industrial se ha convertido en un hecho nacional y no hay territorio que en sus folletos turísticos no anuncie un lugar relacionado con esta temática" (15). Esto parece lógico al ser los pioneros en tales tareas (Figs.-3 y 4).

de las primeras minas de interior abierta al público, se trata de la **Cueva del Yeso de Hinterbrüll** (1932), situada en Mödling, cerca de Viena. La actividad extractiva se desarrolló entre 1848 y 1912, cesando el laboreo por una fuerte avenida de agua que la inundó, dejando un gran lago subterráneo. Tras recuperar las galerías y montar iluminación eléctrica se establecería un servicio de visitas en barca (14) (Fig.-2). Recordemos que la primera caverna que se electrificó para el turismo fue, en 1871, **Dovinska**, en Checoeslovaquia.

En el valle del Iron Bridge se celebró, en 1968, el **1º. Congreso de Arqueología Industrial**. Estamos en una época donde empiezan a aparecer numerosas publicaciones sobre este tema, tales como: HUDSON, K. **Industrial Archaeology. An introduction** (1963), PANELL, J.P.M. **The techniques of Industrial Archaeology** (1966), RIX, M. **Industrial Archaeology** (1967), BUCHANAN, R.A. (Ed) **The theory and practice of Industrial Archaeology** (1968), GALE, W.K.W. **Industrial Archaeology** (1969), COSSOM, N. y HUDSON, K. **Industrial Archaeologist' Guide** (1971), RAISTRICK, A. **Industrial Archaeology** (1972), KLINGENDER, F. **Arte i Rivoluzioni Industriale** (1972), BUCHANAN, R.A. **Industrial Archaeology in Britain** (1972), HUDSON, K. **Exploring our industrial past** (1975), SANDE, T.N. **Industrial Archaeology. A new look at de American Heritage** (1976), BURTON, A. **Industrial archaeological sites of Britain** (1977), NEGRI, A. **L'Archeologia**

Industriale (1978), BUTT, J. y DONNACHIE, I. **Industrial Archaeology in the British Isles** (1979), DUMAIS, M. **L'Archéologie Industrielle en France** (1980). Como podemos observar, estos trabajos se inician en la Gran Bretaña, en los años sesenta, para progresar hacia Italia, EEUU y Francia en los setenta. En España el primer trabajo que hemos localizado es el de ARACIL, R. et al. **Arqueología Industrial de Alcoy** (1980).

Todo este movimiento cultural tuvo su marco científico a través de los Congresos, Sociedades y Comités organizados al efecto. En 1973, en el Museo del Iron Bridge se celebró **The International Conference for the Conservation of the Industrial Monuments**, debatiéndose sobre la definición conceptual del patrimonio, fondos documentales, inventario, recuperación, conservación y aspectos sociales. El siguiente de estos congresos se realizaría en el Museo de la Minería de Bochum, en 1975, se planteó la necesidad de organizar **The International Comitee for the Conservation the Industrial Heritage**, cuyos estatutos quedaron aprobados en el siguiente Congreso Internacional, celebrado en Grangarde, Suecia, en 1978. Desde entonces estas reuniones se celebran cada tres años: Lyon y Grenoble (1981), Lowell, EEUU (1984), Viena (1987), Bruselas (1990), Madrid (1993).

Como vemos estamos ante un movimiento principalmente europeo, por eso

no es de extrañar que la **Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa** tomara cartas en el asunto en 1975, adoptando una **Recommandation relative à l'Archaeologie Industrielle**, desarrollando años más tarde una serie de sesiones de trabajo al respecto. La primera fue en Lyon-Vaulx en Velin (1985), luego vinieron las de Madrid (1986), Bochum (1987) y Londres-Durham (1989). En la de Bochum se planteó el tema de la preservación del Patrimonio Minero: **Les monuments techniques de la mine, patrimoine culturel**.

ANALISIS DE LA CONSERVACION DEL PATRIMONIO MINERO POR PAISES.-

GRAN BRETAÑA.

En 1960 se inició el cierre de empresas mineras, naciendo enseguida una serie de Sociedades conservacionistas locales. En 1979, el **Independent Charitage Trust**, crea el **Museo Minero de Chatterley**. Ese mismo año, se funda la **National Asociation of Mining History Organisations (NAMHO)**, por iniciativa de estas Sociedades, así como de empresas y consultorías mineras, Instituto de Minería y revistas del ramo. En esta organización actualmente se encuadran más de 20 museos de mina (15 de metales, 3 de carbón y 2 de la piedra), asimismo cuenta con unos 2000 socios, de los cuales casi la mitad pertenecen a tres Sociedades: **Peak District Mines Historical Society** (unos 400), **Northern Mine Research Society** (unos 300) y **Shropshire Caving & Mining Club** (unos 100). Estos museos los ha ido montando **NAMHO** contando con voluntarios y personal contratado. Aunque su carácter es privado la NAMHO certifica su idoneidad para la puesta en marcha. Esta organización también se caracteriza por el establecimiento de códigos de actuación, tal es el caso de los: **Code of practice for mineral collecting at disused mines**, **Code of practice for mine exploration** y **Code of practice for removal of artefacts**. También ha establecido un sistema de archivo de datos y normas para redacción de informes, así como seguros para sus miembros.

Según señala EUSEBI CASANELLES (1993): **"En Inglaterra la conservación del Patrimonio Industrial se ha convertido en un hecho nacional y no hay territorio que en sus folletos turísticos no anuncie un lugar relacionado con esta temática"** (15). Esto parece lógico al ser los pioneros en tales tareas (Figs.-3 y 4).

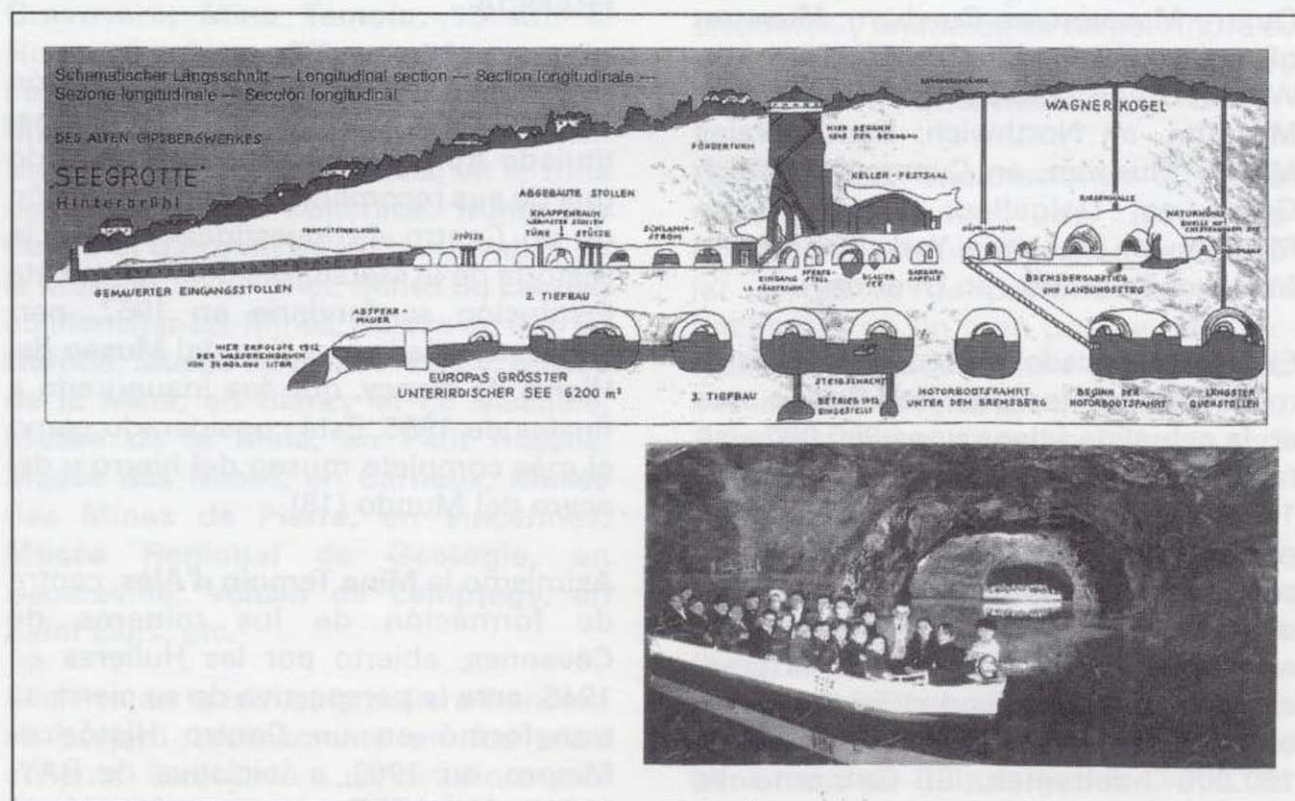


Fig.-2: Minas de yeso de Hinterbrüll. Cortesía de Quarry & Constuction.

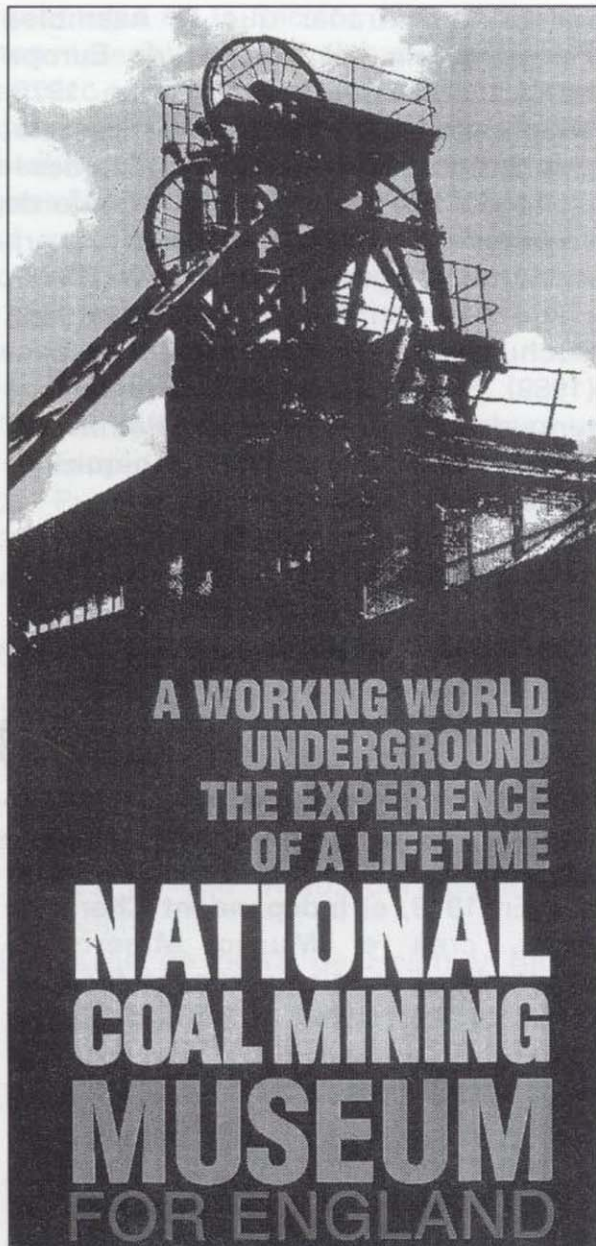


Fig.-3

Entre los museos británicos reseñar los siguientes: **Big Pit Mining Museum**, en Blaenafont; **Black Country Museum Trust Ltd.**, en Egbaston; **Camborne School of Mines-Geological Museum**, en Treveenson; **CEFN Coed Colliery Museum**, en Crynat; **Clearwell Caves & Ancient Iron Mines Museum**, en Cinderford; **Chatterley Whitfiel Mining Museum**, en Stoke on Trent; **Chawarel Hen-Slate Caverns**, en Llanfair, cerca de Arlech; **Ecton Mine Education Center**, en Ecton; **Grevor Tin Mine**, en Penden; **Gloddfa Ganol Slate Mine**, en Blaenau Ffestinoig; **Great Orme Exploration Society**, en Llandudno; **Iron Bridge George Museum Trust**, en Sandal; **Llechwedd Slate Caverns**, en Blaenau Ffestinoig; **Mid Wales Mining Museum**, en Ponterwyd; **Minera Lead Mines**, en Minera, cerca de Chester; **Morwellham Quay**, en Travistock; **Mwyngloddiau Gold Mines**, cerca de Lampeter; **National Stone Center**, en Wirksworth; **The Poldark Mine & Heritage Complex**, en Wendron, cerca de Hellston; **Rhondda Heritage Park**, en Trehafod;

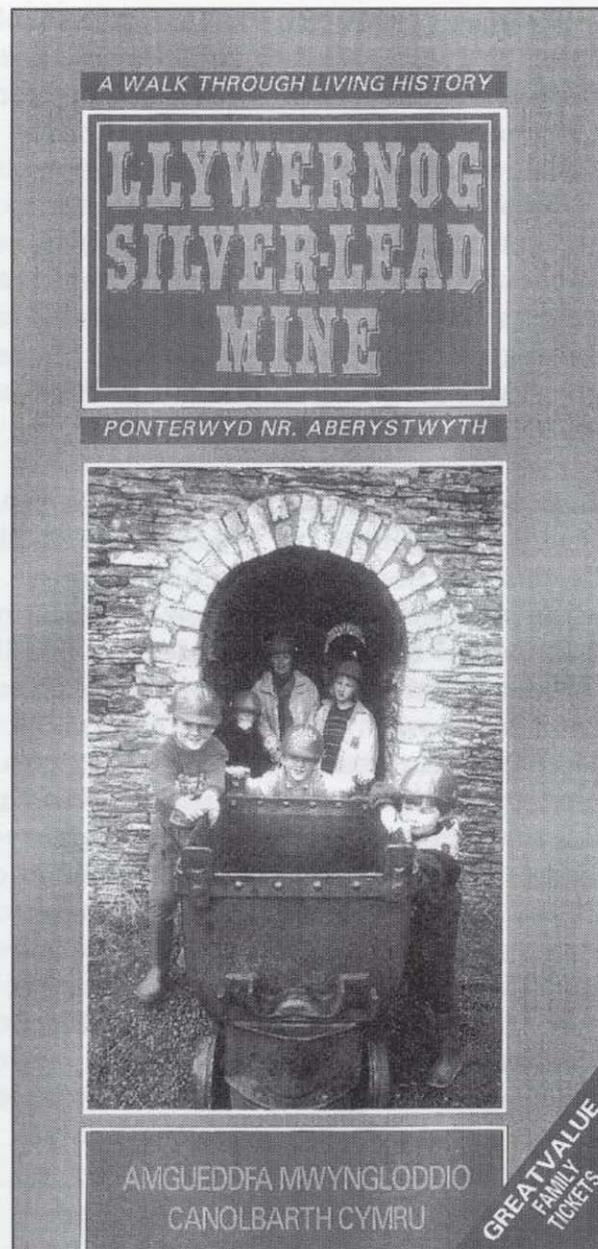


Fig.-4

Scottish Mining Museum, en Newtongrange; **Sygun Cooper Mine**, en Beddgelert; **Tom Leonard Mining Museum**, en Easington; **Underground Quarry Museum**, en Corsham; **Museum of Scottish Lead Mines**, en Wanlockhead; **Weaver Hall Salt Museum**, en Northwich; **South Wales Miners Museum**, en Cynonville; **Welsh Gold**, en Dolgellau; **Welsh Slate Museum**, en Llanberis; **Yorkshire Mining Museum Trust Ltd.**, en Overton; etc.

El más destacado de todos ellos es el museo del territorio del **Iron Bridge**, que en la actualidad tiene unos 300.000 visitantes/año y una cifra de negocio de 10.800 millones de pts/año (16). La desaparición de la industria cerámica, de la porcelana y metalúrgica local, hizo que se lanzará desde Londres un proyecto reindustrializador, que llevó a la creación de una nueva ciudad Telford, que en la actualidad cuenta con unos 160.000 habitantes. El Gobierno se encargó de los gastos de restauración y apoyó económicamente los inicios del

museo. El segundo museo del territorio en importancia tal vez sea el de la región minera de **Beamish**. El **Mining Museum Salford**, creado en 1980, recibe 30.000 visitantes/año. El **CEFN Coed**, de la misma época, recibe unos 20.000, y el **Big Pit** de Blaenafonf, creado en 1983, recibe más de 100.000 visitantes anuales. Otros más modernos como el **Wakefield** (1989), en Yorkshire, se aproximan a los 100.000.

En el aspecto formativo destacar los cursos para conservar los materiales, edificios y minas recuperadas. Así tenemos el de **Conservation of industrial collections forum** (1969), organizado por el **Museo de la Ciencia de Londres** y el que **The Camborne School of Mines** programó para el curso 95/96, un Master en **Mining and Industrial Heritage Management**.

De todas formas, no sólo hay que considerar la recuperación museística de los elementos patrimoniales, sino su inventario. Según **SANTACREU, J.M.** (1992): "...estuvieron en manos de **Sociedades particulares hasta 1979**. Hoy los inventarios particulares ingleses han sido recopilados por la **Comisión Real de Monumentos Históricos de Inglaterra**, pero el material recogido es muy desigual, debido a que no existía una unificación de criterios cuando se hicieron estos inventarios" (17). Es lo malo de ser los pioneros, los que venimos detrás ya vamos con las ideas más sedimentadas.

FRANCIA.

En 1955, se celebró en Nancy, corazón de la Lorena, el Coloquio Internacional titulado **Iron Through the Ages**, siendo una de sus recomendaciones la creación de un Centro de Investigación para la Historia de la Metalurgia del Hierro. Esta Institución se fundaría en 1957, partiendo de ella la creación del **Museo del Hierro de Nancy**, que fue inaugurado a finales de 1966. Está considerado como el más completo museo del hierro y del acero del Mundo (18).

Asimismo la **Mine Temoin d'Alès**, centro de formación de los mineros de Cévennes, abierto por las Hulleras en 1945, ante la perspectiva de su cierre se transformó en un Centro Histórico-Minero, en 1960, a iniciativa de **RAYMOND AUBARET**, aunque no fue abierta al público hasta 1985.

Pero la principal aportación francesa son los **ecomuseos**. En 1976, se celebró en Le Creusot, Borgoña, antigua región minera y de la industria del vidrio, un coloquio titulado: **Patrimonio industrial y sociedad contemporánea. Emplazamientos. Monumentos. Museos**. Ante la crisis económica generada por la subida de los precios del petróleo se busca una dimensión social y económica a la conservación del Patrimonio. A los restos industriales se unen el territorio y los valores histórico-culturales de las comunidades en que se asientan. El reflejo inmediato fue la creación del **Ecomuseo de Le Creusot-Monceau-les-Mines** u otros como el **Ecomuseo de Fourmies-Trelon**, que agrupa una serie de actividades.

En los años ochenta se inauguraron una docena de museos de mina, a estos abría que añadir los museos de la piedra o de las canteras y los ecomuseos. Según WATELET y SCHAWARTZMAN (1991): **"Cerca de un centro turístico subterráneo por semestre se inaugura en Francia actualmente"** (19). Hoy en día se ha incrementado notablemente esta tendencia.

Entre los museos minero-metalúrgicos franceses consideramos los siguientes: **Anciennes Mines d'Or du Limousin**, en Pontgibaud; **Centre Historique Minier**, en Lewarde; **Couriot. Musée de la Mine**, en Saint Etienne; **Ecomusee de Le Creusot-Monceau-les-Mines**, en Le Creusot; **L'Argenteria de Brandis**, en Alpe D'Huez; **Maison de l'Antimoine**, en Massiac; **Mine Blue**, en Noyant-la-Gravoyere, **Mine Temoin**, 15 Km al Norte de Alès; **Mines d'Argent du Fournel**, en L'Argentiere-la-Besse; **Mines d'Argent des Rois Francs**, en Melle; **Mines du Briançonnais**, en la zona de Villard Saint Pancrace; **Mines de Cuivre et d'Argent de la Haute Vallée de la Moselle**, en Le Tillot; **Mines du Laurier**, en Plancher-les-Mines; **Musée du Cap de Garone**; **Musée du Fer**, de Nancy; **Musée de la Mine**, en Blanzly et La Machine; **Musée de la Mine**, en Petit Roselle; **Musée des Mines**, en Carnaux; **Musée des Mines de Pierre**, en Vincennes; **Musée Regional de Geologie**, en Decazeville; **Volcan de Lemptegy**, en Saint Ours; etc.

El cierre de la industria hullera francesa se aceleró bruscamente en los años ochenta. Esto llevó a un deterioro progresivo del Patrimonio, lo que indujo a la creación de Asociaciones Protec-

nistas locales, así como actuaciones de las propias empresas. Muchos de estos proyectos fueron apoyados por el Ministerio de Cultura. Ha habido actuaciones puntuales, tal es el caso de los **Puits de Cagnac**, en Le Tarn, o los **Puits Glenoms a la Machine**, en Nievre. Pero sobre todo se han creado dos grandes museos: **Lewarde y Couriot** (20).

El **Centre Historique Minier de Lewarde**, a corta distancia de Douai, se inauguró en 1982, con el apoyo de colectivos locales y regionales, pero también con la ayuda del Ministerio de Cultura y de la empresa **Houillères du Nord-Pas-de-Calais**. Consiste en un circuito subterráneo real, con 450 m de longitud, reconstruido sobre la Fosse Delhoye, labores de extracción características de los años treinta, a las que se accede por jaula, mediante un descenso simulado. En las restauradas instalaciones de superficie e interior se evocan todos los aspectos de la mina y de la vida del minero. Este Centro alberga 10.000 objetos, 5.000 obras gráficas, 300 películas, así como 2 km. de archivos mineros. Recibe unos 150.000 visitantes/año.

El otro gran museo de la minería del carbón **Couriot**, se inauguró en 1991 (Fig.-5). Este pozo se explotó entre 1913 y 1973, dando en sus tiempos de prosperidad trabajo a 1.500 mineros, que extraían 3.000 Tm de mineral/día. La apertura como museo de la minería y de la industria supuso una recuperación de 350 m de galería. En el interior se visita, de forma monitorizada, desde una instalación moderna, fuertemente automatizada, a labores antiguas con martillos picadores y animales de carga. Ahora se está montando otro gran museo sobre este tema en **Petite Roselle**.

Las antiguas explotaciones subterráneas de esquisto de **Noyant-la-Gravoyère**, con un descenso en funicular a 126 m de profundidad, están integradas en un gran parque de atracciones (espacios naturales, trenecito, pesca, deportes náuticos, mini-golf, etc). A los dos meses de su apertura ya recibía 600-800 visitantes diarios.

En la parte investigadora, recordar que en 1982, un **Programa Nacional de Investigación Arqueológico Minera** (Programme H-03 del **Conseil Supérieur de la Recherche Archéologique**) se puso en marcha bajo la dirección del Ministerio de Cultura y del CNRS. Se pretendía coordinar el trabajo que venían realizando Universidades, Aso-

Fig.-5

ciaciones e investigadores autónomos (21). Asimismo, en 1983 se crea la **Célula del Patrimonio Industrial**, dentro de un Plan de Inventario Monumental de la **Dirección General del Patrimonio**, del **Ministerio de Cultura**, que databa de 1964. Hoy en día este asunto lo lleva la Sous Direction de l'Inventaire. Hay quien piensa que estos inventarios han sido algo tardíos, ya que se han hecho cuando ha desaparecido ya una buena parte del Patrimonio.

ALEMANIA.

Tras el **Deutsches Museum**, en Munich, y el **Deutsches Bergbau-Museum** de Bochum, empezaron a aparecer otros museos como el **Musée de Mine Houillère (Saraland Mine-Museum)** de Bexbach (1934), que guarda los recuerdos de la minería del carbón en la cuenca del Sarre. Siendo su principal

atracción una mina modelo subterránea donde el visitante se acerca a las labores del minero.

En los años setenta empezaron a aparecer una serie de minas museo. Este es el caso de la de sulfuros de **Ramsbeck**, mina que funcionó entre 1559 y 1930. Inaugurado en 1974, este museo recibe unos 100.000 visitantes/año. Otra mina museo de la época es el **Historisches Kupferbergwerk** de Fisbach, abierta al público en 1979, recibe unos 80.000 visitantes/año (22).

En 1992, HEINZ WALTER WILD, en el libro **Schau & Besucher Bergwerke**, pasa revista a 74 museos mineros de Alemania, 14 de Austria y 4 de Suiza (23). Estos museos, como otros de tipo técnico, tienen una gran difusión en este país, por lo que la **Oficina Nacional Alemana de Turismo**, editó en 1985 una guía con 130 Museos, entre los que se encontraban varios de minería (24).

En la actualidad, Alemania es el país con más museos mineros y minas museo. A continuación relacionamos algunos de ellos: **Bergakademie Freiberg (Grube Alte Elisabeth)**, en Freiberg; **Bergbau und Industrien Osterbayern**, en Kümmersbruck; **Bergbaumuseum des Kreises Altenkirchen**, en Herdorf-Sassenroth; **Bergbaumuseum Oelsenitz**, en Oelsenitz/Erzgebirge; **Bergbaumuseum Peisseberg**, en Peisseberg; **Bergbaumuseum Ramsbeck**, en Beswig-Ramsbeck; **Bergbaumuseum Röhrigschacht**, en Wettelrode; **Bergbau und Stad Museum Weilburg**, en Weilburg; **Bergisches Museum für Bergbau**, en Bergisch-Gladbach; **Bergwerkmuseum Hilchenbach-Müsen**, en Hilchenbach-Müsen; **Besucherbergwerk Eisenerzgrube "St. Anna-Stollen"**, en Northweiler; **Besucherbergwerk Finstergrund**, en Wieden/Utzenfeld; **Besucherbergwerk Grube Anna-Elisabeth Schriesheim**, en Schriesheim; **Besucherbergwerk Grube Catharina Neufang**, en St. Andreasberg; **Besucherbergwerk Grube Christina**, en Willingen; **Besucherbergwerk Felsendome Rabenstein**, en Chemnitz; **Besucherbergwerk Grube Fortuna Oberbeil**, en Wetzlar; **Besucherbergwerk "Grube Gustav"**, en Meissner-Abterode; **Besucherbergwerk Grube Windeweide**, en Gebhardshain; **Besucherbergwerk Kilianstollen**, en Masberg; **Besucherbergwerk Kleinenbremen**, en Porta Westfalia; **Besucherbergwerk Reindl-Stollen**, en Eisenberg; **Besucherbergwerk Schmittenstollen**,

en Bad Münster; **Besucherbergwerk Teufelsgrund**, en Münsterthal; **Besucherbergwerk "Tiefer Stollen"**, en Aalen; **Besuchergrube Herrenberg**, en Bundenbach; **Edelsteinminen im Steinkohlenberg Idar-Ostein**, en Idar-Ostein; **Emilianusstollen**, en Saarlouis; **Erlebnisbergwerk Merkers**, en Merkers; **Erzbergwerk Bodenmais**, en Bodenmais; **"Frischglück" Besucherbergwerk**, en Neuenburg; **Deutsches Bergbaumuseum München**, en München; **Deustches Museum Montanttechnologie für Rohstoff, Energie, Umwelt (DMT)**, en Essen; **Graphitebergwerk Kropfmühl**, en Hauzenberg; **Grube Christiane**, en Diemelsee; **Grube "Markus Röling"**, en Frohnau; **Grube Schauinsland**, en Freiburg; **Haus der Heimat**, en Freital; **Heimat und Bergbaumuseum mit Schautollenanlage**, en Weiburg; **Heimat und Bergbaumuseum Burg Tannenber**, en Nanterchusen; **Heimatmuseum des Zeitz-Weissenfeler Braunkohlenreviers**, en Teuchen; **Historische Bergwerksanlage "19-Lachter-Stollen"**, en Widemann; **Historisches Kupferbergwerk Fisbach/Nahe**, en Fisbach/Nahe; **Historisches Silberbergwerk "Alte Hoffnung Erbstollen"**, en Schönborn-Dreiwerden; **Historisches Silberbergwerk "Hella-Glückstollen"**, en Neubulach; **Historisches Silberbergwerk Grube Samson und Heimatmuseum**, en St. Andreasberg; **Hüttenstollen**, en Salzhemmendorf; **Kalkbergwerk**, en Wolfstein; **Kupferbergwerk Bertsch**, en Bad-Widungen-Bergfreiheit; **Landermuseum Volk und Wirtschaft**, en Düseldorf; **Landesbergmuseum**, en Sulzburg; **Lehrbergwerk Grube Rater Bär**, en St. Andreasberg; **Lehr und Schaubergwerk Herkules Frish Glück**, en Waschleithe; **Mülenberg Stollen**, en Bleihalf; **Museum für Naturkunde**, en Dortmund; **Neubeschert Glück Stollen**, en Altenberg; **Niedersächs Bergbaumuseum**, en Langelshem-Lautenthals; **Oberharzer Bergwerkuseum**, en Clausthal-Zellerfeld; **Rammelsberger Bergbaumuseum**, en Goslar; **Ruhrlandmuseum**, en Essen; **Saarländisches Bergbaumuseum**, en Bexbach; **Salzbergwerk Berchtesgaden mit Salzuseum**, en Berchtesgaden; **Sanierungsbetrieb 371**, en Aue; **Schauanlage Silberstollen "Geising"**, en Geising; **Schaubergwerk Büchenberg**, en Elbingen; **Schaubergwerk Finstertal**, en Asbach; **Schaubergwerk Glöckl**, en Johangeorgestadt im Erzgebirge; **Schaubergwerk Wocklum**, en Balve;

Schieferschaubergwerk Raumland, en Bad Berleburg; **Siegerlandmuseum**, en Siegen; **Silbereisenbergwerk Gleissinger Fels**, en Bayreuth; **Stadt und Bergbaumuseum**, en Freiberg; **Städtisches Museum für Bergbau und Industrie**, en Brand-Erbisdorf; **Steinkohlbesucherbergwerk Rabenstein Stollen**, en Clausthal-Zellerfeld; **Steinsalzbergwerk Kochendorf**, en Heilbronn; **Technisches Landesmuseum**, en Schwerin; **Tiefer Molchner Stollen**, en Pobershau; **Traditionsstätte Erzbergbau**, en Aue; **Unverhoffer Segen Gottes Erbstollen mit Radstube**, en Oberschöna; **Weisse Grube**, en Kirchheimboladen; **Westfälisches Industriesmuseum**, en Dortmund; **Zinnbergbaumuseum**, en Altenberg; **Zinner GmbH Altenberg**, en Altenberg; **Zinnergrube Sauberg**, en Ehrenfriedersdorf; etc. Una de las últimas actuaciones ha sido la declaración de la siderurgia de **Vöcklingen** como **Patrimonio de la Humanidad**, instalada en 1873 ha funcionado hasta 1986, siendo una auténtica catedral del hierro y del acero.

En 1993, se organizó en Freiberg el **1º Symposium on Cultural Heritage in Geosciences, Mining and Metallurgy**, dedicado a los temas de bibliotecas, archivos y museos. Alemania ha sido un país pionero en salvaguardar archivos industriales, así la empresa KRUPP, ya organizó los suyos, en Essen, en 1903.

AUSTRIA.

En 1976, la **Oficina Federal para la Protección de Monumentos** crea un **Departamento de Monumentos Industriales**. Pero los primeros trabajos en el campo minero los desarrollaría, a partir de 1983, la **Asociación Regional del Mineral de Hierro de Styria** (25). En 1985, se tocaron los temas del Patrimonio Minero en la **Conferencia sobre la minería de Pitten**, Baja Austria, y ese mismo año se crea un **Departamento de Arqueología Industrial** en la Universidad de Viena. La reunión, en 1987, del **International Comite for the Conservation the Industrial Heritage**, enfocado a la dedicación de los monumentos industriales al turismo, estimularía en cierta medida estos fines. También ese mismo año, se celebraría en la ciudad de Leoben, donde se ubica la histórica Escuela de Minas, el día del minero. Evocamos en nuestra memoria a Profesores y alumnos de la Escuela vestidos con sus típi-

cos trajes mineros, con motivo de un Congreso de Minería que organizan cada 25 años. En 1991, se puso en marcha la Asociación **Erlebnisbergwerk in Österreich (Aventura en las Minas de Austria)**, con sede en Eisenerz, Styria, la cual agrupa a muchas de las minas museo de este país (26).

Las principales minas museo son las de **Schwaz**, minas de sulfuros-plata explotadas entre 1490 y 1957, y las de **Eisenerz**, minas de hierro. Estas últimas, fueron puestas museísticamente en marcha hace menos de una década, como las anteriores, cuando se comprobó que la crisis minera dejaba una alternativa al turismo. Asimismo en 1992, el Gobierno decidió el cierre de la metalurgia del valle de Vordenberg, con lo que se transformó en un centro de visitas.

Entre los museos y minas museo austriacos destacamos, el **Bergbaumuseum Klagenfurt**, en Klagenfurt; la **Cueva de Yeso de Hinterbrüll**, en Hinterbrüll; **Historisches Silberberggruben Schaubergwerk**, en Oberzeiring; **Muelbach**; la siderurgia **Radwerk IV Blast Furnace**, en Vordenberg; **Salzbergwerk Altausee**, en Altausee; **Salzbergwerk Bad Ischl**, en Bad Ischl; **Salzbergwerk Hallein**, en Dürnberg; **Salzberger Hallstatt**, en Hallstatt; **Schaubergwerk Erbstollen Kupferplatte**, en Jochberg; **Schaubergwerk Hüttenberg**; en Hütenberg/Kärntern; **Schaubergwerk "Schwarzaleo"**, en Leogang; **Silberbergwerk Schwaz**, en Schwaz; **Steinölschaubergwerk**, en Pertisau; **Terra Mystica**, en Bad Bleiger, etc.

A veces, el interés turístico de las minas no se engarza directamente con su metodología de explotación, sino con la vida de las comunidades relacionadas con ella. Entre las explotaciones mineras antiguas **Hallstatt** ocupa un lugar destacado. Su actividad se remonta a 2000 años a.C., en la Edad del Bronce, prosiguiendo hasta los primeros tiempos de la Edad del Hierro, denominada de Hallstatt. Recordemos que, en 1846, el ingeniero GEORG RAMSAUER, Director de la Mina, descubrió e interpretó el hallazgo de una necrópolis de mineros, del primer milenio a.C., con 900 personas, las cuales estaban enterradas con todos sus bienes (vestidos, armas, útiles domésticos, etc.). Esto posibilitó el conocimiento de muchos aspectos de la vida de los celtas. La

importancia de esta mina se confirma al comprobar el desarrollo de varias exposiciones sobre estos temas, tal es el caso de la **Die Hallstatt kultur. Exposition International** (1980) o de la **Des Österreiches Bergbau** (1987). Ahora las minas están acondicionadas para visitas, con grandes toboganes de madera que comunican entre sí diversos niveles de la explotación (27).

BENELUX.

Bélgica es un país pionero en la recuperación del Patrimonio Minero-Metalúrgico. En 1971 se crea un museo al aire libre, el **Musée de la Vie Rural en Wallonie** y en 1978 se organizaría, formando parte del mismo, el **Musée du Fer et de Metallurgie Ancienne**, de Saint Hubert (Luxembourg), con el **Fourneau Saint-Michel** (siglo XVIII). Este Museo del Hierro recibe unos 30.000 visitantes/año de los 70.000 que acceden al Parque. En Lieja se ha abierto también una Sección del Museo de la Vida Rural Valona, se trata de la **Maison de la Metallurgie et de l'Industrie (Musée du Fer et du Charbon)**. Allí se muestra desde la farga valona (siglo XVII), con su horno alto de carbón vegetal, a la descripción de la producción de los aceros actuales.

Asimismo, en 1974, los responsables del **Cercle Royal d'Histoire et d'Archéology d'Ath** pusieron en marcha la idea de crear un **Musée de la Pierre**, en Maffle. Las canteras locales habían cesado su actividad en 1964 y se pretendía recuperar la memoria de estas actividades. Pero este museo, establecido en un castillo, no se inauguraría hasta 1989, gracias a los trabajos de J.P. DUCASTELLE. En Bélgica hay numerosos museos de la piedra y parece ser que el más antiguo es el **Musée National du Marbre**, de Rance, que recoge diversos aspectos de la industria marmolera típica de esta región (28). La puesta en marcha de este museo es una realización de la **Sociedad de Historia Regional** de los distritos de Beaumont-Chimay y Sirvy-Rance, con la colaboración del Banco B.B.L.

Son numerosas las explotaciones de carbón recuperadas, así en 1979, se abrió el **Musée de la Mine de Bois du Luc** (por iniciativa de **Gabos**), en estas minas abandonadas en 1973. Asimismo, en 1980, el cierre de la mina **Argentau-Trimbleur**, en Blégnay-Trimbleur, trajo su rápida reconversión en un complejo turístico. Modernamente el proyecto

más importante ha sido **Le Gran Hornu**, promovido por la **Sociedad Valona de Arqueología Industrial** y el Gobierno de la provincia de Hainaut. Se trata de la reconstrucción de una ciudad minera y parte de sus restos industriales abandonados, al cesar la producción de carbón de la mina Hornu-Wasmes (1954), en la cuenca hullera de Borinage. El **Musée de la mine Les Wagneaux**, aprovecha actualmente 200 m de galerías de Hornu-Wasmes, abiertas en 1932 para cubrir las necesidades prácticas de la Formación Profesional Minera (Fig-6).

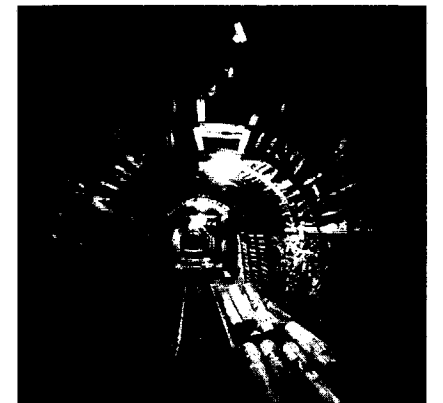


Fig.-6: Museo de la mina Les Wagneaux

Exponemos a continuación las principales museos mineros y minas museos belgas, estos son: **Diamant Museum**, en Grobbendonk; **Ecomuseo de la Ladrillería**, en Boom; **Geologisch Museum**, en Bochlot; **Mijnmuseum**, en Beringen; **Musée d'Arenberg-Musée du Porphyre**, en Rebecq-Rognon; **Musée du Coticule**, en Vielsam-Salmchateau; **Musée de la Mine**, en Houdeng-Aimeres; **Musée de la Mine "Les Wagneaux"**, en Wasmes; **Musée de la Mine et Musée du Clou**, en Fontaine-L'Evêque; **Musée du Fer et du Charbon**, en Lieje; **Musée du Fer et de Metallurgie Ancienne**, en Saint Hubert; **Musée National du Marbre**, en Rance; **Musée de la Pierre**, en Antoing; **Musée de la Pierre**, en Maffle; **Musée de la Pierre**, en Muno; **Musée de la Pierre et du Marbre**, en Basecles; **Musée de la Pierre**, en Soignes; **Musée Regional de la Pierre**, en Sprimont; **Musée du Silix**, en Eben-Emael; etc.

En Holanda destacar el **Mijnmuseum**, de Kerkrade, que cuenta con exposiciones sobre la vida y trabajo de los mineros, recibiendo unos 300.000 visitantes/año (29).

cos trajes mineros, con motivo de un Congreso de Minería que organizan cada 25 años. En 1991, se puso en marcha la Asociación **Erlebnisbergwerk in Österreich (Aventura en las Minas de Austria)**, con sede en Eisenerz, Styria, la cual agrupa a muchas de las minas museo de este país (26).

Las principales minas museo son las de **Schwaz**, minas de sulfuros-plata explotadas entre 1490 y 1957, y las de **Eisenerz**, minas de hierro. Estas últimas, activas durante 2000 años, hasta 1988, fueron puestas museísticamente en marcha hace menos de una década, como las anteriores, cuando se comprobó que la crisis minera dejaba una alternativa al turismo. Asimismo en 1992, el Gobierno decidió el cierre de la metalurgia del valle de Vordenberg, con lo que se transformó en un centro de visitas.

Entre los museos y minas museo austriacos destacamos, el **Bergbaumuseum Klagenfurt**, en Klagenfurt; la **Cueva de Yeso de Hinterbrüll**, en Hinterbrüll; **Historisches Silberberggruben Schaubergwerk**, en Oberzeiring; **Muelbach**; la siderurgia **Radwerk IV Blast Fournace**, en Vordenberg; **Salzbergwerk Altausee**, en Altausee; **Salzbergwerk Bad Ischl**, en Bad Ischl; **Salzbergwerk Hallein**, en Dürnberg; **Salzberger Hallstatt**, en Hallstatt; **Shaubergwerk Erbstollen Kupferplatte**, en Jochberg; **Schaubergwerk Hüttenberg**; en Hüttenberg/Kärntern; **Schaubergwerk "Schwarzaleo"**, en Leogang; **Silberbergwerk Schwaz**, en Schwaz; **Steinölschaubergwerk**, en Pertisau; **Terra Mystica**, en Bad Bleiger, etc.

A veces, el interés turístico de las minas no se engarza directamente con su metodología de explotación, sino con la vida de las comunidades relacionadas con ella. Entre las explotaciones mineras antiguas **Hallstatt** ocupa un lugar destacado. Su actividad se remonta a 2000 años a.C., en la Edad del Bronce, prosiguiendo hasta los primeros tiempos de la Edad del Hierro, denominada de Hallstatt. Recordemos que, en 1846, el ingeniero GEORG RAMSAUER, Director de la Mina, descubrió e interpretó el hallazgo de una necrópolis de mineros, del primer milenio a.C., con 900 personas, las cuales estaban enterradas con todos sus bienes (vestidos, armas, útiles domésticos, etc.). Esto permitió el conocimiento de muchos aspectos de la vida de los celtas. La

importancia de esta mina se confirma al comprobar el desarrollo de varias exposiciones sobre estos temas, tal es el caso de la **Die Hallstatt kultur. Exposition International** (1980) o de la **Des Österreichs Bergbau** (1987). Ahora las minas están acondicionadas para visitas, con grandes toboganes de madera que comunican entre sí diversos niveles de la explotación (27).

BENELUX.

Bélgica es un país pionero en la recuperación del Patrimonio Minero-Metalúrgico. En 1971 se crea un museo al aire libre, el **Musée de la Vie Rural en Wallonie** y en 1978 se organizaría, formando parte del mismo, el **Musée du Fer et de Metallurgie Ancienne**, de Saint Hubert (Luxembourg), con el **Fourneau Saint-Michel** (siglo XVIII). Este Museo del Hierro recibe unos 30.000 visitantes/año de los 70.000 que acceden al Parque. En Lieja se ha abierto también una Sección del Museo de la Vida Rural Valona, se trata de la **Maison de la Metallurgie et de l'Industrie (Musée du Fer et du Charbon)**. Allí se muestra desde la farga valona (siglo XVII), con su horno alto de carbón vegetal, a la descripción de la producción de los aceros actuales.

Asimismo, en 1974, los responsables del **Cercle Royal d'Histoire et d'Archéology d'Ath** pusieron en marcha la idea de crear un **Musée de la Pierre**, en Maffle. Las canteras locales habían cesado su actividad en 1964 y se pretendía recuperar la memoria de estas actividades. Pero este museo, establecido en un castillo, no se inauguraría hasta 1989, gracias a los trabajos de J.P. DUCASTELLE. En Bélgica hay numerosos museos de la piedra y parece ser que el más antiguo es el **Musée National du Marbre**, de Rance, que recoge diversos aspectos de la industria marmolera típica de esta región (28). La puesta en marcha de este museo es una realización de la **Sociedad de Historia Regional** de los distritos de Beaumont-Chimay y Sirvy-Rance, con la colaboración del Banco B.B.L.

Son numerosas las explotaciones de carbón recuperadas, así en 1979, se abrió el **Musée de la Mine de Bois du Luc** (por iniciativa de **Gabos**), en estas minas abandonadas en 1973. Asimismo, en 1980, el cierre de la mina **Argentau-Trimbleur**, en Blégny-Trimbleur, trajo su rápida reconversión en un complejo turístico. Modernamente el proyecto

más importante ha sido **Le Gran Hornu**, promovido por la **Sociedad Valona de Arqueología Industrial** y el Gobierno de la provincia de Hainaut. Se trata de la reconstrucción de una ciudad minera y parte de sus restos industriales abandonados, al cesar la producción de carbón de la mina Hornu-Wasmes (1954), en la cuenca hullera de Borinage. El **Musée de la mine Les Wagneaux**, aprovecha actualmente 200 m de galerías de Hornu-Wasmes, abiertas en 1932 para cubrir las necesidades prácticas de la Formación Profesional Minera (Fig-6).

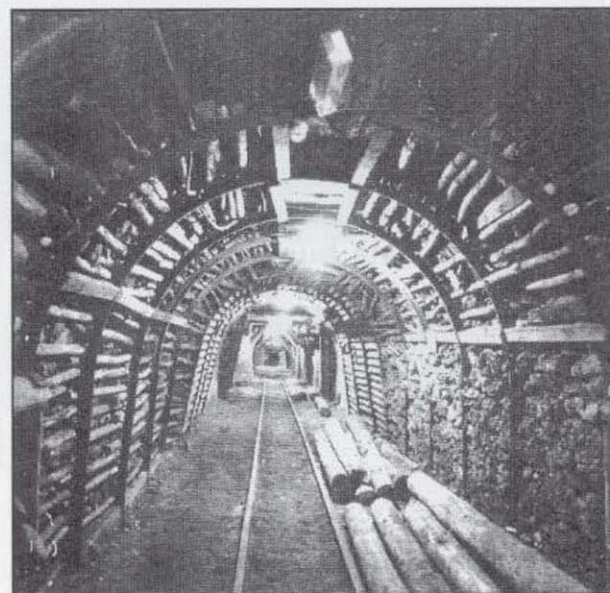


Fig.-6: Museo de la mina Les Wagneaux

Exponemos a continuación las principales museos mineros y minas museos belgas, estos son: **Diamant Museum**, en Grobbendonk; **Ecomuseo de la Ladrillería**, en Boom; **Geologisch Museum**, en Bochlot; **Mijnmuseum**, en Beringen; **Musée d'Arenberg-Musée du Porphyre**, en Rebeq-Rognon; **Musée du Coticule**, en Vielsam-Salmchateau; **Musée de la Mine**, en Houdeng-Aimeres; **Musée de la Mine "Les Wagneaux"**, en Wasmes; **Musée de la Mine et Musée du Clou**, en Fontaine-L'Eveque; **Musée du Fer et du Charbon**, en Lieje; **Musée du Fer et de Metallurgie Ancienne**, en Saint Hubert; **Musée National du Marbre**, en Rance; **Musée de la Pierre**, en Antoing; **Musée de la Pierre**, en Maffle; **Musée de la Pierre**, en Muno; **Musée de la Pierre et du Marbre**, en Basecles; **Musée de la Pierre**, en Soignes; **Musée Regional de la Pierre**, en Sprinmont; **Musée du Silex**, en Eben-Emael; etc.

En Holanda destacar el **Mijnmuseum**, de Kerkrade, que cuenta con exposiciones sobre la vida y trabajo de los mineros, recibiendo unos 300.000 visitantes/año (29).

Respecto a los inventarios patrimoniales, señalar su circunscripción autonómica. En territorio valón lo realiza la Sociedad privada **Patrimoine Industriel Wallonie-Bruxelles**, mientras que en la zona flamenca se encarga una **Cédule du Patrimoine Industrielle**, de la Dirección General de Monumentos y Lugares Históricos del Gobierno flamenco.

ESCANDINAVIA.

Señala EUSEBI CASENELLES (1993) que: "En los Países Bálticos los museos del territorio han tenido una gran aceptación a causa, en gran parte, de la sensibilidad ecológica de la población. Eso les ha llevado a conservar no solamente el medio natural, sino también el patrimonio rural, una buena parte del cual está relacionado con el mundo técnico (molinos, explotaciones de minas y de bosques que conservan todas las infraestructuras, como las casas de los obreros, etc.)" (30).

En los años setenta, en Laponia, Finlandia, ya estaba organizado, en **Tankavaara**, un cierto turismo basado en la recuperación de las técnicas de prospección de oro con batea. En 1977-78 se desmontó la casa de madera que inicialmente había servido como sede del **Lapin Kulta**, en Härkäselkä, y se instaló, pieza a pieza, en Tankavaara, como Museo de Minerales y Gemas. Asimismo fueron recuperando materiales y equipos en relación con la minería del oro, así como datos relativos a la historia de este metal en Finlandia. En 1994, lanzaron el proyecto **Golden World**, con la pretensión de exhibir la historia del oro de 20 países. Esta exposición permanente se inauguró en el verano de 1995.

En 1978, tenemos la celebración del 3º Congreso del **FICCIM** en Grangarde, Suecia, donde se abordaron los Estatutos del **The International Committee for the Conservation the Industrial Heritage** y en el que se buscó la definición conceptual del Patrimonio Industrial. Suponemos que en el ámbito de el interés despertado por este Congreso, se organizaron proyectos como la recuperación del poblado minero de **Langban**, en la región de Värmland, iniciado en 1983. Estas minas de hierro y dolomita, de principios del XVIII, dejaron de producir mena metálica en 1958, cesando definitivamente su

actividad en 1972. Ahora se han convertido en un auténtico museo al aire libre.

Otro ejemplo importante de recuperación del patrimonio metalúrgico son **The Walloon Ironworks**. En torno a las viejas minas de hierro de Dannemora, al Norte de Uppsala, se establecieron una serie de ferrerías (siglos XVII-XVIII) que ahora han sido rehabilitadas, tal es el caso de la **Farga Walloon**, en Österbybruk, de la **Farga Lancashire**, en Karlholms, el **Ironworks Museum**, de Forsmarks, o los altos hornos de **Vällnora**, etc.

En el caso noruego, hemos querido recoger la experiencia de las minas de plata de Kronsberg, explotadas desde el siglo XVI hasta el XIX, convertidas ahora en el **Norwegian Mining Museum**. El museo, la iglesia y artísticos edificios de madera (del XVII al XIX) recuperados, junto con otros museos, en un entorno natural excepcional, recrean la historia local. La protección del complejo data de 1987.

En la relación de museos consideramos los siguientes. En Finlandia tenemos, el **Goldprospector Museum**, en Tankavaara; **Outokumpu Mining Museum & Old Outokumpu Mine**, en Pitkälähti Harbor; **Tytyrin Kalkkikaivomuseo**, en Lohja, etc. En Noruega señalar, el **Modums Blaafarveverk**, en Amont; **Museene På Løkken**, en Løkken; **Naes Jønverkmuseum**, en Arendal; **Norsk Teknisk Museum**, en Oslo; **Norwegisches Bergverkmuseum Kronsberg**, en Kronsberg; **Oscar Gold Mining**, en Bremnes; **Rørosmuseet**, en Røros; **Stesdtal Mineral Park**, Hornes; **Sulitjelma Gruvemuseum**, en Sulitjelma, etc. Y en Suecia, **Langbans Gruby**, en Filstad; **Sala Gruv**, en Sala; o la cantera de **Kullsborg**, convertida en un anfiteatro.

En mayo de 1985 se celebró en Norberg, Suecia, la conferencia **The Importance of Ironmaking**, siendo uno de sus temas claves la **Preservation, Restoration and Reconstruction** de antiguas ferrerías.

ITALIA.

En el Congreso celebrado por la **Associazione Nazionale Ingegneri Minerari**, en 1986, en St. Vicent, el ingeniero químico G. CITRAN presentó la comunicación **Miniere-Museo. Sono possibili?** Desde entonces en esta Asociación prendería el interés por el

tema, organizando, en 1991, un Congreso sobre Patrimonio Minero: **1º. Convegno Valorizzazione dei Siti Minerari Dismessi**, en Abadía San Salvatore, localidad muy cercana a las minas mercuriales de Monte Amiata. En 1993 se realizó el Congreso Internacional sobre **Esperienze Europee di Valorizzazione Turístico Culturale del Patrimonio Minerario**. Y, en 1994, se celebró, en Cagliari, Cerdeña, el **2º Convegno Valorizzazione dei Siti Minerari Dismessi**, en el que fue invitado el primer firmante de este artículo para contar la experiencia española. En este último forum científico se reunieron más de 300 personas.

En 1987, se inauguró el **Museo Storico dell'Oro Italiano**, en Pedrosa. Poco después, en 1989, en **Abadía-S. Salvatore**, la Administración local había ordenado levantar un plano urbanístico de la zona pensando crear un parque minero; no es extraño que se eligiese esta localidad para el 1º. Convegno sobre Patrimonio de la ANIM. A principios de los noventa surgieron otros proyectos, como el **Museo de la Metalurgia del Valle de Aosta** y el **Museo Storico Minero de Perticara**, en relación con la minería del azufre (inaugurado en 1994).

Tras los Congresos del ANIM se han articulado buena parte de los nuevos museos o proyectos que irán cuajando en los próximos años: **Antica Miniera d'Oro della Guia e Casa Museo Walsar**, en Macuznaga; **Museo Geo-Paleontológico dei Colli Euganei: Cava Bomba**, en Cinto Euganeo; **Corte della Miniera**, en Urbino; **Museo del Marmo**, en Carrara; **Museo Minerario de Abadía-S. Salvatore**, en Abadía-S. Salvatore; **Museo Minerario Regionale della Valle d'Aosta, Champdepraz**; **Museo Provinciale delle Miniere Monteneve-Ridanna**, en Vipiteno (Fig.-7); **Museo di Scienza della Terra**, en Crodo; **Museo della Storia delle Miniere di Pirita**, en Massa Marittima; **Museo Storico Minerario**, en la Escuela de Minas de L'Iglesia; **Museo Storico Minerario de Perticara**, en Santarcangelo di R.; **Museo Storico dell'Oro Italiano**, en Pedrosa; **Miniere degli Escartons**, en Perosa Argentina; etc. Así como numerosos proyectos en la isla de Cerdeña.

En Italia hay que reseñar la creación, por parte del Ministro Ronchey, del **Comitato dei Beni Culturali Nazionali per l'Archeologia Industriale**, compuesto por un grupo pluridisciplinar de

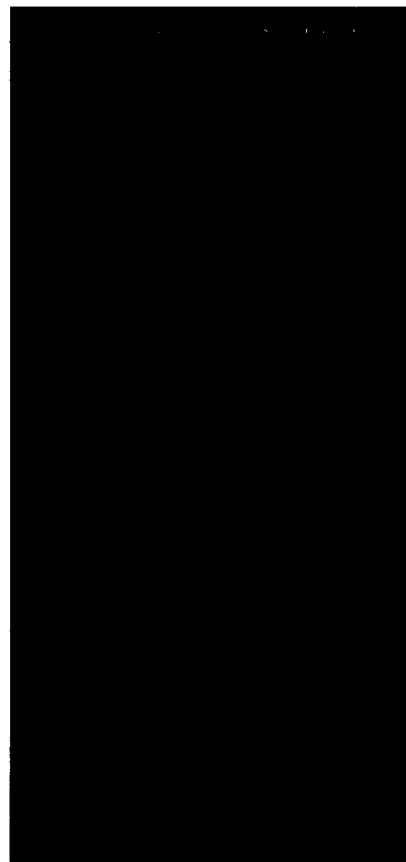


Fig.-7

50 personas. Esta Comisión tiene como finalidad el estudio, la investigación y el inventario del Patrimonio Industrial italiano, con el fin de elaborar un único catálogo.

En Cerdeña, la Ley 29/94, de 9 de junio, se crea para tutelar y encuadrar orgánicamente los problemas arqueológico industriales de esta isla, con gran actividad minera en el pasado. La ley prevé la creación de una **Comisión Regional de Salvaguarda del Patrimonio Arqueológico Industrial**, bajo la asesoría del Ministerio de Educación. La función de la Comisión sería evaluar propuestas previas de valorización y uso de centros e instalaciones mineras abandonadas, procedentes de solicitudes formuladas por las autoridades locales (31).

ESPAÑA Y PORTUGAL.

En 1977, desde el **Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña** partió la iniciativa de crear el **Museo de la Ciencia y de**

la **Técnica de Cataluña (MNCTC)**. Según señala EUSEBI CASENELLES (1996): "La piedra angular de sensibilización sobre el patrimonio industrial ha sido el **Museo de la Ciencia y su Asociación**" (32). A iniciativa de estos colectivos se realizaría en Bilbao, el año 1982, las **I Jornadas sobre Protección y Revalorización del Patrimonio Industrial**; las segundas se celebraron en Barcelona, en 1988. También han organizado tres congresos catalanes sobre el tema.

El Plan Nacional de Interés Comunitario, de 1986, incluyó entre las acciones propuestas la construcción del **Museo de la Minería y de la Industria de Asturias**. El desarrollo del proyecto (1992), sobre la escombrera del pozo San Vicente de El Entrego, permitiría la inauguración del Museo en 1994. La cifra de visitantes supera a los 80.000 anuales (33).

En Portugal, la primera actividad sobre estos temas, tal vez fuera, el **I Encontro Nacional sobre o Patrimonio Industrial**, celebrado en Coimbra, en 1989.

En 1990, se organizan las **I Jornadas Ibéricas del Patrimonio Industrial y la Obra Pública**, en Sevilla. En 1992, se celebra, en Madrid, el **VIII Congreso Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial**. Asimismo a principios de los noventa nacieron la **Asociación Española de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública**, con sede en Madrid, y la **Associação Portuguesa de Arqueologia Industrial (APAI)**, con sede en Lisboa.

En 1992 se puso en marcha el **Museo de Río Tinto**, a iniciativa de la Fundación con idéntico nombre, creada tras la crisis del cobre, en 1986, para el desarrollo de la comarca (Fig.-8). El museo, consistente en 15 salas con 1600 m² de superficie, gracias a las mejoras realizadas a finales de 1992 y noviembre de 1993. Junto a la entrada al museo se oferta el viaje en ferrocarril minero, visitas a una necrópolis y a la mina a cielo abierto de Corta Atalaya, etc. Pretenden iniciar recorridos de interior con la apertura del Pozo Alfredo (34). La cifra anual de visitantes se acerca a los 35.000.

En 1991 se puso en marcha el **Proyecto Arrayanes**, para recuperar el Patrimonio Minero-Industrial de Linares, aunque está todavía en fase de realización (35). En 1992, la **Asociación Amigos del Museo "Ferrería de San Blas"** inició la



Fig.-8

andadura para crear un Museo de Minería en Sabero. Y, en octubre de 1993, se abriría al público la primera mina museo subterránea, se trata de las explotaciones neolíticas de variscita-turquesa de **Can Tintorer**, en Gavá, Barcelona.

En 1993, a iniciativas del MNCTC se organizaría, en Ripoll, el **1º Simposio Internacional sobre Farga Catalana**. Antes la **Asociación de Amigos de la Ferrería de Cades** había montado unos **Encuentros sobre la Restauración de Ferrerías en el Norte de España** (36).

En el **IX Congreso Internacional de Minería y Metalurgia**, celebrado en León, en Junio de 1994, presentamos varias comunicaciones sobre la conservación del patrimonio minero. Tal situación llevó a que entre las conclusiones del área IV se señalase: "Es necesaria una actuación urgente por parte de las diversas administraciones para la protección y valorización del importante patrimonio minero-metalúrgico español" (37).

Poco después se iniciaron las gestiones para constituir la **Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero**, puesta legalmente



Fig.-7

50 personas. Esta Comisión tiene como finalidad el estudio, la investigación y el inventario del Patrimonio Industrial italiano, con el fin de elaborar un único catálogo.

En Cerdeña, la Ley 29/94, de 9 de junio, se crea para tutelar y encuadrar orgánicamente los problemas arqueológico industriales de esta isla, con gran actividad minera en el pasado. La ley prevé la creación de una **Comisión Regional de Salvaguarda del Patrimonio Arqueológico Industrial**, bajo la asesoría del Ministerio de Educación. La función de la Comisión sería evaluar propuestas previas de valorización y uso de centros e instalaciones mineras abandonadas, procedentes de solicitudes formuladas por las autoridades locales (31).

ESPAÑA Y PORTUGAL.

En 1977, desde el **Colegio de Ingenieros Industriales de Cataluña** partió la iniciativa de crear el **Museo de la Ciencia y de**

la **Técnica de Cataluña (MNCTC)**. Según señala EUSEBI CASENELLES (1996): "La piedra angular de sensibilización sobre el patrimonio industrial ha sido el **Museo de la Ciencia y su Asociación**" (32). A iniciativa de estos colectivos se realizaría en Bilbao, el año 1982, las **I Jornadas sobre Protección y Revalorización del Patrimonio Industrial**; las segundas se celebraron en Barcelona, en 1988. También han organizado tres congresos catalanes sobre el tema.

El Plan Nacional de Interés Comunitario, de 1986, incluyó entre las acciones propuestas la construcción del **Museo de la Minería y de la Industria de Asturias**. El desarrollo del proyecto (1992), sobre la escombrera del pozo San Vicente de El Entrego, permitiría la inauguración del Museo en 1994. La cifra de visitantes supera a los 80.000 anuales (33).

En Portugal, la primera actividad sobre estos temas, tal vez fuera, el **I Encuentro Nacional sobre el Patrimonio Industrial**, celebrado en Coimbra, en 1989.

En 1990, se organizan las **I Jornadas Ibéricas del Patrimonio Industrial y la Obra Pública**, en Sevilla. En 1992, se celebra, en Madrid, el **VIII Congreso Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial**. Asimismo a principios de los noventa nacieron la **Asociación Española de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública**, con sede en Madrid, y la **Associação Portuguesa de Arqueologia Industrial (APAI)**, con sede en Lisboa.

En 1992 se puso en marcha el **Museo de Río Tinto**, a iniciativa de la Fundación con idéntico nombre, creada tras la crisis del cobre, en 1986, para el desarrollo de la comarca (Fig.-8). El museo, consistente en 15 salas con 1600 m² de superficie, gracias a las mejoras realizadas a finales de 1992 y noviembre de 1993. Junto a la entrada al museo se oferta el viaje en ferrocarril minero, visitas a una necrópolis y a la mina a cielo abierto de Corta Atalaya, etc. Pretenden iniciar recorridos de interior con la apertura del Pozo Alfredo (34). La cifra anual de visitantes se acerca a los 35.000.

En 1991 se puso en marcha el **Proyecto Arrayanes**, para recuperar el Patrimonio Minero-Industrial de Linares, aunque está todavía en fase de realización (35). En 1992, la **Asociación Amigos del Museo "Ferrería de San Blas"** inició la



Fig.-8

andadura para crear un Museo de Minería en Sabero. Y, en octubre de 1993, se abriría al público la primera mina museo subterránea, se trata de las explotaciones neolíticas de variscita-turquesa de **Can Tintorer**, en Gavá, Barcelona.

En 1993, a iniciativas del MNCTC se organizaría, en Ripoll, el **1º Simposio Internacional sobre Farga Catalana**. Antes la **Asociación de Amigos de la Ferrería de Cades** había montado unos **Encuentros sobre la Restauración de Ferrerías en el Norte de España** (36).

En el **IX Congreso Internacional de Minería y Metalurgia**, celebrado en León, en Junio de 1994, presentamos varias comunicaciones sobre la conservación del patrimonio minero. Tal situación llevó a que entre las conclusiones del área IV se señalase: "Es necesaria una actuación urgente por parte de las diversas administraciones para la protección y valorización del importante patrimonio minero-metalúrgico español" (37).

Poco después se iniciaron las gestiones para constituir la **Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero**, puesta legalmente

en marcha a finales de 1995 y que hoy en día supera con creces los 150 socios, prosiguiendo su crecimiento. En octubre de 1996, se celebró en Almadén, la **I Sesión Científica de la SEDPGYM: Patrimonio Minero-Metalúrgico**, primer Simposio Nacional donde se abordó este tema y buscándose en la Mesa Redonda final la definición conceptual del mismo.

La relación de museos españoles, la tomamos de forma resumida de un artículo de PUCHE, O y MAZADIEGO, L. (1996) en la revista **Tecnoambiente** (38): **Canteras Romanas**, en Canteras; **Centro de Interpretación de la Minería**, en Barruelo de Santuyán; **Ecomuseo Comarcal de Linares**, en Linares; **Farga de Bañolas**, en Bañolas; **Farga d'Ordeig**, en Ordeig; **Minas de Plomo de Bellmont**, en Bellmont; **Minas y Montaña de Sal de Cardona**, en Cardona; **Minas Neolíticas de Can Tintorer**, en Gavá; **Ferrería de Aia**, cerca de Zarauz; **Ferrería de Besullo**, cerca de Cangas de Narcea; **Ferrería de Cades**, en Herrerías; **Ferrería de Cerain**, en Cerain; **Ferrería de Dos Teixos**, en Taramundi; **Ferrería de La Mirándola**, en Legazpi; **Ferrería de Mazonovo**, en Santa Eulalia de Oscos; **Ferrería del Monasterio de Belmonte**; **Herrería de Compludo**, en Compludo; **Las Médulas**, en Carucedo; **Museo Geominero**, en Madrid; **Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón**, en Madrid; **Museo Histórico Minero Francisco Pablo Holgado**, en Almadén; **Museo de MAYASA**, en Almadén; **Museo de la Minería de Castilla y León**, en Sabero; **Museo de la Minería de Cataluña**, en San Corneli/Cercs; **Museo de la Minería y de la Industria**, en El Entrego; **Museo Municipal de Puertollano**, en Puertollano; **Museo Municipal de La Unión**, en La Unión; **Museo Nacional de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña**, en Tarrasa/Barcelona; **Museo de la Pizarra**, en Puente de Domingo Flórez; **Museo de la Pizarra**, en Trones; **Museo de Río Tinto**, en Río Tinto; **Museo de Ripoll**, en Ripoll; **Museo de la Sal**, en Cardona; **Museo de Valverde**, en Valverde del Camino; **Parque Natural de Cabárceno**, en Cabárceno; etc.

En cuanto al inventario patrimonial destacar iniciativas locales o regionales. El próximo año, se va a poner en marcha en Cataluña un Proyecto de Inventario General del Patrimonio Industrial. En Murcia, la **Dirección General de Patrimonio** de dicha Comunidad, desde hace unos años, está inventariando el Patrimonio Industrial, destacando 95

elementos arquitectónicos referenciados, de la minería histórica de la Sierra de La Unión-Cartagena. En esta región destacamos también el **Inventario con foto de castilletes de mina**, realizado por GONZALO GARCIA et al. (39), así como el **Inventario del Patrimonio Minero-Metalúrgico de la Hoja de Murcia**, realizado por PUCHE, O., en 1996, para una Hoja Piloto del Mapa de Temática Medioambiental de España. En Asturias y otras Comunidades también ha habido iniciativas de carácter parcial.

Por último, recordar que en el Museo de la Minería y de la Industria de El Entrego, se guardan los archivos de la Sociedad Hullera Española y de Santa Bárbara. Asimismo, en el Museo Geominero están depositados los archivos de la empresa nacional ADARO. Los de HUNOSA se guardan en el pozo Fondón, de Asturias. Y los centenarios de Hullera Vasco Leonesa S.A., están organizados por la Fundación Hullera Vasco Leonesa, en La Robla.

PAISES DEL ESTE.

Los territorios de la antigua órbita soviética muestran un menor desarrollo en estos temas que Europa Occidental. En su estudio excluimos Alemania Oriental que ya la hemos visto al pasar revista a este país de forma unificada. Los primeros museos habría que vincularlos a los municipios con Escuelas Mineras, tal es el caso del **Museo de Minería y Geología de Banská Stianica** (Schmnitz), en Eslovaquia, o el pequeño **Museo de Minería de Sopron** (Ódenburg), en Hungría (40).

En 1967, se organiza el **Museo del Oro. Mine Pepr**, en Jilova, República Checa (41). En Eslovaquia destacamos asimismo **Kosica**, ciudad convertida en Patrimonio Mundial de la Humanidad por la UNESCO, con el **East Slovak Artistic Casting Museum**, con numerosos objetos, donde algunos han querido ver una copia trasladada a Checoslovaquia del libro de AGRICOLA, **De re metallica**. Señalar también la **Farga Medzev**, situada a 25 km. de distancia, de la localidad anterior. Destacar asimismo el **Museo del Hierro de Lillafürd**, en Miskolc, cerca de Budapest (42).

El museo minero más importante de los Países del Este es **Wielicka**, en Polonia, con más de 200.000 visitantes/año. En una antigua explotación subterránea de

halita, en la que se ha estructurado un museo mineralógico y de la historia de minería de la sal. Se visitan las antiguas cámaras, entre pilares, así como pozos y galerías. Lámparas y estatuas de sal, una iglesia tallada en la roca, recorridos subterráneos en barca y restaurante bajo tierra, constituyen algunos de los atractivos del lugar.

A continuación relacionamos algunos de los museos mineros y minas museos más importantes. En Chequia tenemos **Mine Pepr**, en Jilova; **National Museum**, de Praga; **Ostrava Museum**, en Ostrava; etc. En Hungría, **Iron Museum**, en Lillarfürd; etc. En Polonia, reseñar las **Minas de Sal**, en Wielicka; la **Minas de Sulfuros**, en Olskuz; **Mining Museum**, en Tarnowskie Góry; **Museum Gornictwa Weglowego**, en Zabrze; etc. En Rumanía indicar, **Mining Museum**, en Petrosani; **Museo del Oro de Transilvania**, en Brad; etc. En Eslovaquia señalar, la **Medzev Farge**, en Medzev; la **Mina Museo**, en Medenec; la **Mina de Plata**, en Banská Stianica; el **Museo de Minería y Geología**, también en Banská Stianica, etc. Por último, en Eslovenia tenemos, las **Minas de Mercurio**, en Idria; etc.

OTROS PAISES.

En 1988, se celebró en Grecia una reunión sobre Arqueología Industrial, convocada por la **Sociedad Arqueológica de Atenas**, aunque en este país sólo conocemos la recuperación de algún pequeño inmueble minero en Lavrión.

En Suiza, destacamos la existencia de al menos cuatro museos mineros: **Bergbaumuseum und Besucherbergwerk Käpfnach**, en Horgen; **Bergbaumuseum Graubünden Schmelzboden-Davas Schaubergwerk Silberwerk**, en Davon-Platz; **Eisenbergwerk Gonzen A.G.**, en Sargans y **Salzbergwerk Le Bouillet**, en Bex. Esta última mina es la más conocida.

ANÁLISIS DE LOS MUSEOS MINEROS POR MATERIAS.

Hemos estudiado cerca de 200 minas museo por sustancias, para ver si destacaba alguna temática sobre otras. Esta división por materias permite centrarse en los ejemplos similares al caso particular a estudiar.

MINERÍA METALICA:

El 56,8% de las minas museo corres-

ponde a explotaciones de sustancias metálicas. Lo cual es lógico al ser la minería metálica la de mayor peso histórico.

Lo que más abundan son minas de **sulfuros B.C.P.G.** y **Fe-Ni-Co**, en muchos casos con producciones argentíferas, constituyendo porcentualmente el 24,5% del total y 43,1% de las metálicas. A continuación relatamos algunas localidades con museos de minería o minas museo de este tipo: Altenberg (D), Amont (N), Aue (D), Bad Bilungen-Bergfreiheit (D), Bad Bleiger (A), fundición de cobre de Bañolas (E), Bellmunt (E), Bergish-Gladbach (D), Beswig-Ramsberg (D), Bodenmais (D), Champdepraz (I), Fisbach-Nahe (D), Freiberg (D), Freiburg (D), Frohau (D), Goslar (D), Hilchenbach-Müsen (D), Hünsteral (D), Jochberg (A), Kirchheimboladen (D), La Unión (E), Leogang (A), Lokken (N), Llandudno (Gb), Måsberg (D), Massa Marittima (I), Meissner-Abteroue (D), Minera (Gb), Muelbach (A), North Travistock (Gb), Oberschöna (D), Oelsenitz (D), Olskuz (Po), Poberschau (D), Pontgibaud (F), Río Tinto (E), Røros (N), Saarlouis (D), Schriesheim (D), Siegen (D), Sygun (Gb), Valverde del Camino (E), Vipiteno (I), Wanlockhead (Gb), Waschleithe (D), Wettelrode (D), Wieden-Utzenfeld (D), etc.

Luego tenemos el **hierro**, lo que supone un 12% del total y un 21,1% de las metálicas; no sólo contabilizamos minas y museos, sino antiguas ferrerías y altos hornos, tal es el caso de Aia (E), Arendal (N), Besullo (E), Cerain (E), Cinderford (Gb), Dormund (D), Dos Teixos (E), Eisenerz (A), Ekilstuna (S), Elbingerode (D), Forsmarks (S), Herrerías (E), Hütenberg-Kärtern (A), Iron Bridge (Gb), Karlholms (S), Kosica (SI), Langbans (S), Legazpi (E) (Fig.-9), Lieja (Be), Lillafürd (H), Mazonovo (E), Medenec (Cz), Medzev (SI), Nancy (F), Österbybruk (S), Outokumpu (Fi), Ripoll (E), Saint Hubert (Be), Sulitjelma (N), Vällnora (S), Vöcklingen (D), Vordenberg (A), etc.

Tras las minas de hierro y ferrerías lo que más abunda, en metálicos, son las minas de **plata**, constituyendo el 10,4% del total y el 18,3% de las metálicas. Muchas de las minas que hemos considerado de sulfuros producían importantes cantidades de plata, tal es el caso de Pontgibaud, Vipiteno o Linares, pero no las hemos considerado en este grupo.



Fig.-9: Ferrería de la Mirándola. Legazpi, Guipúzcoa. Cortesía Asociación de Amigos del Museo del Hierro Burdinola.

Destacamos las siguientes localidades: Alpe D'Huez (F), L'Argentiere-La-Besse (F), Banská Stianica (SI), Bayreuth (D), Bleihalf (D), Davon-Platz (Ch), Geising (D), Johangeorgenstadt (D), Kronsberg (N), Langelsheim-Lautenthals (D), Melle (F), Perosa Argentina (I), Ponterwyd (Gb), Oberzeiring (A), Sala (S), Sank Andreasberg (D), Schönborn-Dreiwerden (D), Schwaz (A), Le Tillot (F), etc.

El **oro** constituye, museísticamente hablando, el 5,2% del total y el 9,2% de las metálicas. Entre los museos mineros y minas museos señalar los de Brad (Ru), Dolgellau (Gb), Jilova (Cz), Jumilhac-Le-Grand (F), Lampeter (Gb), Las Médulas (E), Lyklyn (N), Macugnaga (I), Pedrosa (I), Tankavaara (Fi), etc. En este tema además hay numerosas asociaciones locales, regionales y nacionales de bateadores de oro, que organizan campeonatos de forma continuada. En España la SEDPGYM organiza uno para Julio de 1998.

También hay otros metales pegmatíticos, así como hidrotermales de baja temperatura, e incluso de otras génesis, que no se recogen en los epígrafes anteriores, constituyendo el 4,7% del total y el 8,3% de los metálicos. Enumeramos primero el caso del **cinabrio**, tal y como corresponde a las minas de Almadén (E), Bad Münster (D), Idria (Yu), Monte Amiatta (I), etc. Luego indicar las minas de **manganeso**, de origen diverso, como Asbach (D), Gebhardschain (D), Neunbürg (D), Sargans (Ch), etc. En el caso del **estaño** tenemos Pendeen (Gb), etc. Y en el del **antimonio**, Massiac (F), etc.

MINERÍA NO METALICA:

El 38,5% de las minas museos o museos mineros corresponde a sustancias no metálicas, como el carbón, la sal o los materiales de construcción.

Entre los no metales lo que más abunda son las minas de **carbón**. Las cuencas hulleras europeas que han funcionando a pleno rendimiento desde los orígenes de la revolución industrial, han ido cerrando principalmente entre los años setenta y ochenta. Esto ha llevado a que se buscasen alternativas turísticas para recolocar parte de la mano de obra excedente e impedir el despoblamiento de zonas rurales. A nivel museístico suponen el 14,6% del total y el 37,8% de los no metálicos. Destacamos las localidades de Alès (F), Barruelo de Santuyán (E), Beringen (Be), Blaenafort (Gb), Blegny-Trimbleur (Be), Bexbach, en el Sarre (D), Cercs (E), Clausthal-Zellerfeld (D), Chatterley-Whitfield (Gb), Decazeville (F), El Entrego (E), Essen, en el Ruhr (D), Fontaine-L'Eveque (F), Horgen (Ch), Houdeng-Aimeres (Be), Iron Bridge (Gb), Lewarde (F), Lieja (Be), Nievre (F), Overton (Gb), Pissemsberg (D), Petit Roselle (F), Puertollano (E), La Robla (E), Sabero (E), Saint Etienne (F), Le Tarn (F), Teuchen (D), Villard Saint Pancrace (F), Wasmes (Be), etc.

Tras el carbón destacan los **materiales de construcción** con el 13,4% del total y el 34,5% de los no metálicos. En este grupo destacamos la **pedra de corte**. Principalmente tenemos **pizarras**, tal es el caso de Blaenau Ffestinoig (Gb), Caumont-L'Eveque (F), Llanfair (Gb), Llanberis (Gb) (Fig.-10), Noyant-La-Gravoyère (F), Puentes de Domingo Flores (E), Trones (E), etc. Luego destacan **calizas y mármoles**, tal es el caso de Basecles (Be), Canteras (E), Carrara (I), Chemnitz (D), Loha (Fi), Maffle (Be), Nolfstein (D), Rance (Be), etc. En **otras piedras o museos de la piedra en general** tenemos, Muno (Be), Vielam-Salmchateau (piedra de afilar) (Be), Rebec-Rognon (Be), Wirkswork (Gb), etc. En el caso de otros materiales para la construcción destacar las **caleras y hornos de cal**, de Antoing (Be), Cinto Euganeo (I), etc. **Yeso**, en Hinterbrüll (A), etc. **Sílex**, en Eben-Emael (Be). **Ladrillería**, en Boom (Be). Y **puzzolana**, en St. Ours (F).

También destacan los museos y las minas museo de la **sal**: 6,8% del total y 17,6% de los no metálicos. Este es el

ponde a explotaciones de sustancias metálicas. Lo cual es lógico al ser la minería metálica la de mayor peso histórico.

Lo que más abundan son minas de **sulfuros** B.C.P.G. y Fe-Ni-Co, en muchos casos con producciones argentíferas, constituyendo porcentualmente el 24,5% del total y 43,1% de las metálicas. A continuación relatamos algunas localidades con museos de minería o minas museo de este tipo: Altenberg (D), Amont (N), Aue (D), Bad Bilungen-Bergfreiheit (D), Bad Bleiger (A), fundición de cobre de Bañolas (E), Bellmunt (E), Bergish-Gladbach (D), Beswig-Ramsberg (D), Bodenmais (D), Champdepraz (I), Fisbach-Nahe (D), Freiberg (D), Freiburg (D), Frohau (D), Goslar (D), Hilchenbach-Müsen (D), Hünstertral (D), Jochberg (A), Kirchheimboladen (D), La Unión (E), Leogang (A), Lokken (N), Llandudno (Gb), Masberg (D), Massa Marittima (I), Meissner-Abteroue (D), Minera (Gb), Muelbach (A), North Travistock (Gb), Oberschöna (D), Oelsenitz (D), Olkuz (Po), Pobershau (D), Pontgibaud (F), Rio Tinto (E), Røros (N), Saarlouis (D), Schriesheim (D), Siegen (D), Sygun (Gb), Valverde del Camino (E), Vipiteno (I), Wanlockhead (Gb), Waschleithe (D), Wettelrode (D), Wieden-Utzenfeld (D), etc.

Luego tenemos el **hierro**, lo que supone un 12% del total y un 21,1% de las metálicas; no sólo contabilizamos minas y museos, sino antiguas ferrerías y altos hornos, tal es el caso de Aia (E), Arendal (N), Besullo (E), Ceraín (E), Cinderford (Gb), Dormund (D), Dos Teixos (E), Eisenerz (A), Ekilstuna (S), Elbingerode (D), Forsmarks (S), Herrerías (E), Hütenberg-Kärtern (A), Iron Bridge (Gb), Karlholms (S), Kosica (SI), Langbans (S), Legazpi (E) (Fig.-9), Lieja (Be), Lillaförd (H), Mazonovo (E), Medenec (Cz), Medzev (SI), Nancy (F), Österbybruk (S), Outokumpu (Fi), Ripoll (E), Saint Hubert (Be), Sulitjelma (N), Vällnora (S), Vöcklingen (D), Vordenberg (A), etc.

Tras las minas de hierro y ferrerías lo que más abunda, en metálicas, son las minas de **plata**, constituyendo el 10,4% del total y el 18,3% de las metálicas. Muchas de las minas que hemos considerado de sulfuros producían importantes cantidades de plata, tal es el caso de Pontgibaud, Vipiteno o Linares, pero no las hemos considerado en este grupo.

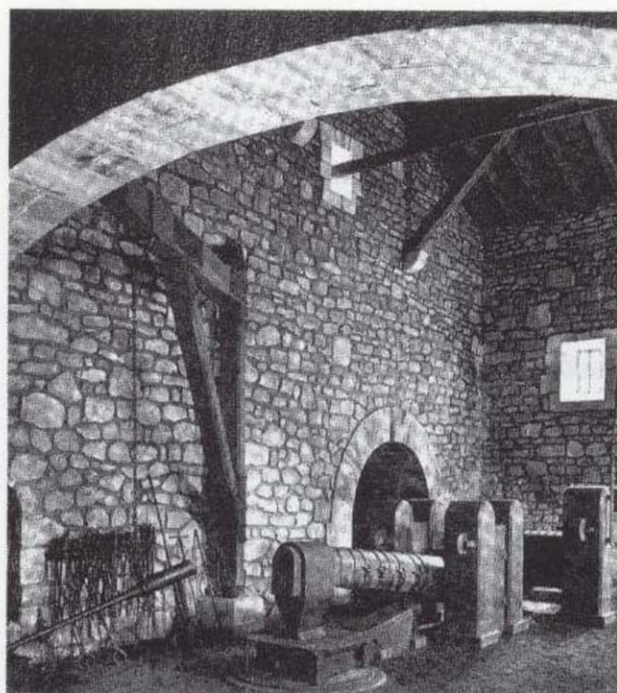


Fig.-9: Ferrería de la Mirándola. Legazpi, Guipúzcoa. Cortesía Asociación de Amigos del Museo del Hierro Burdinola.

Destacamos las siguientes localidades: Alpe D'Huez (F), L'Argentiere-La-Besse (F), Bănska Stiavnica (SI), Bayreuth (D), Bleihalf (D), Davon-Platz (Ch), Geising (D), Johangeorgenstadt (D), Kronsberg (N), Langelsheim-Lautenthals (D), Melle (F), Perosa Argentina (I), Ponterwyd (Gb), Oberzeiring (A), Sala (S), Sank Andreasberg (D), Schönborn-Dreiwerden (D), Schwaz (A), Le Tillot (F), etc.

El **oro** constituye, museísticamente hablando, el 5,2% del total y el 9,2% de las metálicas. Entre los museos mineros y minas museos señalar los de Brad (Ru), Dolgellau (Gb), Jilova (Cz), Jumilhac-Le-Grand (F), Lampeter (Gb), Las Médulas (E), Lyklyn (N), Macugnaga (I), Pedrosa (I), Tankavaara (Fi), etc. En este tema además hay numerosas asociaciones locales, regionales y nacionales de bateadores de oro, que organizan campeonatos de forma continuada. En España la SEDPGYM organiza uno para Julio de 1998.

También hay otros metales pegmatíticos, así como hidrotermales de baja temperatura, e incluso de otras génesis, que no se recogen en los epígrafes anteriores, constituyendo el 4,7% del total y el 8,3% de los metálicos. Enumeramos primero el caso del **cinabrio**, tal y como corresponde a las minas de Almadén (E), Bad Münster (D), Idria (Yu), Monte Amiatta (I), etc. Luego indicar las minas de **manganeso**, de origen diverso, como Asbach (D), Gebhardschain (D), Neunbürg (D), Sargans (Ch), etc. En el caso del **estaño** tenemos Pendeen (Gb), etc. Y en el del **antimonio**, Massiac (F), etc.

MINERIA NO METALICA:

El 38,5% de las minas museos o museos mineros corresponde a sustancias no metálicas, como el carbón, la sal o los materiales de construcción.

Entre los no metales lo que más abunda son las minas de **carbón**. Las cuencas hulleras europeas que han funcionado a pleno rendimiento desde los orígenes de la revolución industrial, han ido cerrando principalmente entre los años setenta y ochenta. Esto ha llevado a que se buscasen alternativas turísticas para recolocar parte de la mano de obra excedente e impedir el despoblamiento de zonas rurales. A nivel museístico suponen el 14,6% del total y el 37,8% de los no metálicos. Destacamos las localidades de Alès (F), Barruelo de Santuyán (E), Beringen (Be), Blaenafort (Gb), Blegny-Trimbleur (Be), Bexbach, en el Sarre (D), Cercs (E), Clausthal-Zellerfeld (D), Chatterley-Whitfield (Gb), Decazeville (F), El Entrego (E), Essen, en el Ruhr (D), Fontaine-L'Eveque (F), Horgen (Ch), Houdeng-Aimeres (Be), Iron Bridge (Gb), Lewarde (F), Lieja (Be), Nièvre (F), Overton (Gb), Pisseberg (D), Petit Roselle (F), Puertollano (E), La Robla (E), Sabero (E), Saint Etienne (F), Le Tarn (F), Teuchen (D), Villard Saint Pancrace (F), Wasmes (Be), etc.

Tras el carbón destacan los **materiales de construcción** con el 13,4% del total y el 34,5% de los no metálicos. En este grupo destacamos la **piedra de corte**. Principalmente tenemos **pizarras**, tal es el caso de Blaenau Ffestinoig (Gb), Caumont-L'Evente (F), Llanfair (Gb), Llanberis (Gb) (Fig.-10), Noyant-La-Gravoyère (F), Puentes de Domingo Flores (E), Trones (E), etc. Luego destacan **calizas y mármoles**, tal es el caso de Basecles (Be), Canteras (E), Carrara (I), Chemnitz (D), Loha (Fi), Maffle (Be), Nolfstein (D), Rance (Be), etc. En **otras piedras o museos de la piedra en general** tenemos, Muno (Be), Vielam-Salmchateau (piedra de afilar) (Be), Rebec-Rognon (Be), Wirkswork (Gb), etc. En el caso de otros materiales para la construcción destacar las **caleras y hornos de cal**, de Antoing (Be), Cinto Euganeo (I), etc. **Yeso**, en Hinterbrüll (A), etc. **Sílex**, en Eben-Emael (Be). **Ladrillería**, en Boom (Be). Y **puzzolana**, en St. Ours (F).

También destacan los museos y las minas museo de la **sal**: 6,8% del total y 17,6% de los no metálicos. Este es el

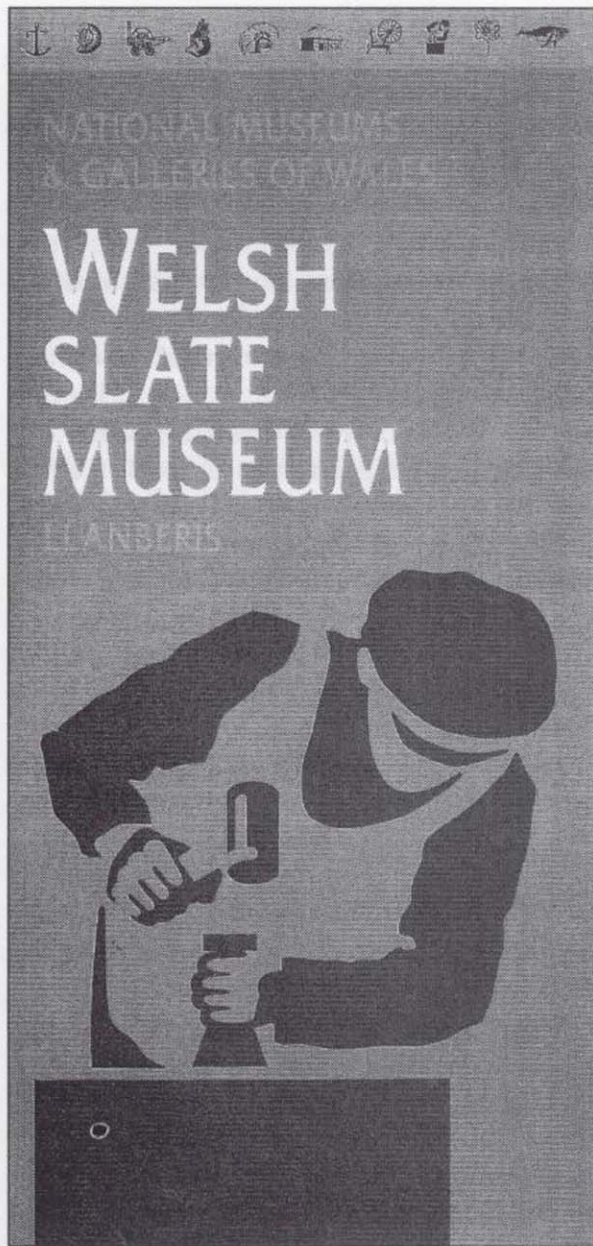


Fig.-10

caso de Altausse (A), Bad Ischl (A), Berchtesgaden (D), Bex (Ch), Cardona (E), Hallein-Dürnberg (A), Hallstatt (A), Heilbronn (D), Merkers (D), Northwich (Gb), Salzhemdorf (D), Wieliscka (Po), etc. Ocasionalmente también se realiza alguna excursión a las minas de sal de Slanik, en Rumania.

En cuanto a elementos nativos no metálicos tenemos el 2,1% del total y el 5,4% de los no metálicos. Destacar el **azufre**, en Peticara (I), Urbino (I), etc. **Diamantes**, en Grodbendonk, cerca de Amberes (Be). Y **Grafito** en Hauzenberg (D).

Otras sustancias serían la **fluorita** en Stullen-Frefhung (D), **variscita-turquesa**, en Can Tintorer, Gavá (E), las **ágatas**, en Idar-Oberstein (D), etc.

MUSEOS MINEROS DE INDOLE GENERAL:

Casi todos los museos muestran la especificidad de los productos de la

mina en la que se asientan o de la cuenca que representan. Sin embargo tenemos un 4,7% de los museos con carácter generalista, aunque esta apreciación es muy difícil de realizar. La mayor parte de estos museos son de índole nacional y pretenden recoger las características generales de la historia de la minería de un país, ubicándose en muchos casos en las capitales o en las principales Escuelas de Minas. Consideramos los de las siguientes localidades: Almadén (E), Bochum (D), Kerkrade (NI), Hornes (N), L'Iglesia (I), Madrid (E), München (D), Oslo (N), París (F), Praga (Cz), Sopron (H), etc.

CONCLUSIONES.

En Europa se está haciendo un esfuerzo muy grande para la conservación del Patrimonio Minero-Metalúrgico. Esta experiencia puede ser de utilidad para nuevas iniciativas que se tomen en el Viejo Continente y también para otros lugares del Mundo. Sospechamos que buena parte de las reliquias materiales que el Patrimonio atesora no sean objeto de la debida atención y cuidado, al menos en muchas cuencas mineras en recesión o abandono.

Los proyectos conservacionistas desarrollados han sido por lo general apoyados desde las Instituciones, pero muchos parten desde la iniciativa privada, porque es un campo de negocio. No existe todavía la conciencia clara del potencial económico turístico que en la era postindustrial representa la difusión a nivel masivo de tales tesoros arqueológicos.

Parece ser que la reconstrucción de labores, edificios, e ingenios antiguos "in situ", preservando su entorno cultural y natural, es la tendencia actual, frente al decimonónico concepto de "museo cementerio", donde se guardaban pequeños bienes muebles histórico-mineros. Estos se situaban en las grandes ciudades, alejando los objetos de su contexto.

La Sociedad del Ocio-Bienestar vuelve sus ojos hacia la Naturaleza y las muestras reconstruidas de actividades pasadas. La minería al ser la industria histórica por excelencia ha dejado huellas, de incalculable valor arqueológico, por casi todos los lugares.

Parece pues el momento de debatir en España estos temas. Hay que plantearse

una serie de preguntas, tales como: ¿Cuáles son los problemas que se plantean en cada Comunidad concreta? ¿Qué potencialidades disponen? ¿Cómo se pueden poner en marcha recursos para su desarrollo? ¿Hace falta una concienzada social sobre estas propuestas?. Etc.

Trás el inventario, habría que seleccionar las zonas con mayores necesidades y posibilidades. Los factores de éxito en la estructuración de minas museo se fundamentarían en:

1.-Asegurar el tratamiento más exhaustivo del tema elegido. Sin olvidar que aparentemente lo de mayor seducción para el turismo escolar, de familia y de la tercera edad, que se canaliza hacia estos lugares, son las visitas de interior y el paseo en ferrocarril.

2.-Buscar la originalidad en la presentación. Hoy en día, en Europa, concurren tantas ofertas que ya hace falta dar un toque especial a cada museo, para suscitar el interés general del público.

3.-Beneficiarse de una cierta exclusividad regional, así como buscar su ubicación en una zona no muy apartada de los grandes núcleos urbanos. El público potencial que pudiese asistir es un tema importante de cara a la rentabilidad de la explotación.

4.-Combinación del uso cultural y comercial. En algunas minas museo se incluyen hospitales subterráneos, tal es el caso de Bad Bleiger (A), Neublach (D) o Wieliscka (Po), pero lo más frecuente son la coexistencia de otras actividades lucrativas, tal es el caso restaurantes, cafeterías, tiendas de recuerdos, espectáculos, etc., que permiten obtener ingresos adicionales.

5.-Se sujere la integración en circuitos más complejos, tales como museos territoriales, espacios naturales, parques de atracciones, así como otras visitas de índole lúdico o cultural.

El interés por el patrimonio minero se aprecia en la constitución de asociaciones como la **Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero**, con sede en la Escuela de Minas de Madrid.

AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos a los directores y conser-

WELSH SLATE MUSEUM

Fig.-10

caso de Altausse (A), Bad Ischl (A), Berchtesgaden (D), Bex (Ch), Cardona (E), Hallein-Dürnberg (A), Hallstatt (A), Heilbronn (D), Merkers (D), Northwich (Gb), Salzhemdorf (D), Wieliscka (Po), etc. Ocasionalmente también se realiza alguna excursión a las minas de sal de Slanik, en Rumania.

En cuanto a elementos nativos no metálicos tenemos el 2,1% del total y el 5,4% de los no metálicos. Destacar el **azufre**, en Peticara (I), Urbino (I), etc. **Diamantes**, en Grodbendonk, cerca de Amberes (Be). Y **Grafito** en Hauzenberg (D).

Otras sustancias serían la **fluorita** en Stullen-Freffhung (D), **variscita-turquesa**, en Can Tintorer, Gavá (E), las **ágatas**, en Idar-Oberstein (D), etc.

MUSEOS MINEROS DE INDOLE GENERAL:

Casi todos los museos muestran la especificidad de los productos de la

mina en la que se asientan o de la cuenca que representan. Sin embargo tenemos un 4,7% de los museos con carácter generalista, aunque esta apreciación es muy difícil de realizar. La mayor parte de estos museos son de índole nacional y pretenden recoger las características generales de la historia de la minería de un país, ubicándose en muchos casos en las capitales o en las principales Escuelas de Minas. Consideramos los de las siguientes localidades: Almadén (E), Bochum (D), Kerkrade (NI), Hornes (N), L'Iglesia (I), Madrid (E), München (D), Oslo (N), París (F), Praga (Cz), Sopron (H), etc.

CONCLUSIONES.

En Europa se está haciendo un esfuerzo muy grande para la conservación del Patrimonio Minero-Metalúrgico. Esta experiencia puede ser de utilidad para nuevas iniciativas que se tomen en el Viejo Continente y también para otros lugares del Mundo. Sospechamos que buena parte de las reliquias materiales que el Patrimonio atesora no sean objeto de la debida atención y cuidado, al menos en muchas cuencas mineras en recesión o abandono.

Los proyectos conservacionistas desarrollados han sido por lo general apoyados desde las Instituciones, pero muchos parten desde la iniciativa privada, porque es un campo de negocio. No existe todavía la conciencia clara del potencial económico turístico que en la era postindustrial representa la difusión a nivel masivo de tales tesoros arqueológicos.

Parece ser que la reconstrucción de labores, edificios, e ingenios antiguos "in situ", preservando su entorno cultural y natural, es la tendencia actual, frente al decimonónico concepto de "museo cementerio", donde se guardaban pequeños bienes muebles histórico-mineros. Estos se situaban en las grandes ciudades, alejando los objetos de su contexto.

La Sociedad del Ocio-Bienestar vuelve sus ojos hacia la Naturaleza y las muestras reconstruidas de actividades pasadas. La minería al ser la industria histórica por excelencia ha dejado huellas, de incalculable valor arqueológico, por casi todos los lugares.

Parece pues el momento de debatir en España estos temas. Hay que plantearse

una serie de preguntas, tales como: ¿Cuáles son los problemas que se plantean en cada Comunidad concreta? ¿Qué potencialidades disponen? ¿Cómo se pueden poner en marcha recursos para su desarrollo? ¿Hace falta una concienzada social sobre estas propuestas? Etc.

Trás el inventario, habría que seleccionar las zonas con mayores necesidades y posibilidades. Los factores de éxito en la estructuración de minas museo se fundamentarían en:

1.-Asegurar el tratamiento más exhaustivo del tema elegido. Sin olvidar que aparentemente lo de mayor seducción para el turismo escolar, de familia y de la tercera edad, que se canaliza hacia estos lugares, son las visitas de interior y el paseo en ferrocarril.

2.-Buscar la originalidad en la presentación. Hoy en día, en Europa, concurren tantas ofertas que ya hace falta dar un toque especial a cada museo, para suscitar el interés general del público.

3.-Beneficiarse de una cierta exclusividad regional, así como buscar su ubicación en una zona no muy apartada de los grandes núcleos urbanos. El público potencial que pudiese asistir es un tema importante de cara a la rentabilidad de la explotación.

4.-Combinación del uso cultural y comercial. En algunas minas museo se incluyen hospitales subterráneos, tal es el caso de Bad Bleiger (A), Neubulach (D) o Wieliscka (Po), pero lo más frecuente son la coexistencia de otras actividades lucrativas, tal es el caso restaurantes, cafeterías, tiendas de recuerdos, espectáculos, etc., que permiten obtener ingresos adicionales.

5.-Se sujere la integración en circuitos más complejos, tales como museos territoriales, espacios naturales, parques de atracciones, así como otras visitas de índole lúdico o cultural.

El interés por el patrimonio minero se aprecia en la constitución de asociaciones como la **Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero**, con sede en la Escuela de Minas de Madrid.

AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos a los directores y conser-

vadores, de buena parte de los museos relacionados, la remisión de la información sobre sus instituciones, así como a compañeros y amigos, rogándoles que me disculpen por no poner la relación personal de todos ellos, por que sería una lista de gran extensión. Agradecemos también a D. Angel García Cortés, del ITGE, su colaboración, ya que inició con Octavio Puche la recogida de datos sobre este tema, en 1994. Con él estamos desarrollando para la C.A.M. un proyecto de conservación del Patrimonio Minero-Metalúrgico Madrileño.

REFERENCIAS:

(1) LOPEZ GARCIA, M. (1992). El concepto de patrimonio. El patrimonio industrial o la memoria del lugar. **ABACO**, 1, 9-12 (2ª época). Gijón.

(2) LOPEZ AZCONA, J.M. y MESEGUER PARDO, J. (1951). **Contribución a la historia de la geología y minería españolas**. Ed. IGME. Madrid. Pág. 145.

(3) ANONIMO (1862). Museo arqueológico minero. **Rev. Minera**, T. XIII, pág. 286. Madrid.

(4) NARANJO, F. (1865). Memoria sobre el estado de la Minería en la provincia de Murcia. **Rev. Minera**, T. XVI, 384-410. Madrid.

(5) RUA DE FIGUEROA, R. (1864). Composición de un vidrio de época romana. **Rev. Minera**, T. XV, 45-49. Madrid.

(6) FOURNET, R. (1862). **Du minier, son rôle et son influence sur le progrès de la civilisation**. Pág. 207. París.

(7) PUCHE, O. y AYARZAGÜENA, M. (1997). Homenaje a Casiano de Prado (1797-1866) en el bicentenario de su nacimiento. Ingenieros de Minas Arqueólogos en el siglo XIX. La huella de Prado. **Bol. Geol. y Minero**, 108(3), 79-99.

(8) MINISTERE DE FOMENTO (1883). **Exposition Nationale. Mines, Arts Metallurgiques, Céramique, Cristallerie et Eaux Minérales. Catalogue General**. Imp. Suc. Rivadeneyra. Pág. 199. Madrid.

(9) PUCHE, O. et al. (1994). 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. **Bol. Geológico y Minero**, 105 (5), 79-90. Madrid.

(10) REHREN, TH. et al. (1994). Deutsches Bergbau-Museum, Bochum. **2nd International Exhibition of Minerals & Fossils**, 44-47, Greek Ministry of Industry, Energy & Technology. Atenas.

(11) SANTACREU SOLER, J.M. (1992). Una visión global de la arqueología industrial en Europa. Casos concretos en regiones concretas. **ABACO**, 1, 13-28, 2ª época. Gijón.

(12) ANONIMO (1993). Patrimonio histórico-minero. Imágen del pasado y enseñanza para el futuro. **Industria Minera**, 325, 3-4. Torres de Elorz. Navarra.

(13) PUCHE, O. (1996). Conservación del Patrimonio Minero en Gran Bretaña. **Boletín S.E.D.P.G.Y.M.**, 5, 2. Madrid.

(14) BALLESTRAZZI, P. (1994). Parchi e musei minerari in Austria. **II Convegno Valorizzazione dei siti Minerari dismessi**, 108-114. Cagliari.

(15) CASANELLES I RAHOLA, E. (1993). Museu de la Ciència y de la Tècnica. De conservar el passat a presentar el futur (part II). **Butl. D'Arqueologia Industrial i de Museus de Ciència i Tècnica**, 18, 3-6, Estiu 93. Barcelona.

(16) ANONIMO (1996). Legazpi aspira a compararse a las experiencias europeas de recuperación del patrimonio como alternativa al desarrollo. **Lenbur**, 1, 4-6. Legazpi, Guipúzcoa.

(17) SANTACREU, J.M. (1992). Ibidem.

(18) HABASHI, F. (1994). Iron Museum. **CIM Bulletin**, Vol. 87, Nº 982, 87-95.

(19) WARTELET, J.M. y SCHWARTZMAN, R. (1991) Le développement des musées souterrains. **Industrie Minérale. Mines et Carrières**, dic. 91, 71-76.

(20) GUIOLLARD, P.C. (1996). Sauvegarde du Patrimoine Minier: Les Houillères. **Géochronique**, 57, 15-16.

(21) DIEBELOT, W. (1996). Importance de l'Archéologie Minière en France. **Géochronique**, 57, 15.

(22) CITRAN, G. (1994). Minière museo in Paesi esteri e turismo minerario. **II**

Convegno Valorizzazione dei siti minerari dismessi, 119-122. Cagliari.

(23) WALTER, H. (1992). **Schau & Besucher Bergwerke. Ein Führer durch Deutschland-Österreich-Schweiz**. Verlags und Bestelladresse. Haltern.

(24) DEUTSCHE ZENTRALE FÜR TOURISMUS (1985). **Technical Museums in Germany**. Baden-Baden.

(25) CAICOYA, C.F. (1996). Museos y patrimonio histórico industrial en Austria. **ABACO**, 8, 115-121 (2ª época). Gijón, Asturias.

(26) BALLESTRAZZI, P (1994). Aventura in Miniera. **Quarry & Construction**, 9, 50-57. Parma.

(27) TABORIN, J. (1996). Hallstatt: une mine de sal protohistorique. **Géochronique**, 58, 12.

(28) GROESSENS, E (1993). Roches et Matériaux en Belgique. **Géochronique**, 48, 23. París.

(29) ANONIMO (1993). Ibidem.

(30) CASANELLES I RAHOLA, E. (1993). Ibidem.

(31) PUCHE, O. (1995). Resulta necesaria una legislación arqueológico industrial, como la de Cerdeña. **Boletín SEDPGYM**, 3, 2. Madrid.

(32) CASANELLES, E. (1996). Patrimonio Industrial de Cataluña. **ABACO**, 8, 83-86 (2ª época). Gijón.

(33) ROMERO, S. (1996). Museo de la Minería (El Entrego-Asturias), **ABACO**, 8, 105-114.

(34) MANTECON JARA, J.M. (1997). El Parque Minero de Río Tinto. **Actas I Sesión Científica de la S.E.D.P.G.Y.M.: Patrimonio Minero-Metalúrgico**. Almadén 21-22 Octubre 1996. Universidad de Castilla-La Mancha. Cuenca 8,135-137.

(35) MORENO, A. (1995). **El paisaje industrial de Linares. Un recurso educativo y turístico**. 20 pág. Linares.

(36) PUCHE, O.; GARCIA CORTES, A. y MATA, J.M. (1994). Conservación del Patrimonio Histórico Minero-Metalúrgico Español. **Actas IX Congreso Internacional de Minería y Metalurgia**. IV, 433-448. León.

(37) LLAMAS GARCIA, B. (Ed.) (1994). Conclusiones provisionales IX Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. *La Galera*, 3 junio 1994, pág. 4. León.

(38) PUCHE, O. y MAZADIEGO, L. F. (1996). Conservación del Patrimonio Minero-Metalúrgico Español: Actuacio-

nes recientes. *Tecnoambiente*, 69, 39-43. Madrid.

(39) GARCIA, G. (1996). Inventario de castilletes mineros de la Sierra de Cartagena, *Bocamina*, 2, 51. Madrid.

(40) MONTES, J.M. (1988). Schmnitz

cuna de la ingeniería de minas. *Industria Minera*, 280, 7-15.

(41) WASEK, J. (1994). The Czech mining history. *Actas II Convegno Valorizzazione dei siti minerari dismessi*, 129-130. Cagliari.

(42) HABASHI, F. (1994). Ibidem.

RAICES HISTORICAS DEL USO DEL ALABASTRO POR LA HUMANIDAD.

Por L. A. DIAZ RODRIGUEZ (*)

La mano *alabastrina* que encadena
Al que más contra amor está dispuesto
QUEVEDO

INTRODUCCION

Ahondar en los antecedentes del pasado, investigar sobre los gustos o preferencias de nuestros predecesores, sea cual sea el tema en cuestión, que, en este caso, es la utilización del alabastro como piedra ornamental, es una tarea difícil que ha de irse elaborando poco a poco, rescatando ideas, conceptos, definiciones y otros símbolos ancestrales acuñados a lo largo de la Historia de la Humanidad.

La palabra alabastro, cuando nos retrotraemos en el registro histórico del tiempo, posee una doble nomenclatura para el mismo concepto, cuyo significado evoluciona con el avance de los conocimientos científicos en lo que se ha dado en llamar *la cultura de la piedra*. Parece ser que el concepto antiguo o arqueológico de la expresión se basa en una mineralogía carbonatada mientras que en la actualidad, y en el ámbito geológico, se aplica a una variedad microcristalina y compacta de yeso (Díaz Rodríguez, 1991). Por todo ello, es preciso ser muy crítico y objetivo frente a los diferentes autores que disertan, independientemente del ámbito cientí-

(*) Instituto Tecnológico de Materiales. Parque Tecnológico de Asturias. CORUÑO-LLANERA 33428 Asturias, España.

fico en el que se muevan, sobre la naturaleza mineralógica del objeto u objetos de alabastro que están describiendo, dejando siempre abierta la posibilidad de adjuntar el calificativo mineralógico correspondiente.

En este artículo, se hará una breve descripción mineralógica de los alabastros presentes en la Naturaleza, resaltando sus propiedades físicas respectivas, y nos centraremos fundamentalmente en la variedad yesífera, exponiendo los principales depósitos existentes en el mundo, así como también la relación de esta variedad de alabastro con el ámbito artístico y la historia, haciendo hincapié en las obras de arte más representativas hechas con dicha materia prima en España.

EL ALABASTRO Y SU NATURALEZA MINERAL

Desde muy antiguo, las rocas y los minerales ornamentales, por sus especiales propiedades físicas, han gozado de una amplia aceptación en todas las civilizaciones para ser utilizadas dentro de su vida cotidiana, recibiendo el nombre de piedras preciosas o gemas minerales. En la actualidad, la ciencia gemológica las incluye dentro del término "materiales gema" (Kostov, 1988), que constituye un cajón de sastre en el que están representadas las variedades cristalinas y amorfas, las gemas orgánicas e inorgánicas, incluyendo las sintéticas, e incluso otras rocas y minerales ornamentales (monominerales) como el mármol y el alabastro respectivamente.

La palabra *alabastro*, en su sentido más amplio, se utiliza para nombrar minerales ornamentales (decorative stones) con dos mineralogías y propiedades físicas diferentes: la calcita (CaCO_3) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

El *alabastro calcáreo*, que es el concepto "histórico-antiguo" del término sin el calificativo calcáreo, está constituido fundamentalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), que puede cristalizar según dos minerales polimorfos: la calcita (romboédrica) y el aragonito (rómico). Posee una morfología fibrosa, con capas de crecimiento paralelas o concéntricas (textura cebrada y/o color morfa) y cierta translucidez. El alabastro calcáreo se suele encontrar en grutas o cavernas (estalactitas y estalagmitas) y en las zonas de fractura abiertas por la tectónica (filones). Su densidad media se encuentra en el intervalo 2,70 - 2,72 gr/cm³ (propio de la calcita pura), como sucede en las principales variedades alabastrinas italianas (Piccio y Zezza, 1968), y su dureza en la escala Mohs se encuentra entre los valores 3 y 4. Su color es variado y abarca desde los tonos blancos hasta los oscuros. Los Antiguos extraían fundamentalmente el alabastro calcáreo en Egipto, en el Asia Menor y en la India, de aquí que también se le denomine *alabastro oriental*.

En España, el único tipo de alabastro calcáreo que se comercializa es la variedad que se conoce con el nombre de "Falsa Agata", que se extrae en las sierras de Parapanda y de Madrid, ambas dentro de la provincia de Granada.

Aparece en filones de gran corrida con espesores en torno a los 50 cm y se utiliza como terrazo en el sector de la construcción.

El alabastro yesoso o alabastrites, que es el significado que en el campo de la Geología se le da a la palabra alabastro, es una variedad criptocristalina de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de aspecto compacto cuyos cristales son de tamaños inferiores a 100 micras (prácticamente inobservables "de visu"). Por sus propiedades físicas, entre las que destacan su translucidez y su baja dureza (2 en la escala de Mohs), con una densidad promedio de 2,3 gr/cm³, constituye un mineral industrial ornamental de alto valor añadido e indudablemente la materia prima ideal para cualquier escultor. Su color fundamental es el blanco, aunque puede presentar otras tonalidades, como anaranjadas o acarameladas, siendo estas últimas muy apreciadas (alabastro ága-

ta). El alabastro yesoso se encuentra en los medios sedimentarios de carácter evaporítico y su origen es de tipo secundario, procediendo generalmente de un mineral anhidrítico precursor.

Este tipo de mineral ornamental tiene depósitos muy importantes en la Península Ibérica, en concreto dentro de las cuencas sedimentarias del Ebro (los de mayor calidad), de Calatayud y de Madrid. Además, en la sierra de Almagro (Almería) existen explotaciones de alabastro cuya génesis es totalmente diferente a la del alabastro de las cuencas anteriormente citadas, ya que, geológicamente, pertenecen al Triásico y, por el grado de metamorfismo que han sufrido, se presentan en masas compactas, con una microdureza algo superior a la de los alabastritos sedimentarios, pudiendo obtenerse grandes bloques.

EL ALABASTRO COMO PIEDRA ORNAMENTAL A LO LARGO DE LA HISTORIA

El hombre del Paleolítico no conocía nada acerca de los metales, pero durante el período comprendido entre los 100.000 a 7.000 años antes de Cristo, según Ball (en Shepherd, 1980), llegó a utilizar alrededor de unas 14 variedades de piedras semipreciosas, como la calcedonia, el cuarzo, el jaspe, la serpentina, la obsidiana, la pirita, la esteatita, el ambar, la jadeita, la calcita, la amatista, la fluorita, el ágata y el azabache. Las culturas neolíticas (9000 años a. de C.) descubiertas en la Anatolia Central (Fig.1A), en las famosas excavaciones de Catal Hüyük (Semyonov, 1984), son testigo de la utilización del yeso por parte del hombre prehistórico, concretamente en sus ritos funerarios, donde, junto al cadáver, en torno a su cabeza, se colocaban estatuillas de yeso y can-

tos rociados con ocre, e incluso, en los huecos de los ojos de las calaveras, han aparecido láminas redondeadas de yeso. En excavaciones arqueológicas en los alrededores de la Península de Crimea, como, por ejemplo, en las antiguas ciudades de Olbia y Panticapea, y en la región de Kuban (Rusia) (Fig.1A), se encuentran objetos de alabastro yesoso, datados entre los 3000 a 400 a. de C., como vasos (alabastrones), copas, estatuillas, mangos de cuchillos (Escitas) y pomos de espadas (Sármatas).

Todas las referencias históricas convergen en que la palabra alabastro tuvo su nacimiento en el Próximo Oriente (Antiguo Egipto y Mesopotamia), englobando en su significado la dualidad mineralógica que la misma conlleva, que, en aquellos tiempos, obviamente se desconocía. Según Kužvart (1984), el término "alabastro" procede de la palabra egipcia *a-la-baste* (Barco de la diosa Bast, que era adorada en el Bajo Egipto, en la ciudad de Bubastis). Plinio (año 23 a. de C.- año 79 d. de C.), en sus escritos reflejados en el libro "Historia Natural", que conforma un tratado clásico de consulta sobre la Naturaleza, sus productos y sus derivados, describió ambos minerales ornamentales, si bien él emplea la palabra alabastro para describir un mármol (ónice) de gran blancura y muy adecuado como materia prima para la elaboración de vasos para ungüentos y otros utensilios. Añade: "nace junto a Tebas (Egipto) en un pueblo denominado Alabastrón", donde precisamente existían antiguas canteras de este mineral ornamental. Este tipo de alabastro egipcio es mineralógicamente de composición calcítica, de color blanco o blanco amarillento, translúcido en secciones delgadas y frecuentemente bandedado. Los principales depósitos, tanto de las antiguas como de las modernas extracciones, se concentran a lo largo, y en los alrededores, del curso del río Nilo (Fig.1B).

Egipto, por aquel entonces y en comparación con sus vecinos, como Mesopotamia, era un país rico en piedras de todas clases y sus antiguas civilizaciones - y también en la actualidad - hicieron uso de ellas aprovechando de cada una sus características intrínsecas. Durante las culturas predinásticas, los artesanos egipcios empleaban fundamentalmente las piedras más blandas, como el alabastro calcáreo y el yesoso, para la creación de una floreciente industria elaboradora de vasos de piedra (alabastrones), que poseen unas for-

mas cilíndricas, más o menos alargadas, de base redonda, cuello corto y sin asas (Fig.2). Precisamente, con posterioridad, el término "alabastrón", en la Antigua



Fig.2.- Alabastrón del Antiguo Egipto (Museo Arqueológico Nacional, Madrid). Ejemplo de un objeto labrado en alabastro calcáreo donde se puede apreciar la típica textura bandedada concéntrica que caracteriza al material.

Grecia y en algunos países del Oriente, fue utilizado como medida de capacidad (26 cl aproximadamente). El método empleado en su manufactura era el de perforarlos, mediante una atrición rotatoria, con rocas más duras talladas, como por ejemplo el sílex, utilizando arena o corindón como abrasivo (Fig.3).

Por otro lado, retomando las ideas expuestas por Plinio en su "Historia Natural", hay que decir que este autor señala la existencia de un conjunto de piedras blandas y transparentes que se cortan con sierra dentada, son fáciles de labrar en las obras y se trabajan exclusivamente bajo cubierta, a resguardo de la lluvia y del hielo que las desmorona (como anexo, el traductor de su obra al castellano -Gerónimo de Huerta, 1629 -recalcó que piedras de estas características, blancas y muy blandas, se podían encontrar en una cantera entre Valdemoro y Ciempozuelo, provincia de

Madrid, que se labraban como madera, con azuela y cepillo, y se endurecían con el tiempo como el fino mármol, aunque sin serlo). Minerales ornamentales de estas características encajan perfectamente con las propiedades físicas que posee el alabastro yesoso, encontrándose los principales vestigios de la extracción de esta variedad de yeso en el Antiguo Egipto, dentro de la Cuenca del Fayum (SO de El Cairo) (ver Fig.1B), donde, en Umm-es-Sawan (Hester y Heizer, 1981), se localizaron 3233 vasos de alabastro yesoso, alguno de los cuales estaba a medio terminar. También se hallaron antiguas extracciones en las proximidades del mar Rojo entre las localidades de Ismailía y Suez.

En Mesopotamia, existen restos arqueológicos y antiguas canteras que testimonian la utilización del alabastro yesoso por parte de sus pobladores. Así, en la localidad de Ar Rusafah (Siria), se conservan los restos de toda una ciudad hecha enteramente con bloques de yeso (poco translúcido) y también, en numerosos museos, como el Británico de Londres, se conservan algunas de las numerosas estelas que adornaban los palacios asirios (Nínive), que están hechas con este tipo de mineral ornamental. En la localidad de Mosul (Irak) se citan antiguas canteras.

En aquellos tiempos, las rutas regulares del comercio provocaron una difusión de los conocimientos existentes, dado que los productos básicos que faltaban en un país tenían que ser importados de otro y, con ellos, llegaba el conocimiento de nuevas técnicas y materiales que el genio particular de cada pueblo se encargaba de perfeccionar. Esto lo consiguió la brillante civilización que se desarrolló en Creta, que, con materia prima posiblemente importada (Motinot, 1980), erigió numerosas construcciones con bloques de yeso y labró vasos y esculturas de alabastro. Los fenicios, grandes mercaderes, explotaron el comercio de los perfumes, que precisamente iban contenidos en alabastrones, existiendo en España restos arqueológicos de su paso, como, entre otros, la pequeña escultura de la Dama Sentada de Galera (Granada), que se conserva en el Museo Arqueológico Nacional, hecha de alabastro yesoso.

Posteriores culturas, como la griega y la romana, asumieron también su utilización y el sentido de su doble significado. Así, el filósofo griego Teofrasto

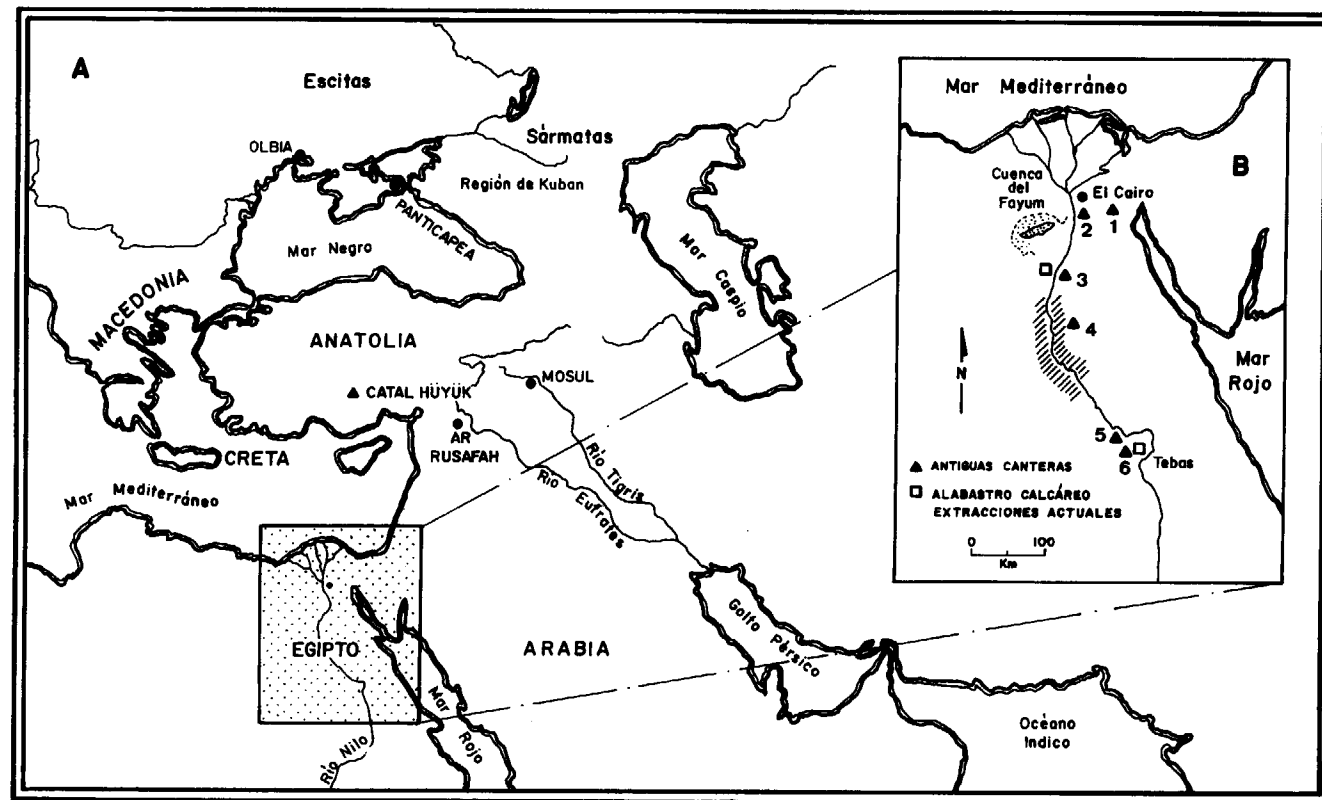


Fig.1.- A) Situación geográfica de antiguas excavaciones arqueológicas donde se encontraron vestigios del uso del alabastro por parte de diversas civilizaciones (ver texto). B) Localización de antiguas y modernas extracciones de alabastro calcáreo en Egipto: 1) Desierto de El Cairo-Suez; 2) Helwan; 3) Wadi Moathil; 4) Cercanías de Hatnub (abundantes canteras a ambos lados del río Nilo); 5) Montañas de Nag'Hammadi y 6) Wadiyien. En la Cuenca del Fayum se localizan los principales afloramientos de alabastro yesoso de Egipto. (Tomado de Hester y Heizer, 1981).

tos rociados con ocre, e incluso, en los huecos de los ojos de las calaveras, han aparecido láminas redondeadas de yeso. En excavaciones arqueológicas en los alrededores de la Península de Crimea, como, por ejemplo, en las antiguas ciudades de Olbia y Panticapea, y en la región de Kuban (Rusia) (Fig.1A), se encuentran objetos de alabastro yesoso, datados entre los 3000 a 400 a. de C, como vasos (alabastrones), copas, estatuillas, mangos de cuchillos (Escitas) y pomos de espadas (Sármatas).

Todas las referencias históricas convergen en que la palabra alabastro tuvo su nacimiento en el Próximo Oriente (Antiguo Egipto y Mesopotamia), englobando en su significado la dualidad mineralógica que la misma conlleva, que, en aquellos tiempos, obviamente se desconocía. Según Kužvart (1984), el término "alabastro" procede de la palabra egipcia *a-la-baste* (Barco de la diosa Bast, que era adorada en el Bajo Egipto, en la ciudad de Bubastis). Plinio (año 23 a. de C.- año 79 d. de C), en sus escritos reflejados en el libro "Historia Natural", que conforma un tratado clásico de consulta sobre la Naturaleza, sus productos y sus derivados, describió ambos minerales ornamentales, si bien él emplea la palabra alabastro para describir un mármol (ónice) de gran blancura y muy adecuado como materia prima para la elaboración de vasos para ungüentos y otros utensilios. Añade: "*nace junto a Tebas (Egipto) en un pueblo denominado Alabastrón*", donde precisamente existían antiguas canteras de este mineral ornamental. Este tipo de alabastro egipcio es mineralógicamente de composición calcítica, de color blanco o blanco amarillento, translúcido en secciones delgadas y frecuentemente bandeado. Los principales depósitos, tanto de las antiguas como de las modernas extracciones, se concentran a lo largo, y en los alrededores, del curso del río Nilo (Fig.1B).

Egipto, por aquel entonces y en comparación con sus vecinos, como Mesopotamia, era un país rico en piedras de todas clases y sus antiguas civilizaciones - y también en la actualidad - hicieron uso de ellas aprovechando de cada una sus características intrínsecas. Durante las culturas predinásticas, los artesanos egipcios empleaban fundamentalmente las piedras más blandas, como el alabastro calcáreo y el yesoso, para la creación de una floreciente industria elaboradora de vasos de piedra (alabastrones), que poseen unas for-

mas cilíndricas, más o menos alargadas, de base redonda, cuello corto y sin asas (Fig.2). Precisamente, con posterioridad, el término "alabastrón", en la Antigua



Fig.2.- Alabastrón del Antiguo Egipto (Museo Arqueológico Nacional, Madrid). Ejemplo de un objeto labrado en alabastro calcáreo donde se puede apreciar la típica textura bandeada concéntrica que caracteriza al material.

Grecia y en algunos países del Oriente, fue utilizado como medida de capacidad (26 cl aproximadamente). El método empleado en su manufactura era el de perforarlos, mediante una atrición rotatoria, con rocas más duras talladas, como por ejemplo el sílex, utilizando arena o corindón como abrasivo (Fig.3).

Por otro lado, retomando las ideas expuestas por Plinio en su "Historia Natural", hay que decir que este autor señala la existencia de un conjunto de piedras blandas y transparentes que se cortan con sierra dentada, son fáciles de labrar en las obras y se trabajan exclusivamente bajo cubierta, a resguardo de la lluvia y del hielo que las desmorona (como anexo, el traductor de su obra al castellano -Gerónimo de Huerta, 1629 - recalzó que piedras de estas características, blancas y muy blandas, se podían encontrar en una cantera entre Valdemoro y Ciempozuelo, provincia de

Madrid, que se labraban como madera, con azuela y cepillo, y se endurecían con el tiempo como el fino mármol, aunque sin serlo). Minerales ornamentales de estas características encajan perfectamente con las propiedades físicas que posee el alabastro yesoso, encontrándose los principales vestigios de la extracción de esta variedad de yeso en el Antiguo Egipto, dentro de la Cuenca del Fayum (SO de El Cairo) (ver Fig.1B), donde, en Umm-es-Sawan (Hester y Heizer, 1981), se localizaron 3233 vasos de alabastro yesoso, alguno de los cuales estaba a medio terminar. También se hallaron antiguas extracciones en las proximidades del mar Rojo entre las localidades de Ismailía y Suez.

En Mesopotamia, existen restos arqueológicos y antiguas canteras que testimonian la utilización del alabastro yesoso por parte de sus pobladores. Así, en la localidad de Ar Rusafah (Siria), se conservan los restos de toda una ciudad hecha enteramente con bloques de yeso (poco translúcido) y también, en numerosos museos, como el Británico de Londres, se conservan algunas de las numerosas estelas que adornaban los palacios asirios (Nínive), que están hechas con este tipo de mineral ornamental. En la localidad de Mosul (Irak) se citan antiguas canteras.

En aquellos tiempos, las rutas regulares del comercio provocaron una difusión de los conocimientos existentes, dado que los productos básicos que faltaban en un país tenían que ser importados de otro y, con ellos, llegaba el conocimiento de nuevas técnicas y materiales que el genio particular de cada pueblo se encargaba de perfeccionar. Esto lo consiguió la brillante civilización que se desarrolló en Creta, que, con materia prima posiblemente importada (Motinot, 1980), erigió numerosas construcciones con bloques de yeso y labró vasos y esculturas de alabastro. Los fenicios, grandes mercaderes, explotaron el comercio de los perfumes, que precisamente iban contenidos en alabastrones, existiendo en España restos arqueológicos de su paso, como, entre otros, la pequeña escultura de la Dama Sentada de Galera (Granada), que se conserva en el Museo Arqueológico Nacional, hecha de alabastro yesoso.

Posteriores culturas, como la griega y la romana, asumieron también su utilización y el sentido de su doble significado. Así, el filósofo griego Teofrasto

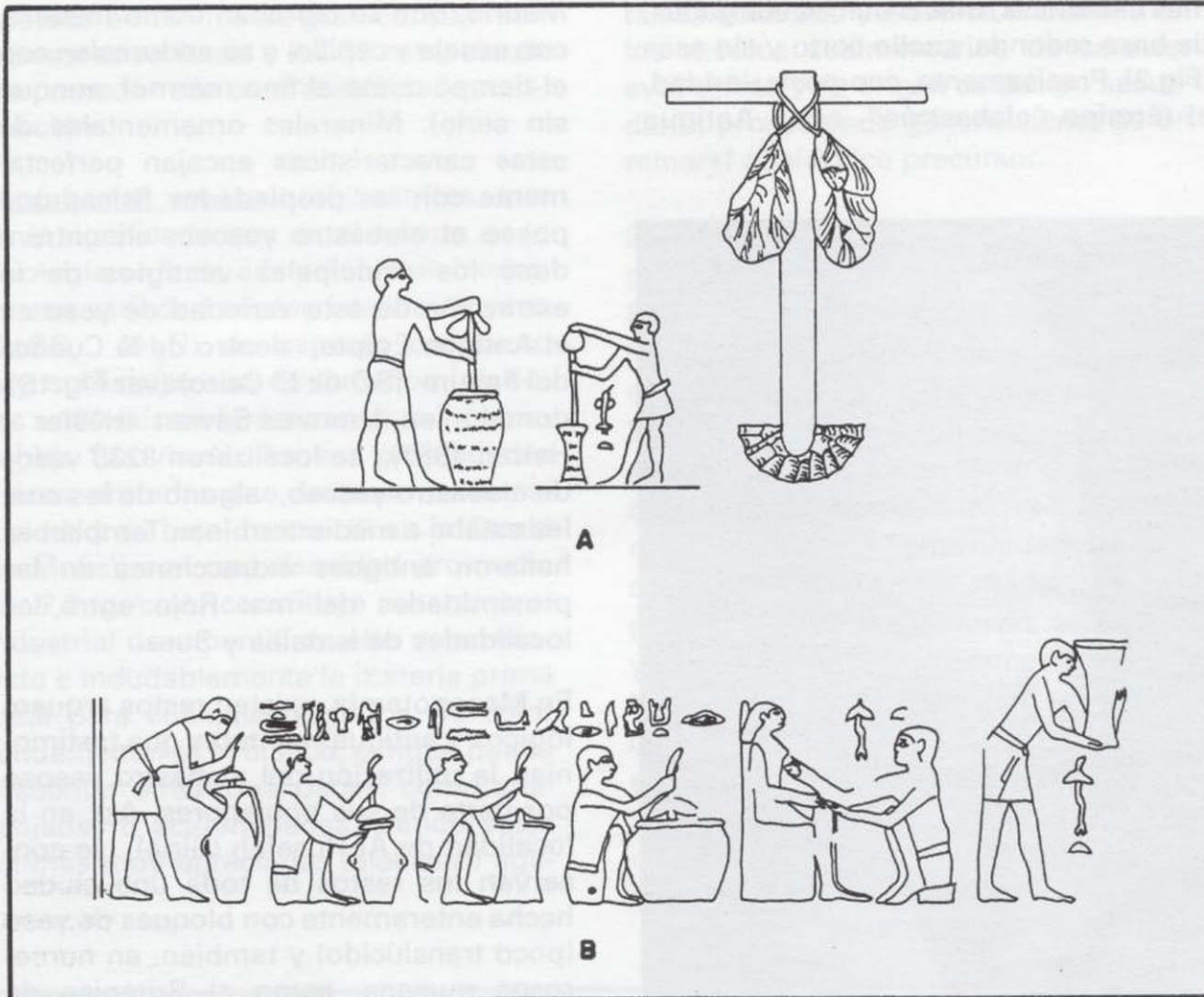


Fig.3.- Esquemas gráficos de la elaboración de alabastrones en el Antiguo Egipto: A) Modo y utensilios de perforación utilizados para la realización de las piezas; B) Escena que representa la manufactura de alabastrones encontrada en los muros de la Tumba-Capilla A en Meir (según Hester y Heizer, 1981).

Melanti escribió en torno al año 340 a. de C. el primer libro de contenido mineralógico ("Acerca de las Piedras"), en el que se nombran alrededor de unas 60 especies minerales entre las que se encuentra el alabastro (*piedra que se obtiene como bloque compacto y se trabaja con herramientas metálicas*). Plinio también confirma la presencia de piedras blandas (¿alabastro yesoso?) en Roma, en la ribera de Génova, en Umbria, en Venecia e incluso en Capadocia. Este autor hace mención de estatuas (Hécate de Efeso en el Templo de Diana) y recintos (Templo de la Fortuna) que, por sus situaciones privilegiadas y la naturaleza de sus revestimientos, desprendían unos resplandores espectaculares cuando la luz interaccionaba sobre los mismos.

Una de las civilizaciones clave en la utilización del alabastro dentro de la Historia de la Humanidad fue la de los etruscos, pueblo enigmático que llegó al norte de Italia a través de los Alpes en una época muy antigua, todavía en el Neolítico, y que al comienzo de la Edad del Hierro, en la primera fase de la civili-

zación Vilanoviense, pasó a La Toscana. Se puede decir que fueron unos privilegiados, pues les cupo la posibilidad de tallar uno de los alabastrones yesosos de mayor raigambre universal, por su calidad, que actualmente mantiene. En sus asentamientos, como en Volterra y en otras localidades próximas al mar Tirreno, explotaron canteras de alabastro, tanto superficial como subterráneamente, empleando dicha materia prima, fundamentalmente, en la elaboración de sarcófagos y urnas cinerarias. Estas últimas se utilizaban para guardar las cenizas del difunto, cuyo cuerpo se representaba escultóricamente tendido, sosteniendo en una de sus manos una patena, y en la parte inferior se representaban escenas alegóricas o de su vida particular (Fig. 4). Los objetos más antiguos de alabastro yesoso provenientes de una tumba etrusca, que se conservan en el Museo Arqueológico de Florencia, corresponden a una patena y un vaso lacrimatorio, descubiertos a finales del siglo XIX en Casale Marittimo, que son fechados en el siglo V a. de C. (Fiumi, 1980).

Desde el siglo I hasta comienzos del siglo XIV, el influjo de los cultos religiosos, el cambio de las costumbres y, posiblemente, la elección de nuevos materiales hizo decaer la utilización del alabastro yesoso por parte de la población. De estos tiempos, se conocen algunos textos escritos en los que se nombra este mineral ornamental, como "El Libro de las Piedras", anónimo del siglo IX, en el que se incluye al alabastro como gema mineral (Kostov, 1988). Biruni, en su libro "Una colección de historias sobre el conocimiento de las gemas" (1047), también hace referencia o menciona el alabastro como gema mineral. Es a partir del siglo XIV cuando se produce un resurgir del empleo del alabastro en el ámbito del arte y, nuevamente, en relación con los temas religiosos, llegando incluso a denominarlo como la "piedra de la Virgen María", al hacer referencia a su color blanco y pureza. La existencia de importantes depósitos en Inglaterra, Francia, Italia y España provocó la proliferación de talleres dedicados a la elaboración de tumbas y retablos de alabastro, en relación con la nueva cultura gótica que comenzaba a desarrollarse por toda Europa.

En Inglaterra comenzó a desarrollarse una floreciente industria elaboradora de tumbas y de pequeños retablos hechos en alabastro yesoso, cuya exportación hacia otros países influyó notablemente



Fig.4.- Urna cineraria etrusca hecha en alabastro (Museo Guarnacci, Volterra).

en la difusión de dicho mineral ornamental como materia prima ideal escultórica. La primera escultura inglesa de una larga serie labrada en alabastro, que se conserva en la iglesia de Hanbury, pertenece a Sir John de Hanbury († 1303), mientras que la tumba del primer rey británico inmortalizada en alabastro fue la de Eduardo II († 1327), que se encuentra en la catedral de Gloucester. Según Firman (1984), en general, las áreas geográficas de Castle Hayes-Fauld (Staffordshire) y de Chellaston (Derbyshire) fueron las zonas más probables donde se extrajeron bloques de alabastro de unas ciertas dimensiones mínimas para elaborar tumbas, que generalmente constaban de dos efigies (bloques de 2x1x1,3 m), mientras que los retablos, hechos con fragmentos más pequeños, procedían, entre otros lugares, de Red-Hill (Nottinghamshire), de Burton-on-the-Wolds (Leicestershire), de las proximidades de la costa de Somerset y de Yorkshire.

Los primeros documentos escritos acerca de los alabastros ingleses (Cheetham, 1984) datan de mediados del siglo XIV y se refieren a figuras de pie y a pequeños retablos. Estos últimos fueron producidos inicialmente de manera variada y con posterioridad en serie (fundamentalmente en los talleres de Nottingham y York) y gozaron de una reconocida popularidad, tanto dentro como fuera de las Islas, siendo por ello exportados al resto de Europa. Entre los diversos motivos o alegorías labradas por los artesanos ingleses (alabastermen) los más repetidos eran los que representaban escenas de la Pasión, los relieves simbolizando la cabeza de S. Juan Bautista, y los dedicados a la Virgen (los "Gozos de la Virgen", donde, frecuentemente, la figura final ornamental solía representar a Sta. Margarita, a quien las mujeres invocaban para salir indemnes de los alumbramientos) (Young, 1990).

En España, se conservan numerosas piezas importadas de alabastros ingleses (Alcolea, 1971), como, y entre otras ciudades, en Santiago de Compostela, en Oviedo y en Madrid, en el Museo Arqueológico Nacional (Fig. 5).

Los acontecimientos que se produjeron en los ámbitos religiosos ingleses con la ruptura de sus vínculos con la Iglesia de Roma (Período de la Reforma), que, de manera gradual, se iniciaron con el reinado de Enrique VIII, provocaron paula-



Fig.5.- Vista de detalle de un panel de alabastro inglés, de los siete que conforman el retablo en sí, representando escenas de La Vida de la Virgen, procedente de la Iglesia de Sta. María de la Vieja, de Cartagena, y que se encuentra en el Museo Arqueológico Nacional. Dimensión del panel : 40 x 25 cm.

tinamente la desaparición de los talleres de alabastro que se dedicaban a producir paneles-retablo (finales del siglo XVI), aunque la producción de tumbas prosiguió prácticamente hasta el año 1700. En el trabajo de Young (1990), se describe, de manera resumida, la evolución de la rica cultura inglesa del alabastro desde la época medieval hasta la actualidad.

En la corte de Francia, a partir del siglo XIV, se extendió, en la Borgoña y en las zonas más septentrionales del País, la moda de emplear el alabastro para esculpir las estatuas yacentes de las tumbas y también en los retablos de las iglesias. Además, como hecho excepcional, que se da también en algunas esculturas y obras arquitectónicas españolas, se utilizó el alabastro como revestimiento externo en algunas construcciones, como la residencia monacal de Cluny, edificada entre 1485 y 1510 por Jacques II d'Amboise, cuadragésimo tercer abad del monasterio de Cluny (Motinot, 1980). El alabastro yesoso francés, por sus peculiares tintes y translucidez, fue empleado en forma de

placas para cerrar las claraboyas de los templos, iglesias y catedrales tal como se puede contemplar en Saint-Jean-de-Maurienne y en Lagny (Seine-et-Marne). Este tipo de utilización también se dio en Italia (vidrieras del coro de la iglesia de San Miniato, en Florencia) y en España (Monasterio de Piedra, Zaragoza).

El verdadero resurgir del empleo del alabastro por parte de los artesanos italianos se desarrolla a mediados del siglo XVI en la región de la Toscana, donde aquella materia prima, utilizada tiempo atrás por los etruscos para sus ritos funerarios, es recuperada nuevamente por los artistas renacentistas italianos para la elaboración de sus obras. En la localidad de Volterra (Pisa), se centralizaron las principales actividades productivas -que se siguen manteniendo en la actualidad- alcanzándose una notable expansión creadora a partir del siglo XVIII, con numerosas exportaciones a Francia, Inglaterra, Alemania y Estados Unidos, entre otros países. Los sucesivos altibajos en la oferta y la demanda de las producciones junto con la escasez de la materia prima de los yacimientos, acompañada de los altos costes de extracción, han hecho necesaria, cada vez más, la paulatina importación del alabastro español, que une a su gran calidad unos precios muy competitivos por la gran regularidad y cantidad de sus depósitos.

En España, el alabastro ha gozado de gran popularidad fundamentalmente a lo largo de los períodos artísticos pertenecientes al estilo gótico y posteriormente al plateresco. Posiblemente las modas importadas de otros países, donde el alabastro gozaba de una gran predilección, e incluso su elección por parte de alguno de los artistas más representativos de la época, fueron algunos de los factores principales que se conjugaron con la abundancia que poseía y posee nuestra Península en depósitos de yesos, frente a otro tipo de yacimientos de rocas ornamentales (mármoles, por ejemplo), que eran desconocidos en aquella época en nuestro País. La ubicación geográfica de los depósitos de alabastro se relaciona, en líneas generales, con los principales centros del desarrollo de la cultura en los siglos XV y XVI, en comunidades como Navarra, Aragón, Cataluña, Valencia, y en provincias como Burgos, Guadalajara, Toledo, con significativas catedrales y basílicas capaces de alber-

gar las grandiosas obras de arte que en la actualidad se pueden contemplar. Los temas religiosos constituyeron, en aquellos tiempos, el motor principal de varias escuelas escultóricas dedicadas a trabajos en alabastro, cuyos motivos principales recaían en estatuas para sepulcros y retablos de grandes dimensiones. La materia prima era tallada por los artesanos con un desigual grado de detalle, el cual sólo es capaz de ser soportado por el alabastro dadas sus características intrínsecas frente a otras rocas ornamentales, como son el pequeño tamaño de sus cristales, su translucidez, su pureza, su morbidez, etc. Los artistas de la época eran unos verdaderos orfebres de la piedra y, entre otros, hay que citar a Gil de Siloé (Sepulcros de Juan II e Isabel de Portugal -Fig. 6A-, junto con el del Infante D. Alfonso -Fig. 6B-, en la Cartuja de Miraflores, Burgos), a Damián Forment (Retablo Mayor de la Basílica del Pilar, Zaragoza) (Fig. 6C), y al Maestro Sebastián de Toledo (Sepulcro de D. Martín Vázquez de Arce, el Doncel, en la Catedral de Sigüenza, Guadalajara) (Fig. 6D), cuyas obras en alabastro constituyen uno de los legados más representativos de la escultura española de los siglos XV y XVI. Dentro del rico patrimonio artístico español tallado en alabastro, en la Tabla 1, se exponen algunas de las principales obras escultóricas que el autor de este artículo ha ido recopilando y visitado.

PRINCIPALES DEPOSITOS DE ALABASTRO EN EL MUNDO

No existe mucha información bibliográfica acerca de los depósitos de alabastro a nivel mundial, porque, al ser una materia prima con un no muy alto valor añadido y sobre todo presentándose en afloramientos muy restringidos y de escasa continuidad, salvo excepciones, los hace ser difíciles de conocer y prospectar. Por otro lado, la producción no suele incluirse dentro de las estadísticas mineras ya que al presentarse en compañía de yesos masivos sin textura alabastrina y entrando en competencia con la aplicación industrial de estos últimos, hace que el alabastro se incluya como una materia prima yesífera más. El medio sedimentario típico de su aparición es el de cuencas evaporíticas y dentro de algunas, como la Cuenca Terciaria del Ebro (Ortí et al., 1989), suele encontrarse en los estratos de las formaciones

que se disponen en las aureolas periféricas que rodean la cuenca salina.

La Geología Histórica nos informa de que, a lo largo de la evolución de la fisonomía de la Tierra desde las épocas remotas hasta la actualidad, se han producido diversos estadios evaporíticos de cierta entidad, cuyo registro geocronológico recae fundamentalmente en las eras Mesozoica (períodos Pérmico y Triásico) y Cenozoica (período Terciario), en cuyas unidades cronoestratigráficas se encuentran los principales yacimientos de alabastro mundiales. Su repartición en el Globo se localiza, en función de la documentación consultada, en cuatro continentes: América, África, Asia y Europa.

En América, concretamente en los Estados Unidos, existen diversos depósitos de alabastro en explotación (Myers, 1981), como el que se extrae en los depósitos de yesos en Los Grandes Rápidos (Michigan), de colores anaranjados, en una mina próxima al Fuerte Collins (Colorado) y en otros estados como Nueva York, Nebraska, Iowa, Kansas, Oklahoma y Nuevo México.

En el continente africano, se citan depósitos de alabastro en una zona situada a unos 100 Km al SO de Trípoli (Libia), entre las localidades de Bir Ayyád y Yafrin (Mrázek, 1985), aunque no están en explotación. Por otro lado, también hay que citar la cuenca evaporítica del Fayum (Egipto), donde las Antiguas Dinastías extrajeron la materia prima para la elaboración de objetos y otros utensilios.

De la existencia de canteras de alabastro en el continente asiático quedan las referencias históricas en la antigua región de Mesopotamia, comentadas ya en este artículo, no teniéndose datos en la actualidad de su posible aprovechamiento y comercialización.

En Europa, son abundantes las citas bibliográficas acerca de la existencia de depósitos de alabastro, siendo muy posiblemente el continente donde se encuentran los yacimientos de mayor calidad. Así cabe destacar los existentes en Inglaterra, en Francia, en Italia y, sobre todo, en España. Hay también extracciones en Rusia.

En Inglaterra, el alabastro ha sido una materia prima muy utilizada, prácticamente durante los últimos ocho siglos,

para la escultura y otras artes decorativas, cuya localización se puede decir que se encuentra en dos bandas de no más de 1 milla de largo por 1/2 milla de ancho al sur de Chellaston (Derbyshire) y al oeste de Castle-Hayes (Staffordshire). Otros afloramientos se encuentran en Staffordshire, Tutbury y Marchington, también en Leicestershire, cerca de Burton-on-the-Wolds, en Red Hill (Nottinghamshire), el área de Ledsham y posiblemente en Rippon Parks (Yorkshire). Las localidades de Somerset y West Cumbrian fueron también productoras de dicho mineral ornamental (Firman, 1984). El alabastro inglés pertenece al período Triásico (200 millones de años), salvo el extraído en los alrededores de Yorkshire, que pertenece al período Pérmico (250 millones de años). Según Firman (op. cit.), no existe una textura, estructura o composición química definitoria del origen geográfico de los alabastros ingleses, aunque existen algunas variedades que, diagnosticadas por su color, como el verde de Chellaston y el blanco y negro de Somerset, y por su textura, el alabastro porfiroblástico de Yorkshire, si caracterizan los horizontes estratigráficos de donde fueron extraídas. La relativamente no muy abundante producción de alabastro durante la Edad Media (entre 70 a 200 ton/año) contrasta con la muy profusa elaboración de pequeños retablos desarrollada durante dicha época, ya que de un bloque de alabastro de unas cuatro toneladas se podían tallar hasta unos cincuenta paneles.

Los yacimientos franceses de alabastro, según Motinot (1980), se localizan en las siguientes localidades:

- Les Usines de Cúdane (Doubs): alabastro muy duro de colores blanco, rojo y rosado.
- Vizille (Isère): alabastro sacaroideo de gran blancura.
- Léomont, Moncel (Meurthe): alabastro de color blanco, rosa, gris, amarillento, susceptible de buen pulimento y utilizado en los palacios de los príncipes de Lorraine y en multitud de iglesias.
- Anet y Carnetin, cerca de Lagny (Seine-et-Marne): bello alabastro blanquecino de gran translucidez.
- Montmartre (Seine): se presenta en colores amarillentos, marrones, rojizos, etc.
- L'île-Adam (Seine-et-Oise): grandes canteras de alabastro de color amarillento, con venas blancas y marrones, utilizado para realizar vasos y ornamentos en muebles.

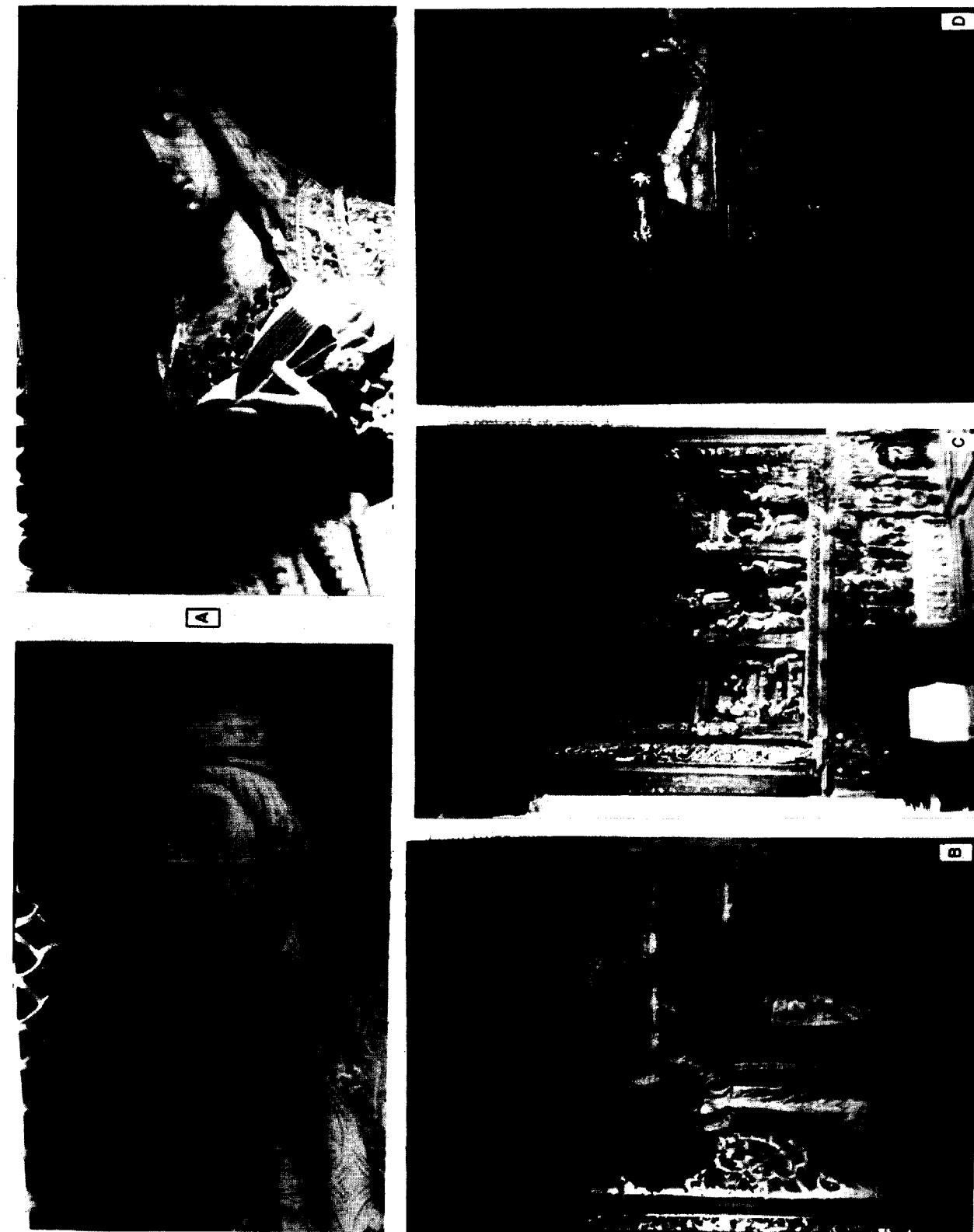
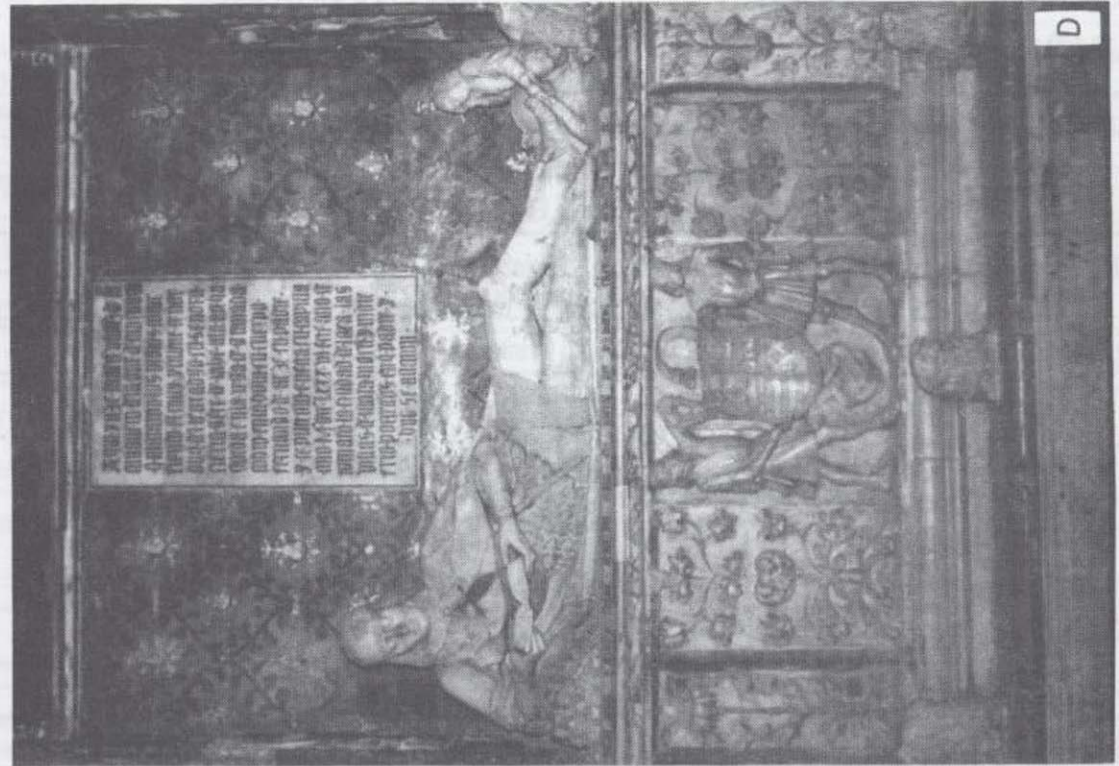


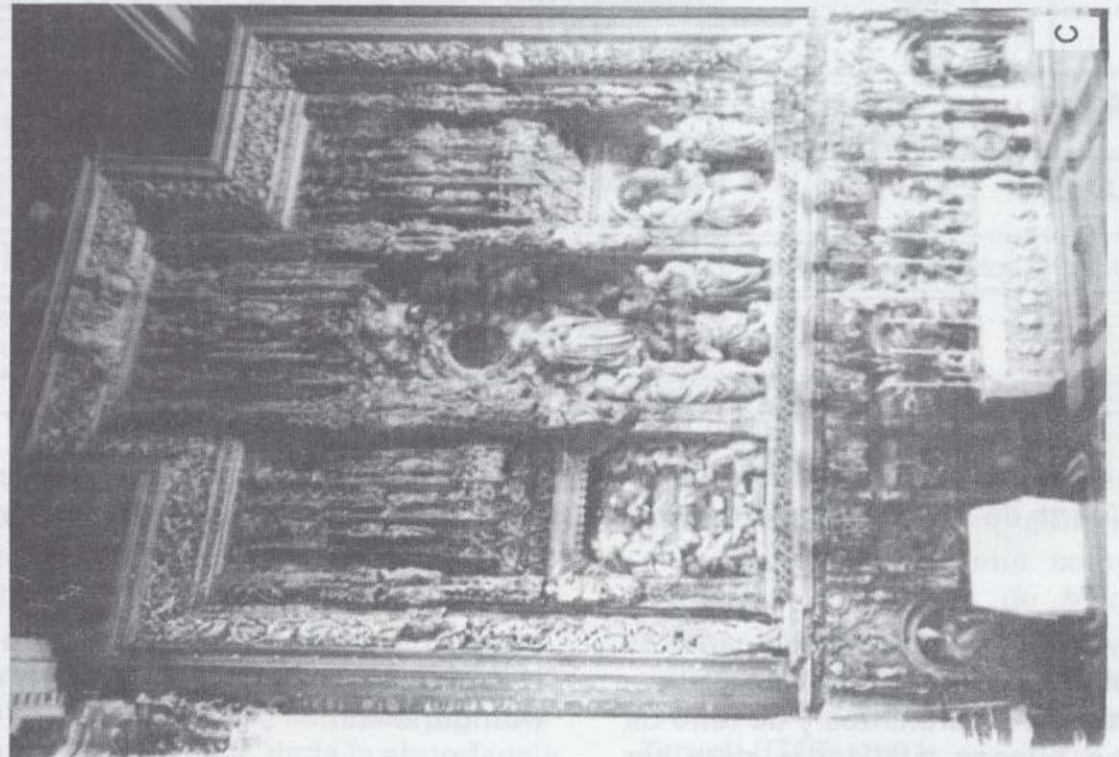
Fig.6.- Ejemplo de algunas obras escultóricas españolas realizadas en alabastro: A) Vista de detalle de las efigies de los reyes Juan II e Isabel de Portugal, en la Cartuja de Miraflores, Burgos; B) Sepulcro del Infante D. Alfonso, también en la Cartuja de Miraflores; C) Retablo Mayor de la Basílica del Pilar, Zaragoza; D) Sepulcro del Doncel D. Martín Vázquez de Arce, en la Catedral de Sigüenza, Guadalajara.



A



D



C



B

Fig.6.- Ejemplo de algunas obras escultóricas españolas realizadas en alabastro: A) Vista de detalle de las efigies de los reyes Juan II e Isabel de Portugal, en la Cartuja de Miraflores, Burgos; B) Sepulcro del Infante D. Alfonso, también en la Cartuja de Miraflores; C) Retablo Mayor de la Basílica del Pilar, Zaragoza; D) Sepulcro del Doncel D. Martín Vázquez de Arce, en la Catedral de Sigüenza, Guadalupe.

COMUNIDAD AUTONOMA	LOCALIDAD	OBRA ESCULTORICA UBICACION	AUTOR / RES	DATAION	
ANDALUCIA	Sevilla	Sepulcro del arzobispo Juan de Cervantes / Catedral Capilla de los Alabastros / Catedral	Lorenzo Mercadante Juan Martínez Montañés	1458 1628	
	Ecija	Sepulcro de la Familia Figueroa / Iglesia	-	-	
ARAGON	Huesca	Retablo de Montearagón / Catedral Retablo Mayor / Catedral	Gil de Morlanes el Viejo Damián Forment	1506/1512 1520/1534	
	Jaca	Retablo de La Trinidad / Catedral	Juan de Ancheta	1578	
	Zaragoza	Retablo Mayor / Basílica del Pilar Retablo Mayor / Catedral de La Seo Sepulcro del arzobispo D.Lope Fdez. de Luna / Catedral de La Seo Retablo de S. Miguel / Catedral de La Seo Portada plateresca de la iglesia de Sta. Engracia Patio interior / Palacio de los Condes de Sástago Patio de la Infanta / Palacio de Zaporta	Damián Forment Pere Johan y Hans Piet D'anso Pedro Moragues Juan de Ancheta Gil de Morlanes Padre e Hijo	1509/1516 1516 mitad XVI	
		Escatrón	Retablo Mayor / Iglesia	Maestro Esteban	XVI
		Calatayud	Portada de la Colegiata de Sta. María		
	ASTURIAS	Oviedo	Incredulidad Asuncionista de Sto. Tomás / Museo Diocesano.	Alabastro inglés	1440/1460
Tineo		Arcángel S. Miguel / Iglesia de Bérceo del Monasterio	Escuela Catalana	finales XIV	
Salas		Mausoleo del arzobispo Valdés Salas / Colegiata Mayor	Pompeo Leoni	1582	
CANTABRIA	S. Vicente de la Barquera	Sepulcro de la Familia Corro (Juan y María) / Iglesia			
CASTILLA-LEON	Avila	Sepulcro del obispo D. Alonso de Mudrigal, el Tostado / Catedral Estatua de S. Segundo / Iglesia de S. Segundo	Vasco de la Zarza Juan de Juni	principios XVI	
	Toro	Sepulcro de Dña. Beatriz / Convento de Sancti Spiritus		principios XV	
	Burgos	Sepulcro del obispo Alonso de Cartagena / Catedral Sepulcro de Juan II e Isabel de Portugal / Cartuja de Miraflores Sepulcro del infante D. Alfonso / Cartuja de Miraflores	Gil de Siloé Gil de Siloé Gil de Siloé	1475 1489/493 aprox. "	

Tabla 1.- Exposición de algunas de las principales obras escultóricas españolas labradas en alabastro, que constituyen una mínima parte de las que han sido elaboradas con dicho material, dentro del rico patrimonio artístico existente en España.

- Vaux y Grisy (Seine-et-Oise): canteras de yesos donde se presenta un alabastro de colores amarillentos y de tono de miel, con buenas cualidades para ser pulido.

Las extracciones de alabastro en Rusia se concentran a lo largo de la vertiente oeste de la cordillera de los Urales (Ural stone), concretamente en la región de Perm (Kungur), donde los numerosos ríos que la atraviesan hacen aflorar los abundantes depósitos de yesos existentes en la zona, existiendo otras variedades minerales, aparte del alabastro, como el yeso selenítico y el fibroso, que también son susceptibles de ser tallados por los artesanos del lugar. Ya lo señaló Popov en 1804 (en Semeynov, 1984) diciendo: "... existe una gran cantidad de alabastro descansando aletargado en los estratos de las montañas que surcan los ríos Sylva e Iren, un alabastro de extremada pureza, de grano muy fino y predispuesto para la realización de magnificas estatuas ...". Los estratos yesífe-

ros en los que se extrae el alabastro pertenecen al período Pérmico Inferior (Kunguriense).

Los depósitos de alabastro italianos se encuentran enclavados en la parte centro occidental de la región de La Toscana, fundamentalmente en un área comprendida entre Castellina Marittima, al oeste, y Chiusdino, al este, en la provincia de Siena, pasando por Volterra y Pomarance, en la provincia de Pisa (Ciampalini, 1981).

Geológicamente, el alabastro se localiza en los depósitos terciarios correspondientes al Mioceno Superior (Mesiense), siendo la Cuenca del río Fine, entre otras cuencas donde también hay alabastro como las de Volterra-Pomarance y de Radicondoli-Chiusdino, la más importante en cuanto a calidad y cantidad. En dicha cuenca, se hallan las principales canteras ("cavas") del alabastro que se extrae en Italia, entre las que se pueden citar: Pipistrello, Val di

Perga y, sobre todas, Marmolaio. En esta cantera, dentro de la localidad de Castellina Marittima, se beneficia una variedad de alabastro conocida como "Scaglione", cuya blancura, translucidez y morbidez es reconocida mundialmente. La explotación es subterránea, mediante galerías de largos recorridos (kilómetros) y de direcciones irregulares, buscando los ovoides de alabastro que se hallan inmersos en potentes niveles de yesos; cuya extracción se realiza mediante martillos neumáticos (Fig. 7). El yacimiento pertenece a la empresa Vic Italiana spa., alcanzando en el año 1990 una producción de unas 300 toneladas (comun. per. G. Bagnoli).

La amplia variabilidad de facies de los depósitos de yesos italianos y su elevado interés comercial han hecho que existan diversas nomenclaturas para el alabastro extraído, entre ellas las de: 1) Scaglione; 2) Agata; 3) Bardiglio; 4) Cinerino; 5) Gabbro; 6) Pietra Gialla (Cecchella, 1977). La primera variedad

CASTILLA-LA MANCHA	Cuenca	Sepulcros de la Capilla de Santiago / Catedral		principios XV
	Sigüenza	Sepultura del cardenal de S. Eustaquio / Catedral Sepulcro de D. Martín Vázquez de Arce, El Doncel / Catedral Sepulcro de los padres del Doncel / Catedral Sepulcro de Juan Ruiz de Pelegrina	Maestro Sebastián de Toledo	1434/1446 1491
	Pozanco	Sepulcro de Martín Fernández / Iglesia		
	Jirueque	Sepulcro de Alonso Fernández		
	Toledo	Sepulcros de D. Alvaro de Luna y Dña. Juana de Fimentel / Catedral	Maestro Sebastián de Toledo	1489
CATALUÑA	Gerona	Sepulcro del obispo Bernat de Pau / Catedral	Anónimo	mediados XV
	Ampurias	Retablo de la Iglesia de Castelló	Vicente Borrás	XV
	Poblet	Retablo / Monasterio	Damián Forment	
	Sta. Coloma de Queralt	Sepulcro de Pere V de Queralt	Esteban de Burgos y Pere Cirol	mediados XIV
	Tarragona	Retablo / Catedral	Pere Johan	mediados XV
EXTREMADURA	Guadalupe	Sepulcro de Gonzalo de Illescas / Monasterio	Egas Cueman	1458
MADRID	Madrid	Estatua orante de Pedro I el Cruel / M.A.N. Sepulcro de Dña. Constanza / M.A.N. Sta. Catalina y Sta. Ursula / M.A.N. Adoración de los Magos / M.A.N. Retablo de la Vida de la Virgen / M.A.N. Cabeza de joven paje / M.A.N. Rey David y Profeta (del Monasterio de Fresdeval, Burgos) / M.A.N. Fragmento de religioso (del Monasterio de Poblet) / M.A.N.	Anónimo Alabastro inglés Alabastro inglés Alabastro inglés Gil de Siloé Jaime Cascalls	principios XVI XV XV finales XV XIV
			El Goloso	Sepulcro de Dña. Beatriz de Galindo y D. Fco. Ramírez / Convento de la Concepción Jerónima
NAVARRA	Pamplona	Sepulcro de Carlos III el Noble y Leonor de Castilla / Catedral	Johan Lome de Tournai y Michel de Reims	1413/1420
LA RIOJA	Sto. Domingo de la Calzada	Retablo (zócalo) / Catedral Templete de alabastro del Mausoleo con Cripta / Catedral	Damián Forment Felipe Vigaray; Resines	1540 1513

Tabla 1. cont.



Fig. 7.- Extracción de bolos de alabastro (variedad "Scaglione") en la explotación subterránea "Marmolaio", en las inmediaciones de Castellina Marittima (Italia).

es típica del área de Castellina, mientras que las restantes afloran fundamentalmente en la zona de Volterra.

Actualmente, la industria del alabastro en Italia importa gran cantidad de materia prima de España, dada la abundancia y calidad de dicho mineral ornamental en nuestro País y, sobre todo, por los menores costes de extracción a pie de cantera.

La Península Ibérica posee importantes depósitos de alabastro, que se reparten por sus diferentes cuencas sedimentarias terciarias, siendo las principales las siguientes: la Cuenca del río Ebro, la Cuenca de Calatayud y la Cuenca de Madrid. En la Figura 8, se refleja la distribución de los afloramientos de yesos existentes en España, indicándose los más importantes yacimientos de alabastro y las localidades de las canteras más significativas.

La Cuenca Terciaria del Ebro contiene los depósitos de alabastro de mayor calidad que existen en España, hallándose los más afamados dentro de la

Comunidad de Aragón, concretamente en un área discontinua comprendida entre las localidades de Mediana de Ebro, Quinto de Ebro (al SE de Zaragoza) y Azaila y Albalate del Arzobispo (dentro de la provincia de Teruel) (ITGE, 1991).

En estas zonas se extraen dos variedades fundamentales denominadas: "Buñuelo" y "Transparente". El alabastro "Buñuelo", cuya morfología externa recuerda al producto de repostería que le da nombre, es de color blanquecino, poco translúcido, y presenta unas vetas internas ("aguas") que lo caracterizan. Aflora entre Mediana y Quinto de Ebro y también en Albalate del Arzobispo. Por su parte, el alabastro "Transparente" -mejor translúcido- es propio de Azaila y sus alrededores (Díaz Rodríguez, 1994) y posee una extraordinaria belleza. Es de color blanquecino, aunque también se manifiesta en tonos amarillentos e incluso anaranjados. Posee una elevada translucidez, pudiendo ser comparado, en determinados afloramientos, con la variedad italiana "Scaglione". Los depósitos de alabastro de estas áreas perte-

CASTILLA-LA MANCHA	Cuenca	Sepulcros de la Capilla de Santiago / Catedral		principios XV
	Sigüenza	Sepultura del cardenal de S. Eustaquio / Catedral Sepulcro de D. Martín Vázquez de Arce, El Doncel / Catedral Sepulcro de los padres del Doncel / Catedral Sepulcro de Juan Ruiz de Pelegrina	Maestro Sebastián de Toledo	1434/1446 1491
	Pozancos	Sepulcro de Martín Fernández / Iglesia		
	Jirueque	Sepulcro de Alonso Fernández		
	Toledo	Sepulcros de D. Alvaro de Luna y Dña. Juana de Pimentel / Catedral	Maestro Sebastián de Toledo	1489
CATALUÑA	Gerona	Sepulcro del obispo Bernat de Pau / Catedral	Anónimo	mediados XV
	Ampurias	Retablo de la Iglesia de Castelló	Vicente Borrás	XV
	Poblet	Retablo / Monasterio	Damián Forment	
	Sta. Coloma de Queralt	Sepulcro de Pere V de Queralt	Esteban de Burgos y Pere Cirol	mediados XIV
	Tarragona	Retablo / Catedral	Pere Johan	mediados XV
EXTREMADURA	Guadalupe	Sepulcro de Gonzalo de Illescas / Monasterio	Egas Cueman	1458
MADRID	Madrid	Estatua orante de Pedro I el Cruel / M.A.N. Sepulcro de Dña. Constanza / M.A.N. Sta. Catalina y Sta. Ursula / M.A.N. Adoración de los Magos / M.A.N. Retablo de la Vida de la Virgen / M.A.N. Cabeza de joven paje / M.A.N. Rey David y Profeta (del Monasterio de Fresdeval, Burgos) / M.A.N. Fragmento de religioso (del Monasterio de Poblet) / M.A.N.	Anónimo Alabastro inglés Alabastro inglés Alabastro inglés Gil de Siloé Jaime Cascalls	principios XVI XV XV finales XV XIV
	El Goloso	Sepulcro de Dña. Beatriz de Galindo y D. Fco. Ramírez / Convento de la Concepción Jerónima	Hernán Pérez de Alviz	1531
NAVARRA	Pamplona	Sepulcro de Carlos III el Noble y Leonor de Castilla / Catedral	Johan Lome de Tournai y Michel de Reims	1413/1420
LA RIOJA	Sto. Domingo de la Calzada	Retablo (zócalo) / Catedral Templete de alabastro del Mausoleo con Cripta / Catedral	Damián Forment Felipe Vigarny; Resines	1540 1513

Tabla 1. cont.

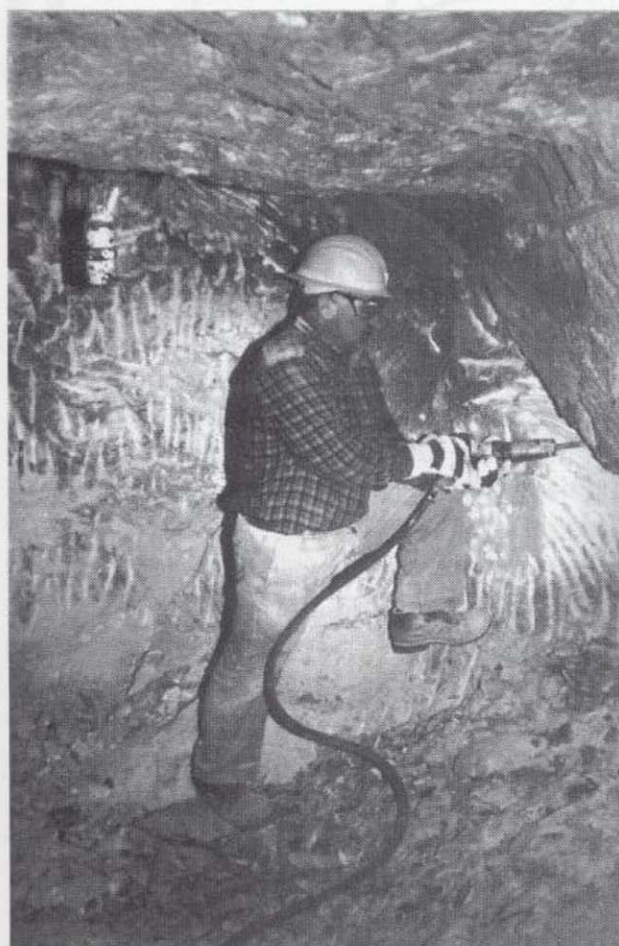


Fig. 7.- Extracción de bolos de alabastro (variedad "Scaglione") en la explotación subterránea "Marmolaio", en las inmediaciones de Castellina Marittima (Italia).

es típica del área de Castellina, mientras que las restantes afloran fundamentalmente en la zona de Volterra.

Actualmente, la industria del alabastro en Italia importa gran cantidad de materia prima de España, dada la abundancia y calidad de dicho mineral ornamental en nuestro País y, sobre todo, por los menores costes de extracción a pie de cantera.

La Península Ibérica posee importantes depósitos de alabastro, que se reparten por sus diferentes cuencas sedimentarias terciarias, siendo las principales las siguientes: la Cuenca del río Ebro, la Cuenca de Calatayud y la Cuenca de Madrid. En la Figura 8, se refleja la distribución de los afloramientos de yesos existentes en España, indicándose los más importantes yacimientos de alabastro y las localidades de las canteras más significativas.

La Cuenca Terciaria del Ebro contiene los depósitos de alabastro de mayor calidad que existen en España, hallándose los más afamados dentro de la

Comunidad de Aragón, concretamente en un área discontinua comprendida entre las localidades de Mediana de Ebro, Quinto de Ebro (al SE de Zaragoza) y Azaila y Albalate del Arzobispo (dentro de la provincia de Teruel) (ITGE, 1991).

En estas zonas se extraen dos variedades fundamentales denominadas: "Buñuelo" y "Transparente". El alabastro "Buñuelo", cuya morfología externa recuerda al producto de repostería que le da nombre, es de color blanquecino, poco translúcido, y presenta unas vetas internas ("aguas") que lo caracterizan. Aflora entre Mediana y Quinto de Ebro y también en Albalate del Arzobispo. Por su parte, el alabastro "Transparente" -mejor translúcido- es propio de Azaila y sus alrededores (Díaz Rodríguez, 1994) y posee una extraordinaria belleza. Es de color blanquecino, aunque también se manifiesta en tonos amarillentos e incluso anaranjados. Posee una elevada translucidez, pudiendo ser comparado, en determinados afloramientos, con la variedad italiana "Scaglione". Los depósitos de alabastro de estas áreas perte-

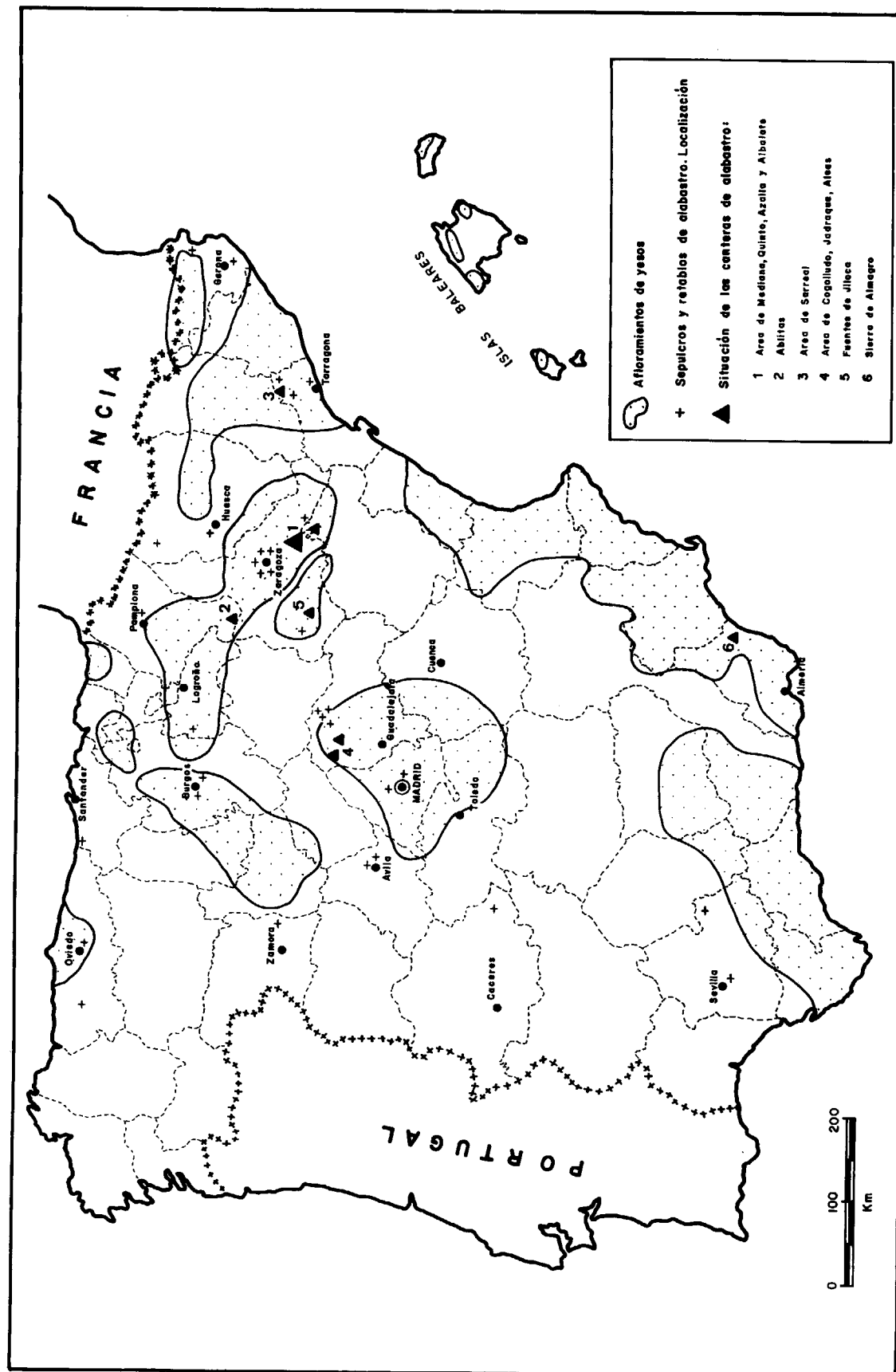


Fig.8.- Situación general de los principales afloramientos de yesos existentes en España (según Collantes y Griffo, 1982), reflejándose la situación geográfica de las principales canteras de alabastro y la localización de algunas de las principales obras de arte españolas hechas en alabastro (ver Tabla 1).

necen a las épocas del Oligoceno Superior y del Mioceno Inferior.

Las canteras de estos lugares han constituido una de las principales fuentes de suministro de alabastro a los maestros artesanos de la antigüedad -e incluso para alguno de los artistas actuales (Fig. 9)- para la elaboración de sus trabajos, dispersos por todo Aragón y su entorno. Cabe aquí reflejar, por ejemplo, la amplia documentación existente (Jimeno Jurío, 1974) acerca de la procedencia de la materia prima para la elaboración del sepulcro de alabastro de Carlos III de Navarra (El Noble), de inigualable belleza y gran talla, que se halla en la Catedral de Pamplona, donde se puede leer cómo el Rey Noble mandó expresamente traer el alabastro de su futura sepultura del pueblo zaragozano de Sástago, que se encuentra dentro del entorno de las canteras arriba citadas; para lo que, a principios de 1416, salieron hacia el mismo Johan Lome, el maestro del sepulcro, y otros varios mazoneros, estando de regreso en Olite, donde se realizó el tallado, con ciento setenta quintales de alabastro en el verano de dicho año. Para la iniciación de la obra, concretamente para los pedestales y los doseles, se empleó un alabastro de no tanta calidad que procedía de las canteras de Ablitas (Jimeno Jurío, op.cit.).

Precisamente, al SE de la localidad de Ablitas (Navarra), se localizan los principales afloramientos de alabastro existentes en Navarra, pertenecientes a unas épocas geológicas semejantes a los anteriormente descritos en Aragón.

En Sarreal (Tarragona), dentro también de la Cuenca Terciaria del Ebro, se conocen antiguas canteras de alabastro, hoy día abandonadas, aunque se sigue manteniendo la antigua tradición de manufactura del material, en este caso, traído de las próximas canteras aragonesas. Destacan en la elaboración de elementos decorativos relacionados con la luz, como las lámparas.

Los paneles translúcidos de alabastro son bastante apreciados por los arquitectos actuales, por esa atmósfera especial que crea el material al ser atravesado por la luz, existiendo algunos edificios en España, como la Fundación Pilar y Joan Miró en Palma de Mallorca, que conjugan el cemento con esta piedra natural.

La Cuenca de Calatayud es una depre-



Fig. 9.- Ejemplo de una obra escultórica en alabastro "Buñuelo" realizada por Eduardo Chillida. Fotografía tomada en la exposición "Chillida Escala Humana", celebrada en el Palacio de Revillagigedo de Gijón en el año 1991.

sión alargada de dirección NO-SE que se extiende desde la localidad de Calatayud (Zaragoza) hasta las proximidades de Montalbán (Teruel). Los depósitos de alabastro de mayor interés se localizan en la localidad de Fuentes de Jiloca y pertenecen a la Formación Yesos de Calatayud (Mioceno Inferior) (Collantes Estrada y Griffo Navarro, 1982). En esta zona se localiza la variedad "alabastro ágata", de color acaramelado.

La Cuenca de Madrid posee abundantes afloramientos de yesos, estando los depósitos de alabastro enclavados sobre todo en la provincia de Guadalajara, en las localidades de Fuencemillán, Cogolludo, Jadraque y Aleas de Beleña. En concreto, en las inmediaciones de este último pueblo se extrajo la materia prima que conformó el mausoleo del arzobispo Fernando Valdés Salas, que tiene su emplazamiento en la Colegiata Sta. María la Mayor de Salas (Asturias).

En la actualidad, en Jadraque existen talleres de elaboración de pequeñas figuras y otros objetos de adorno, siendo el alabastro que utilizan proveniente de las canteras existentes en Aragón.

Para terminar la exposición de los depó-

sitos de alabastro existentes en España, hay que citar los que se extraen en la Sierra de Almagro (Almería) por sus peculiares características que los diferencian notablemente de los típicos alabastros sedimentarios. Su génesis está ligada a formaciones geológicas que han sufrido un bajo grado de metamorfismo, el cual ha transformado la roca rica en sulfatos (yeso, anhidrita, principalmente), recristalizándola. Las principales canteras, pertenecientes a la empresa "Almería Stone, S.A.", se encuentran en dos unidades geológicas distintas dentro del sistema Triásico denominadas: Unidad de Almagro y Unidad de Ballabona-Cucharón. Morfológicamente, el alabastro se presenta en grandes masas continuas y no en forma de bolos, lo que permite su explotación en bancos, como cualquier otra roca ornamental más, mediante corte por hilo diamantado. Sus colores habituales son el blanco marfil y los tonos rosáceos, pudiendo obtenerse grandes placas de fino espesor y muy translúcidas. Por su mayor compacidad y superior grado de dureza que los alabastros de origen sedimentario, los depósitos de esta zona son apropiados como roca ornamental de construcción para revestimientos interiores, tableros de mesas, balustradas de escaleras, etc.

necen a las épocas del Oligoceno Superior y del Mioceno Inferior.

Las canteras de estos lugares han constituido una de las principales fuentes de suministro de alabastro a los maestros artesanos de la antigüedad -e incluso para alguno de los artistas actuales (Fig. 9)- para la elaboración de sus trabajos, dispersos por todo Aragón y su entorno. Cabe aquí reflejar, por ejemplo, la amplia documentación existente (Jimeno Jurío, 1974) acerca de la procedencia de la materia prima para la elaboración del sepulcro de alabastro de Carlos III de Navarra (El Noble), de inigualable belleza y gran talla, que se halla en la Catedral de Pamplona, donde se puede leer cómo el Rey Noble mandó expresamente traer el alabastro de su futura sepultura del pueblo zaragozano de Sástago, que se encuentra dentro del entorno de las canteras arriba citadas; para lo que, a principios de 1416, salieron hacia el mismo Johan Lome, el maestro del sepulcro, y otros varios mazoneros, estando de regreso en Olite, donde se realizó el tallado, con ciento setenta quintales de alabastro en el verano de dicho año. Para la iniciación de la obra, concretamente para los pedestales y los doseles, se empleó un alabastro de no tanta calidad que procedía de las canteras de Ablitas (Jimeno Jurío, op.cit.).

Precisamente, al SE de la localidad de Ablitas (Navarra), se localizan los principales afloramientos de alabastro existentes en Navarra, pertenecientes a unas épocas geológicas semejantes a los anteriormente descritos en Aragón.

En Sarreal (Tarragona), dentro también de la Cuenca Terciaria del Ebro, se conocen antiguas canteras de alabastro, hoy día abandonadas, aunque se sigue manteniendo la antigua tradición de manufactura del material, en este caso, traído de las próximas canteras aragonesas. Destacan en la elaboración de elementos decorativos relacionados con la luz, como las lámparas.

Los paneles translúcidos de alabastro son bastante apreciados por los arquitectos actuales, por esa atmósfera especial que crea el material al ser atravesado por la luz, existiendo algunos edificios en España, como la Fundación Pilar y Joan Miró en Palma de Mallorca, que conjugan el cemento con esta piedra natural.

La Cuenca de Calatayud es una depre-

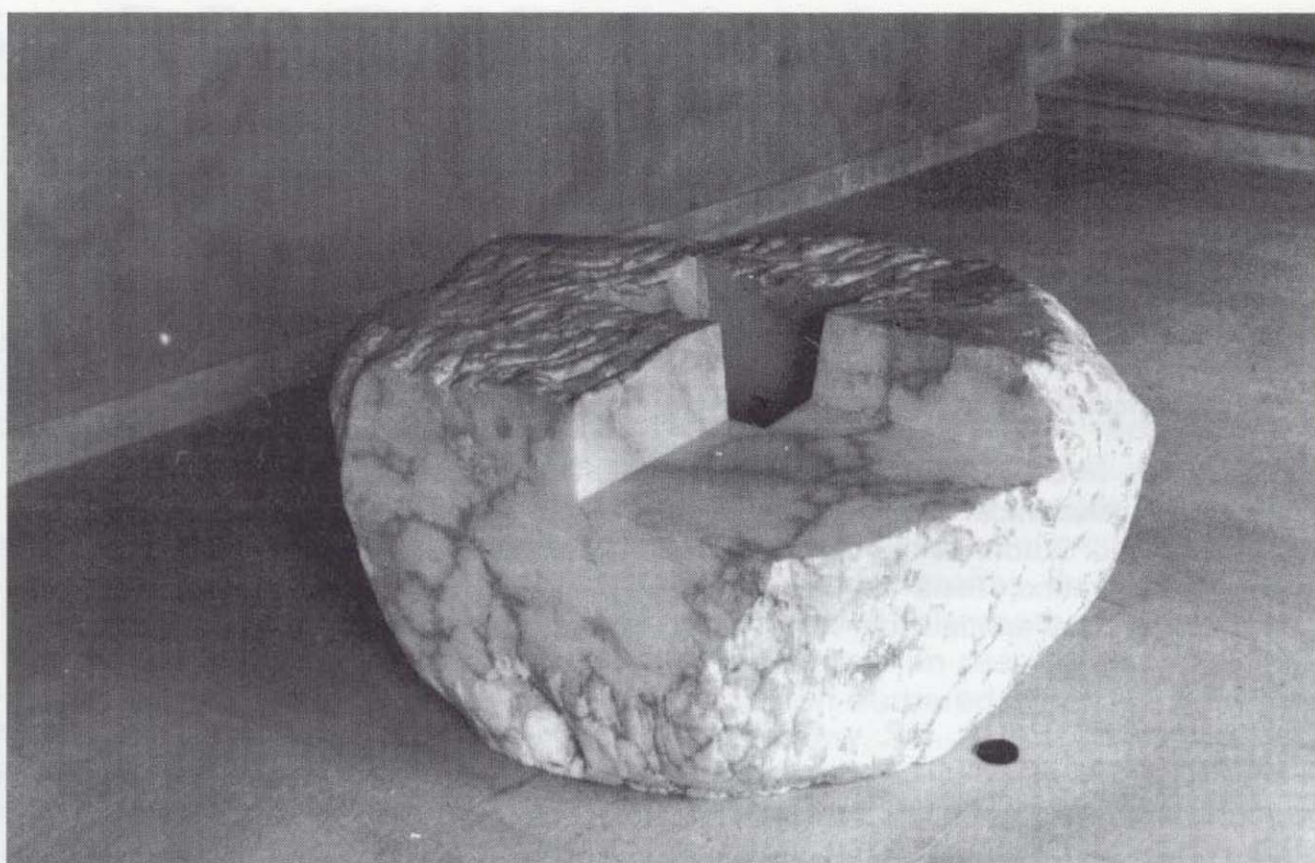


Fig. 9.- Ejemplo de una obra escultórica en alabastro "Buñuelo" realizada por Eduardo Chillida. Fotografía tomada en la exposición "Chillida Escala Humana", celebrada en el Palacio de Revillagigedo de Gijón en el año 1991.

sión alargada de dirección NO-SE que se extiende desde la localidad de Calatayud (Zaragoza) hasta las proximidades de Montalbán (Teruel). Los depósitos de alabastro de mayor interés se localizan en la localidad de Fuentes de Jiloca y pertenecen a la Formación Yesos de Calatayud (Mioceno Inferior) (Collantes Estrada y Griffó Navarro, 1982). En esta zona se localiza la variedad "alabastro ágata", de color acaramelado.

La Cuenca de Madrid posee abundantes afloramientos de yesos, estando los depósitos de alabastro enclavados sobre todo en la provincia de Guadalajara, en las localidades de Fuencemillán, Cogolludo, Jadraque y Algas de Beleña. En concreto, en las inmediaciones de este último pueblo se extrajo la materia prima que conformó el mausoleo del arzobispo Fernando Valdés Salas, que tiene su emplazamiento en la Colegiata Sta. María la Mayor de Salas (Asturias).

En la actualidad, en Jadraque existen talleres de elaboración de pequeñas figuras y otros objetos de adorno, siendo el alabastro que utilizan proveniente de las canteras existentes en Aragón.

Para terminar la exposición de los depó-

sitos de alabastro existentes en España, hay que citar los que se extraen en la Sierra de Almagro (Almería) por sus peculiares características que los diferencian notablemente de los típicos alabastros sedimentarios. Su génesis está ligada a formaciones geológicas que han sufrido un bajo grado de metamorfismo, el cual ha transformado la roca rica en sulfatos (yeso, anhidrita, principalmente), recristalizándola. Las principales canteras, pertenecientes a la empresa "Almería Stone, S.A.", se encuentran en dos unidades geológicas distintas dentro del sistema Triásico denominadas: Unidad de Almagro y Unidad de Ballabona-Cucharón. Morfológicamente, el alabastro se presenta en grandes masas continuas y no en forma de bolos, lo que permite su explotación en bancos, como cualquier otra roca ornamental más, mediante corte por hilo diamantado. Sus colores habituales son el blanco marfil y los tonos rosáceos, pudiendo obtenerse grandes placas de fino espesor y muy translúcidas. Por su mayor compacidad y superior grado de dureza que los alabastros de origen sedimentario, los depósitos de esta zona son apropiados como roca ornamental de construcción para revestimientos interiores, tableros de mesas, balustradas de escaleras, etc.

REFERENCIAS

- ALCOLEA, S. (1971).- Relieves ingleses de alabastro en España: Ensayo de catalogación. Archivo Español de Arte, 44, 137-153.
- CECCHIELLA, A. (1977).- L'Industria dell'alabastro. Problemi e prospettive. Edita Centro Studi Economico Finanziari per la Provincia di Pisa, 110 págs.
- CIAMPALINI, M.C. (1981).- L'Alabastro della serie miocenica superiore nella cava Pipistrello: Studio chimico, mineralogico, petrografico. Tesis de Licenciatura inédita, Universidad de Pisa, 41 págs.
- COLLANTES ESTRADA, L.P. y GRIFFO NAVARRO, J.L. (1982).- Panorámica general del yeso en España. Los yesos de la cubeta de Calatayud en la provincia de Zaragoza. Tecniterrae, 46, 53-63.
- DIAZ RODRIGUEZ, L.A. (1991).- El alabastro: Un enigmático mineral industrial ornamental. Criterios para su reconocimiento. Bol. Museo Arqueológico Nac., 9, 101-112.
- DIAZ RODRIGUEZ, L.A. (1994).- Estudio geológico y minero de los depósitos de alabastro en el entorno de Velilla de Ebro y Azaila (Aragón, NE de España). Estudios Geológicos, 50, 19-32.
- HESTER, T. y HEIZER, R. (1981).- Making stone vases: Ethnoarchaeological studies at an alabaster workshop in upper Egypt. Monographic Journals of the Near East, vol.1, issue 2, 66 págs.
- FIRMAN, R.J. (1984).- A geological approach to the history of english alabaster. The Mercian Geologist, 9, 161-178.
- FIUMI, E. (1980).- La manifattura degli alabastri. Nistri-Lischi Editori, 112 págs.
- ITGE (1991).- Estimación del potencial de alabastro en el Valle del Ebro. Fondo Documental del ITGE, Madrid, informe inédito, 185 págs.
- JIMENO JURIO, J.M. (1974).- Autores del sepulcro de Carlos III de Navarra. Príncipe de Viana, 136, 455-484.
- KOSTOV, R.I. (1988).- A brief review of gemmological systematics. Geochemistry, Mineralogy and Petrology, 25, Sofia, 46-67.
- KUZVART, M. (1984).- Industrial minerals and rocks. Developments in Economic Geology, Elsevier, 453 págs.
- ORTI, F.; ROSELL, L.; SALVANY, J.M.; INGLES, M.; PERMANYER, A. y GARCIA-VEIGAS, J. (1989).- Sedimentología y diagénesis como criterios de prospección de recursos en el Terciario evaporítico de la Cuenca del Ebro. XII Congreso Español de Sedimentología, 253-262.
- PICCIO, A. y ZEZZA, U. (1968).- Su alcune caratteristiche fisiche di alabastri italiane. Atti. Soc. Ital. Sci. Nat. Mus. Civ. Sto. Nat. Milano, 107, 263-275.
- PLINIO, C. (1982).- Historia Natural. Traducción de Gerónimo de Huerta, 1629, en edición facsímil en 2 tomos, editada por el ITGE.
- MOTINOT, R. (1980).- Les Albatres. Mausolee, núm.522, 309-326.
- MRAZEK, I. (1985).- Libyský alabastr. Geologický Průzkum, 8-9, 266-267.
- MYERS, B.M. (1981).- Forms and attributes of gypsum. Lapidary Journal, 35, 572-577.
- SEMYONOV, V.B. (1984).- Satin-spar. Sverdlovsk Mid-Urals Publishing House, 192 págs.
- SHEPHERD, R. (1980).- Prehistoric mining and allied industries. Academic Press, 272 págs.
- YOUNG, J. (1990).- Alabaster. Edit. Derbyshire Museum Service, 69 págs.

NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

Texto.

El texto, que será completo (tablas, figuras, fotografías, etc), con pruebas en papel, irá acompañado de la correspondiente grabación en disquete, señalando en el mismo el programa y versión utilizados. Este texto se considerará definitivo. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España 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
Jefe del Servicio de Publicaciones
Instituto Tecnológico Geominero de España
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA

Finalidad:

*Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería
Agua subterráneas, y Disciplinas conexas*



GEOLOGIA

MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA
GEOLOGIA MARINA



RECURSOS MINERALES

EXPLORACION MINERA E INVESTIGACION DE YACIMIENTOS
METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS
PROCESOS, TECNOLOGIA Y ECONOMIA MINERAS
NORMATIVA Y SEGURIDAD MINERA



AGUAS SUBTERRANEAS

CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS
RECURSOS GEOTERMICOS



INGENIERIA GEOAMBIENTAL

RIESGOS GEOLOGICOS
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES



LABORATORIOS Y ENSAYOS

ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA
GEOFISICA Y TELEDETECCION APLICADA
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS
CARACTERIZACION DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES
SONDEOS MECANICOS Y ENSAYOS DE BOMBEO



INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS

FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS
LITOTECA
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES



SERVICIO DE PUBLICACIONES

CARTOGRAFIA TEMATICA A DIVERSAS ESCALAS
PUBLICACIONES SOBRE GEOLOGIA, MINERIA Y CIENCIAS CONEXAS
«BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO»
«REVISTA ESPAÑOLA DE MICROPALAEONTOLOGIA»



MUSEO GEOMINERO

PALEONTOLOGIA Y MINERALOGIA
CATALOGACION Y GESTION DE COLECCIONES GEOLOGICAS
EXPOSICIONES: TEMPORALES Y PERMANENTES
DIVULGACION CIENTIFICA

Sede Central:

C/Ríos Rosas, 23 - 28003 MADRID

☎: 91/349 57 00. Fax: 91/349 57 62

Centro de Laboratorios:

C/La Calera, 1 - 28760 TRES CANTOS (MADRID)

☎: 803 22 00