



SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA
Y RECURSOS MINERALES
DIRECCION GENERAL DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION

LA RESERVA «ZONA DE HUELVA»

**TRABAJOS DE LA DIRECCION GENERAL
DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION**

**MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
CENTRO DE PUBLICACIONES**

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

**SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES
DIRECCION GENERAL DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION**

LA RESERVA «*ZONA DE HUELVA*»: TRABAJOS DE LA DIRECCION GENERAL DE MINAS Y DE LA CONSTRUCCION

Madrid, mayo 1990



**MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
CENTRO DE PUBLICACIONES**

Dr. Fleming, 7, 2.º

Teléfs. 250 02 02 - 03 - 04

28036 MADRID

N. I. P. O.: 226 - 90 - 027 - 1

I. S. B. N.: 84 - 7474 - 558 - 6

Depósito Legal: M. 22756 - 1990

Imprime: G. Ajenjo, S. A.

Adelfas, 4 - 28007 Madrid.

Esta publicación recoge diversos estudios realizados, para la Dirección General de Minas y de la Construcción, por un equipo de las cátedras de Metalogenia e Investigación de Yacimientos, de Geología y de Matemática Aplicada, de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid, bajo la dirección de

- **D. Fernando Vázquez Guzmán**, *Dr. Ingeniero de Minas.*
- **D. Florencio Fernández Alonso**, *Geólogo y Geofísico Consultor.*

con la colaboración de

- **Instituto Tecnológico y Geominero de España.**
- **Empresas Adjudicatarias.**
- **D. J. Antonio Navarro Jañez**, *Ingeniero de Minas.*
- **D.^a Casilda Ruiz García**, *Dr. en C. Geológicas.*
- **D.^a Josefina Samper Escalona**, *Dr. en C. Geológicas.*

y la supervisión del *Dr. Ingeniero de Minas*, **D. Fernando de Portugal**, de la Dirección General de Minas y de la Construcción.

INDICE

1. INTRODUCCION.....	7
2. LA RESERVA «ZONA DE HUELVA». EVOLUCION HISTORICA	9
3. SITUACION ACTUAL DEL CONOCIMIENTO GEOLOGICO	15
3.1. El marco geológico.....	15
3.2. Litoestratigrafía.....	16
3.2.1. Devónico	18
3.2.1.1. Formación «Pulo do Lobo».....	18
3.2.1.2. Cuarcitas	18
3.2.1.3. Pizarras	20
3.2.1.4. Calizas	20
3.2.2. Carbonífero.....	20
3.2.2.1. Complejo volcánico sedimentario (C.V.S.).....	20
3.2.2.1.1. Rocas volcánicas ácidas.....	21
3.2.2.1.2. Rocas básicas	21
3.2.2.1.3. Rocas sedimentarias.....	22
3.2.2.2. Grupo Culm.....	23
3.2.2.3. Rocas graníticas	24
3.2.3. Sedimentos postpaleozoicos	24
3.3. Tectónica.....	25
3.4. Metamorfismo	26
4. SITUACION ACTUAL DE LA INVESTIGACION GEOFISICA	27
4.1. Metodologías aplicadas.....	27
4.2. Descripción somera de los métodos: posibilidades y limitaciones.....	31
4.2.1. Método aeromagnético	31
4.2.2. Métodos aeroelectromagnéticos.....	31
4.2.2.1. Dominio de frecuencias.....	31
4.2.2.2. Dominio de tiempos.....	31
4.2.3. Métodos eléctricos.....	32
4.2.3.1. Calicatas eléctricas (C.E.)	32
4.2.3.2. Sondeos eléctricos verticales (S.E.V.).....	32
4.2.3.3. Polarización inducida (P.I.).....	32
4.2.4. Métodos electromagnéticos.....	32
4.2.4.1. Dominio de frecuencias.....	32
4.2.4.2. Dominio de tiempos.....	33
4.2.5. Gravimetría	33
4.2.6. Magnetometría	33
4.2.7. Otros métodos.....	33
4.3. Resultados obtenidos: análisis crítico.....	33
5. LEVANTAMIENTO GRAVIMETRICO DE LA PARTE OCCIDENTAL DE LA RESERVA «ZONA DE HUELVA».....	37
5.1. Adquisición de datos	37
5.1.1. Procedentes de las empresas adjudicatarias.....	37
5.1.2. Medidos directamente en campo.....	37
5.1.3. Estaciones tratadas	37
5.2. Elaboración de la campaña de campo	37
5.2.1. Topografía	37
5.2.2. Gravimetría	38
5.2.3. Correcciones y controles de calidad.....	38

5.3.	Homologación de los datos de las empresas	38
5.4.	Precisión del levantamiento.....	39
5.5.	Anomalía de Bouguer	39
5.6.	Interpretación minero-estructural	40
5.7.	Estudio crítico de las principales anomalías: áreas de interés preferente	41
6.	RED DE BASES GRAVIMETRICAS DE LA FAJA PIRITICA Y ENLACE CON PORTUGAL	43
6.1.	Consideraciones generales	43
6.2.	Característica de la red	43
6.3.	Sistemática de trabajo	43
6.4.	Resultados obtenidos.....	44
6.5.	Precisión de la red	44
7.	ESTUDIO GEOQUIMICO	45
7.1.	Tratamiento de datos: metodología.....	45
7.2.	Geoquímica de los volcanismos productivos V_1 y V_2	47
7.2.1.	Estudio geoquímico inicial	47
7.2.2.	Análisis estadístico sencillo.....	48
7.2.3.	«ACP en modo-Q».....	48
7.2.4.	«ACP en modo-R».....	49
7.2.5.	Análisis de correspondencias.....	49
7.2.6.	Agrupamiento y análisis discriminante.....	50
7.2.7.	Conclusiones	50
8.	CONCLUSIONES GENERALES	51
9.	BIBLIOGRAFIA.....	53
10.	FICHAS DE BASES GRAVIMETRICAS	55
11.	INDICE DE PLANOS	
11.1.	Síntesis geológica	
3.1.	La Joya, 937-I	
3.2.	Valdelamusa, 937-II	
3.3.	Patrás, 938-I	
3.4.	Campofrío, 938-II	
3.5.	Cabezas Rubias, 937-III	
3.6.	El Cerro de Andévalo, 937-IV	
3.7.	Silos de Calañas, 938-III	
3.8.	Nerva, 938-IV	
3.9.	Villanueva de las Cruces, 959-I	
3.10.	Calañas, 959-II	
3.11.	Sotiel Coronada, 960-I	
3.12.	Berrocal, 960-II	
3.13.	Alosno, 959-III	
3.14.	Los Cristales, 959-IV	
3.15.	Valverde del Camino, 960-III	
11.2.	Planos de gravimetría	
5.1.	Anomalía de Bouguer. Hoja 1:50.000 n.º 937 (El Cerro de Andévalo)	
5.2.	Anomalía de Bouguer. Hoja 1:50.000 n.º 959 (Calañas)	
6.1.	Red de bases	

1. INTRODUCCION

Los recientes descubrimientos de Neves Corvo y Gavião en Portugal, y los de Tintillo, Arroyo de los Frailes, Masa Valverde, Aguas Teñidas Este y Migollas, en España, han puesto de manifiesto la potencialidad minera aún existente en la Faja Pirítica Ibérica y abren nuevas perspectivas de investigación en áreas ocupadas por sedimentos del Culm, por volcanitas, por recubrimientos terciarios e, incluso, por materiales devónicos cuando éstos cabalgan sobre el Complejo Volcánico-Sedimentario.

Los descubrimientos de Masa Valverde, Aguas Teñidas y Migollas, en el caso español, son consecuencia directa de las actuaciones de las empresas mineras a las que, por Orden de 30 de marzo de 1982 (B.O.E. 19-5-82), se adjudicó la investigación de las áreas de determinados bloques en que la Administración había dividido la Reserva del Estado «Zona de Huelva».

Los estudios y trabajos de investigación realizados por las empresas mineras han tenido lógicamente importancia y extensión diversa, y, al ser realizados por equipos distintos, presentan peculiaridades y características propias, que reflejan tanto la concepción investigadora como la forma, técnica y metodología de trabajo empleadas. Ello ha llevado aparejada una valoración no integral de los resultados de las empresas mineras, con la consiguiente pérdida de tratamiento global de las áreas potencialmente interesantes y de los datos obtenidos.

En consecuencia, la Dirección General de Minas y de la Construcción, a finales de 1987, acometió la tarea de recopilar todos los trabajos ejecutados, de uniformar y homogeneizar los mismos, y de valorar la aplicabilidad, técnicas y resultados de los métodos de investigación utilizados. Simultáneamente, inició el estudio geoquímico de los horizontes portadores de las nuevas mineralizaciones descubiertas y la cobertura gravimétrica de aquellas zonas no abordadas por las empresas mineras, con el fin de enlazar e integrar las cuadrículas realizadas por éstas. Esta última labor obligó al establecimiento de una red

gravimétrica de bases de segundo orden, referida a la Red Gravimétrica Fundamental Española de 1973 y relacionada con la Red Gravimétrica Fundamental Portuguesa; de esta forma se abre la posibilidad de poder realizar, en un futuro, el levantamiento gravimétrico de toda la Faja Pirítica Ibérica, con la integración de los datos gravimétricos disponibles en territorio portugués y español.

El resultado de estos trabajos es una documentación de primordial importancia para las empresas con intereses mineros en la región y para la comunidad científica y técnica.

La Dirección General de Minas y de la Construcción ha querido contribuir con la presente publicación, que recoge de manera resumida los estudios y trabajos realizados, a la difusión de una información que considera de suma utilidad, que puede constituir un acicate para empresas mineras interesadas en la Faja Pirítica y, en cualquier caso, un documento básico para nuevos trabajos de investigación minera en la región.

La Administración española en el convencimiento del enorme potencial minero que encierra la Faja Pirítica, tiene una decidida voluntad de promocionar, de forma intensiva y sistemática, la investigación de toda esta región metalogénica, aportando la necesaria infraestructura y colaborando con las empresas operadoras en este distrito minero, con la certidumbre de que todo el esfuerzo que se haga en este sentido redundará en el beneficio socio-económico de la zona y a un necesario mayor desarrollo de la minería española y comunitaria.

Madrid, mayo de 1990

*Enrique Garcia Alvarez
Director General de Minas
y de la Construcción*

2. LA RESERVA «ZONA DE HUELVA». EVOLUCION HISTORICA

La primera Reserva se estableció, con carácter provisional, a propuesta del Instituto Nacional de Industria, por Decreto de 10-2-1943 (B.O.E. de 20-2-1943). Comprendía toda clase de sustancias y se extendió a 18 términos municipales de las provincias de Huelva y Sevilla. Tres años más tarde, por Orden de 10-2-1945 (B.O.E. de 22-2-1945), es elevada a definitiva, conservando los mismos límites pero reduciéndola, en cuanto a sustancias reservadas, a las piritas de hierro y ferrocobrizas. Su extensión era de 260.300 hectáreas.

Posteriormente, una disposición aclaratoria, publicada en el B.O.E. de 21-1-1953, ampliaba los conceptos de pirita a los pórfidos y pizarras cobrizas y azufrones.

En 1957, por Orden de 28-3-1957 (B.O.E. de 22-4-1957) se amplía la Reserva inicial con otros 39 términos municipales, alcanzando una superficie de 710.500 ha.

Las Ordenes Ministeriales de 31 de enero de 1961 (B.O.E. de 14-2-1961) y de 20 de febrero de 1962 (B.O.E. de 6-3-1962) establecieron la Reserva definitiva, a favor del Estado, para piritas de hierro y ferrocobrizas, pórfidos y pizarras cobrizas y azufrones en 11 términos municipales de la provincia de Huelva: Cabezas Rubias, Cortegana (jurisdicción de Garnacha y Valdelamusa), Almonaster la Real, Campofrío, Calañas, Zalamea la Real, El Cerro de Andévalo, Valverde del Camino, Villanueva de las Cruces, Alosno y El Campillo, con una superficie total de 188.100 ha (Fig. 2.1), con cuyos límites ha llegado a nuestros días.

La Resolución de la Dirección General de Minas de 28 de diciembre de 1968 (B.O.E. de 11-1-1969) esta-

bleció la suspensión del derecho de petición de permisos de investigación y concesiones directas de explotación de toda clase de sustancias minerales excluidos los hidrocarburos fluidos y las rocas bituminosas dentro de la Reserva definitiva.

Por Orden Ministerial de 29-11-1969 se dispuso la división de la Reserva en 24 bloques, cuya investigación se encomendó a diversas empresas mineras establecidas en la zona (Fig. 2.2).

Por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1981 (B.O.E. de 22-4-1981), la reserva a favor del Estado, ahora denominada «Zona de Huelva» y ampliada a toda clase de sustancias minerales, excluidos los hidrocarburos y rocas bituminosas, fue dividida de nuevo en 27 bloques, cuya delimitación se especificaba en la propia Orden, autorizándose a la Dirección General de Minas a convocar concurso para su adjudicación entre las empresas españolas y extranjeras, o asociaciones de éstas, interesadas en su investigación (Fig. 2.3).

La Orden de 30 de marzo de 1982 (B.O.E. de 19-5-1982) adjudicó la investigación de dichos bloques o fracciones a las empresas reflejadas en la figura 2.4.

Quedaron libres el bloque I, la parte septentrional de los bloques II, III y XIV, el sector suroriental de los bloques XXI y XXVII, la mayor parte del bloque XVI, y una pequeña fracción en el noroeste del bloque XXII. Áreas que fueron levantadas por el Real Decreto 1590/1983, de 30 de marzo, B.O.E. n.º 137, de 9 de junio de 1983.

Finalmente, el Real Decreto 1439/1988, de 25 de noviembre, B.O.E. n.º 290 del 3 de diciembre de 1988, prorroga por tres años la reserva a favor del Estado.

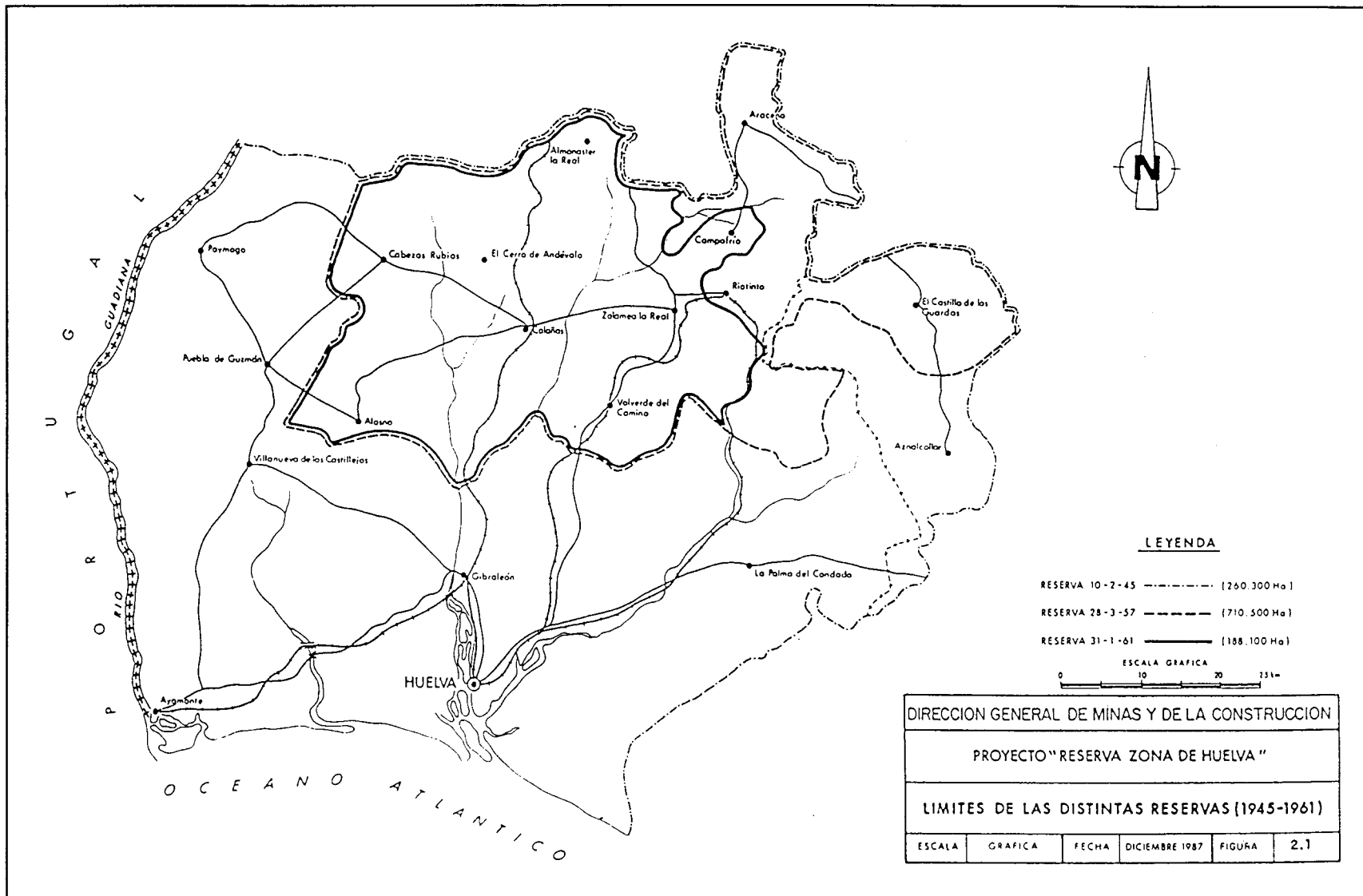


Fig. 2.1.

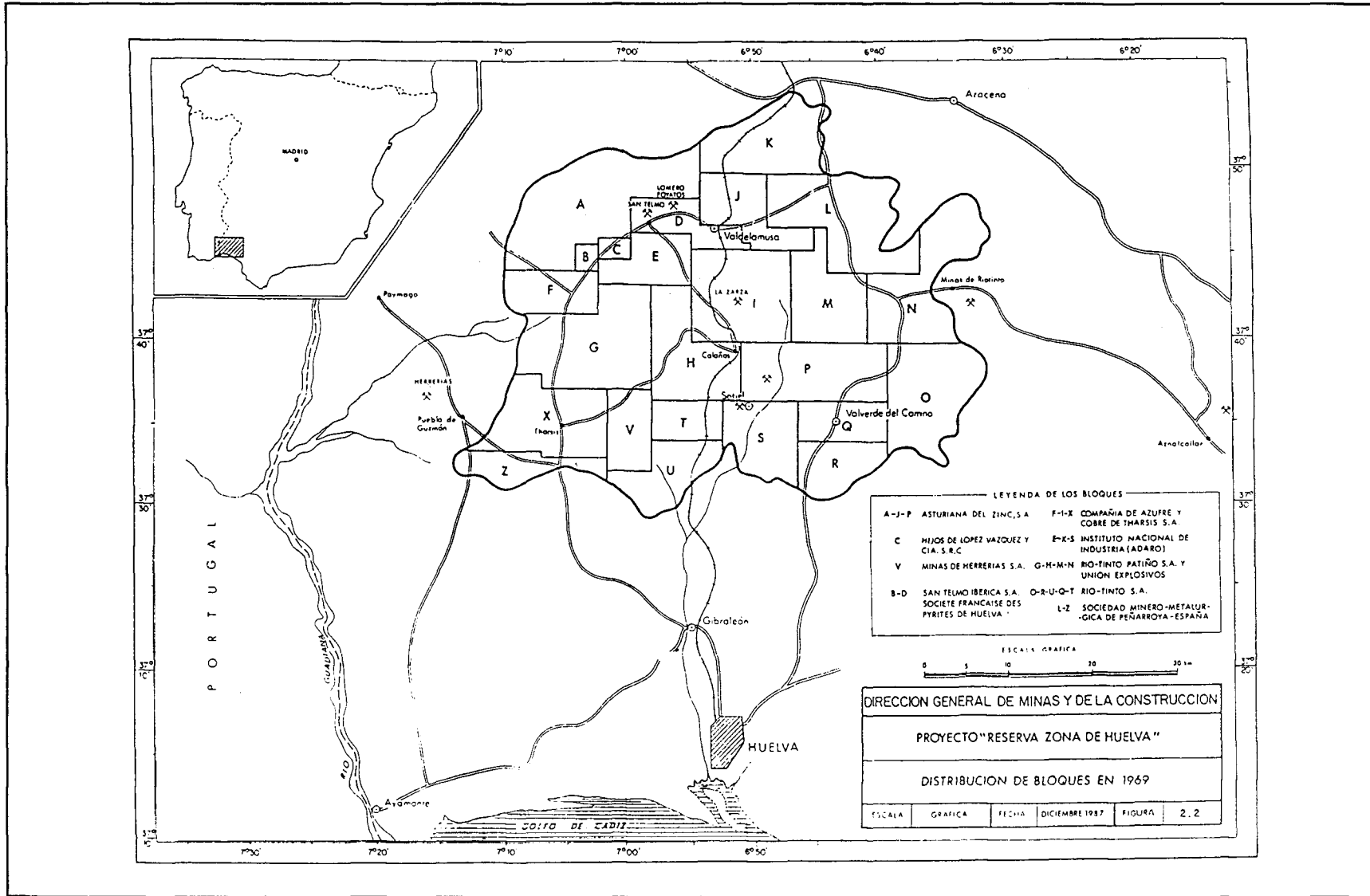


Fig. 2.2.

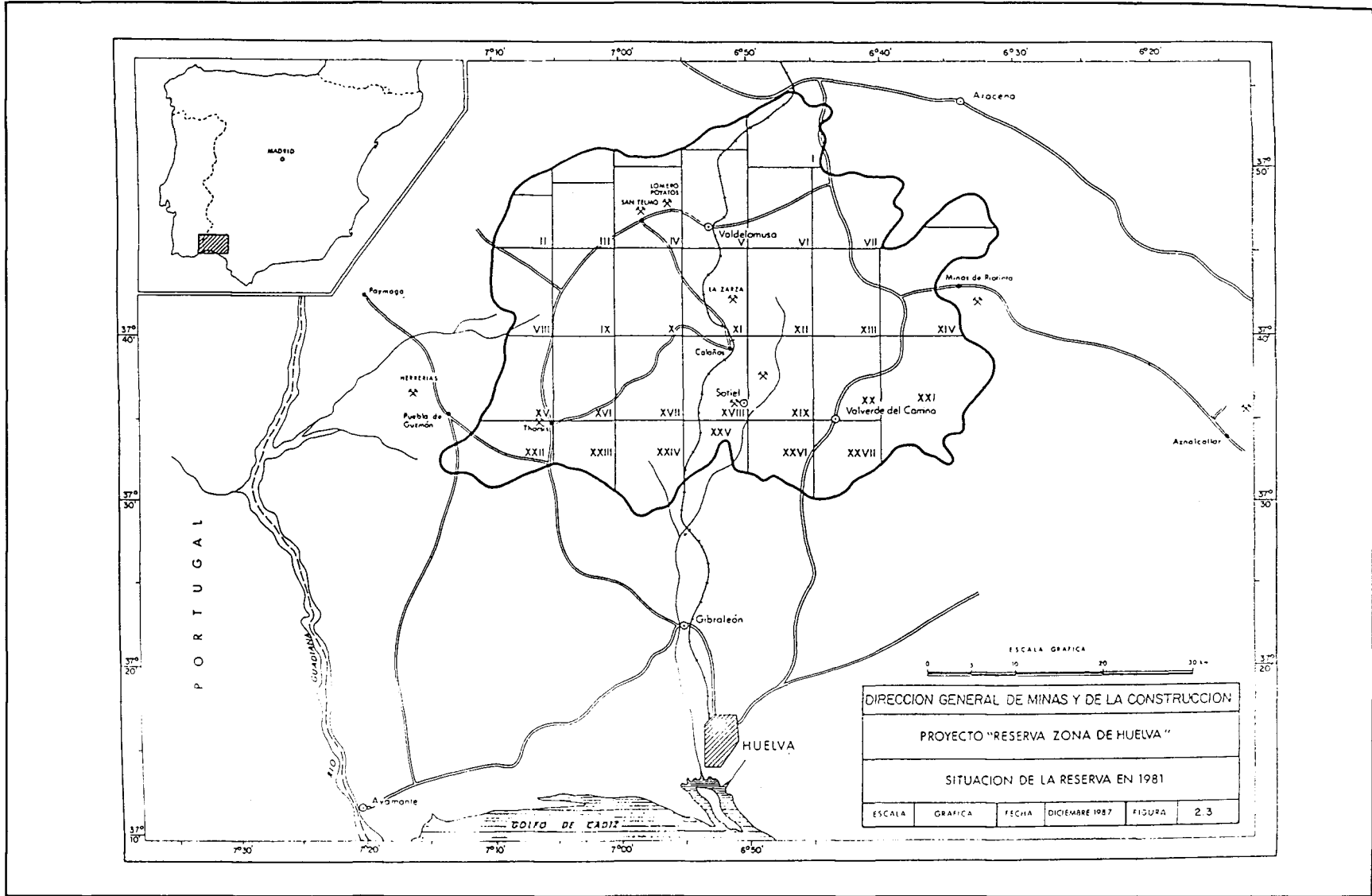


Fig. 2.3.

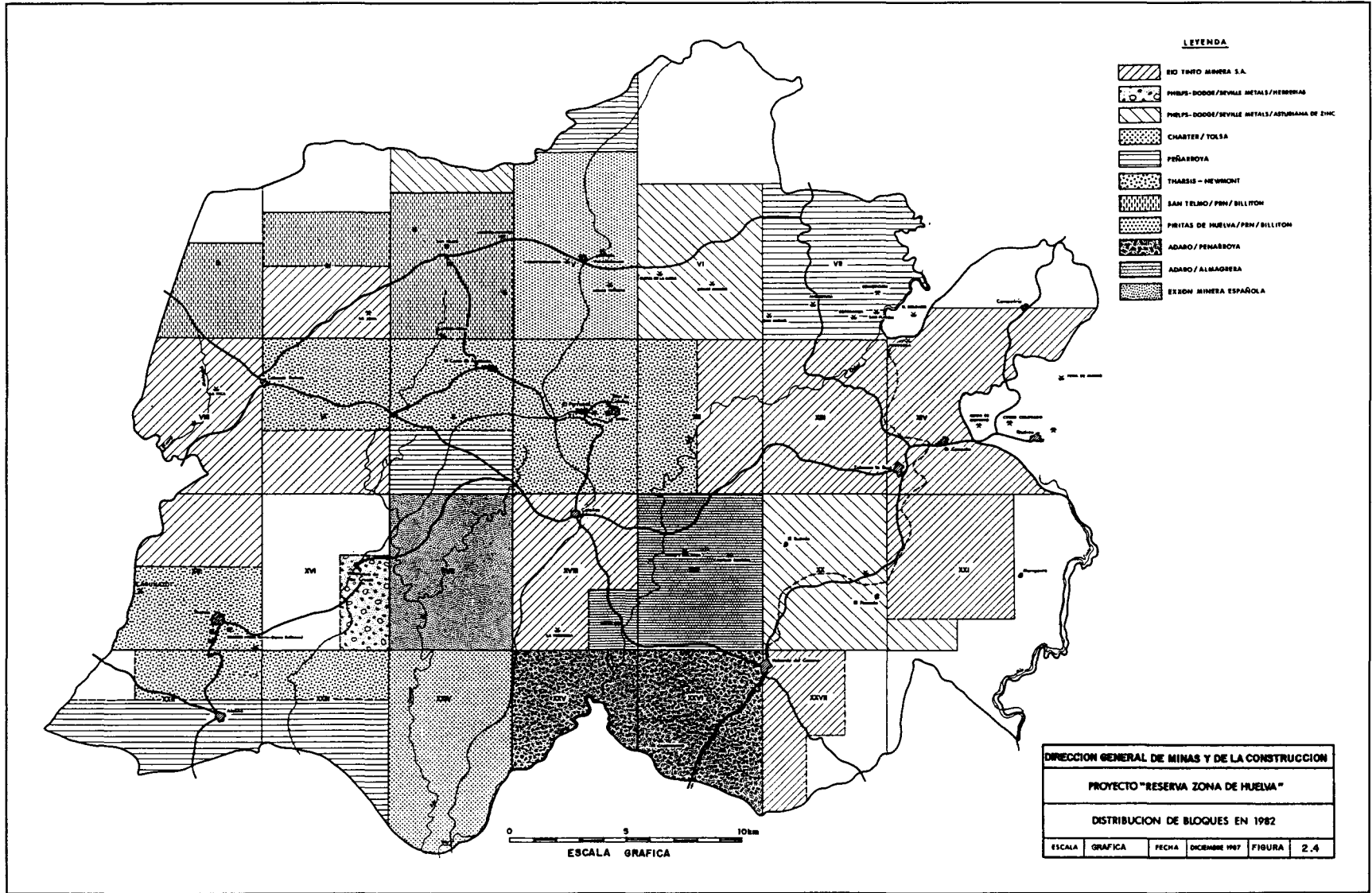


Fig. 2.4.

3. SITUACION ACTUAL DEL CONOCIMIENTO GEOLOGICO

3.1. EL MARCO GEOLOGICO

La Faja Piritica está situada en el SW del Macizo Hespérico de F. Hernández Pacheco (1932), equivalente al concepto de Meseta Ibérica de F. Lotze (1945) y posteriores autores que han trabajado sobre el mismo.

Según F. Lotze (1945), la Meseta Ibérica se define como un gran geoanticlinal emergido desde los plegamientos variscos, rodeado por fosas marginales. Estas fosas serían: la Lusitánica al Oeste, la Bética al Sur, la Astúrica-Cantábrica al Norte y la Celtibérica al Este.

Este mismo autor hace una división de la Meseta en seis zonas, según la naturaleza de sus rocas intrusivas y metamórficas, así como por las formaciones sedimentarias que la constituyen (Fig. 3.1). En esta división la Faja Piritica perteneció a la zona Portuguesa Meridional dentro del dominio marginal.

En 1973 J. P. Bard *et al.* ponen al día el conjunto de conocimientos sobre la Meseta Ibérica y proponen un modelo geodinámico para la evolución de dicha unidad durante el Paleozoico. Las seis zonas propuestas por F. Lotze (1945) quedan reducidas a cinco (Fig. 3.2), establecidas, como hizo F. Lotze, según el

tipo de sedimentos, estilo tectónico, rocas intrusivas y metamorfismo de cada una de ellas.

En esta nueva división, la Faja Piritica se sitúa en la Zona C', con caracteres de margen continental, con sedimentos que comienzan en el Silúrico-Devónico y se prolongan hasta el Westphaliense, con un importante volcanismo de la serie espilita-queratófido, del Carbonífero Inferior (Tournaisiense-Viseiense Inferior), acompañado de depósitos de sulfuros masivos y de manganeso, y con un metamorfismo de bajo grado, epizonal, facies de los esquistos verdes.

Esta provincia metalogénica está limitada al Norte por el Geoanticlinal de Evora-Beja-Aracena, constituido por sedimentos fuertemente metamorfizados que van desde el Precámbrico Superior al Paleozoico Superior; al Este y Oeste por una cobertura de sedimentos recientes (Terciario-Cuaternario) de las cuencas del Guadalquivir y Sado; y al Sur por sedimentos secundarios y terciarios.

Entre el Geoanticlinal Evora-Beja-Aracena y la Faja Piritica se encuentra el cabalgamiento de Beja o Ferreira Ficalho, que se sigue desde Portugal hasta España, donde se pierde. Este cabalgamiento podría corresponder al accidente de primer orden que cita H. J. Mac Gillavry (1961) como separador de esta zona

DIVISION EN ZONAS DEL MACIZO HESPERICO DE LA PENINSULA IBERICA

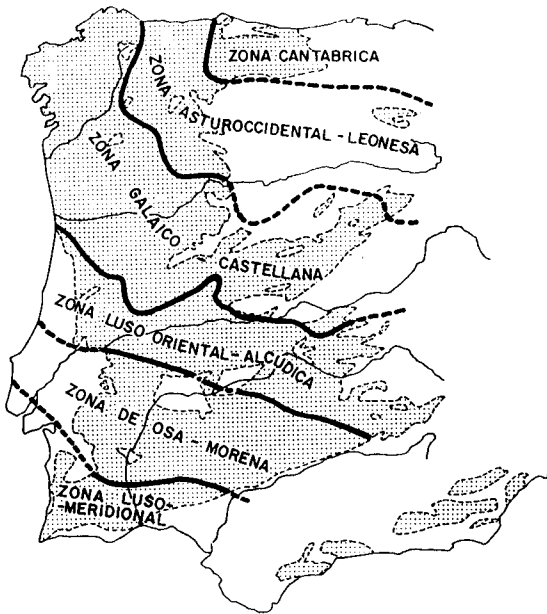


Fig. 3.1.—Según F. Lotze (1945).

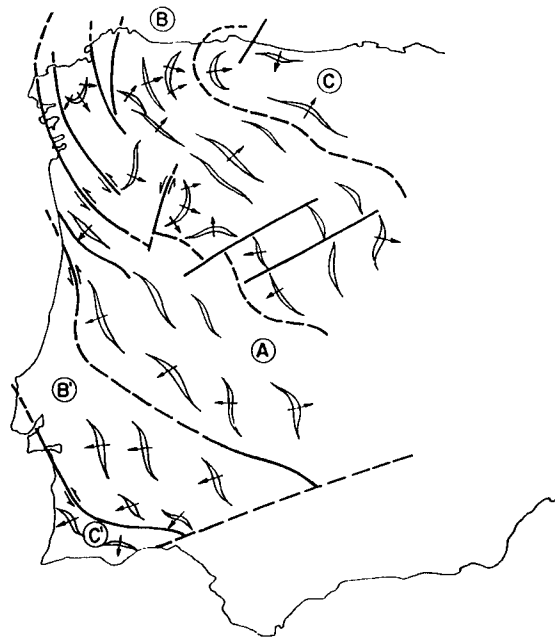


Fig. 3.2.—Según J. P. Bard *et al.* (1973).

y, geográficamente, corresponde bien con la falla transcurrente que citan J. P. Bard *et al.* (1973) como separación de las zonas C' y B'.

En cuanto a yacimientos, las minas más importantes son, de Este a Oeste: Aznalcóllar, Río Tinto, Sotiel, La Zarza y Tharsis, en España, y Neves-Corvo, Aljustrel y Lousal, en Portugal.

3.2. LITOESTRATIGRAFIA

La división litoestratigráfica del Paleozoico de la Faja Piritica más seguida es la publicada por L. J. G. Schermerhorn (1971), que se reproduce en el cuadro 3.1. Las posteriores de M. Lecolle (1972), G. K. Strauss y J. Madel (1974), etc., profundizan, subdividen y relacionan estratigráficamente los niveles litológicos de las tres grandes grupos de L. J. G. Schermerhorn.

Prácticamente, cualquier estudio actual tiende a encajar, en el esquema de estos autores, las distintas formaciones existentes en la zona de trabajo, modificando la columna estratigráfica en función de las características particulares de la misma.

El más reciente del IGME (1982) intenta conjugar todas las características litoestratigráficas de la Faja Piritica, para ofrecer una columna general utilizable en toda la zona española. Sin embargo, la simplificación de las series, en unos casos, y la generalización en otros no permiten su utilización en este trabajo de carácter fundamentalmente minero. Ello ha obligado a la confección de una columna específica para la Reserva, basada fundamentalmente en las anteriormente citadas, en las elaboradas por las empresas y en estudios del equipo ejecutor de este proyecto (Fig. 3.3).

A lo largo de los últimos tiempos los conceptos litoestratigráficos y geológico-mineros de la Faja Piritica han evolucionado en función del grado de conocimiento que se iba adquiriendo sobre esta provincia metalogénica.

En 1961, H. J. Mac Gillavry introduce las designaciones litoestratigráficas de Pomarão y Mértola.

G. K. Strauss (1965/70) divide el Paleozoico de los alrededores de la mina Lousal, en «Serie Corona», «Complejo de Lousal», y Culm, a los que respectivamente atribuía unas edades de Silúrico Medio a Superior, Devónico Superior y Viseense.

T. Febrel (1966/68), en las áreas mineras de Tharsis y Sotiel, diferencia una «formación prevolcánica» que incluía los depósitos de pirita, y una «formación volcánica», del Devónico y Carbonífero Inferior, respectivamente.

F. Rambaud (1969), en el área de Río Tinto, distinguía el Devónico, Niveles Volcánicos (de edad Devónico Superior-Carbonífero Inferior) y el Carbonífero.

H. J. Mac Gillavry (1961), apoyándose en los datos cartográficos de detalle del Sur de Portugal, incluía la presencia del Tournaisiense en el Carbonífero. Esto era contrario a lo postulado por la totalidad de los autores anteriores, y también de algunos posteriores que negaban la deposición del Tournaisiense, debido a una regresión o bien al efecto de la orogenia.

Respecto a los depósitos de sulfuros masivos, es evidente que se distribuyen según tres bandas o alineaciones de dirección Oeste Noroeste-Este Sudeste, de acuerdo con una análoga disposición del Complejo Volcánico Sedimentario.

CUADRO 3.1

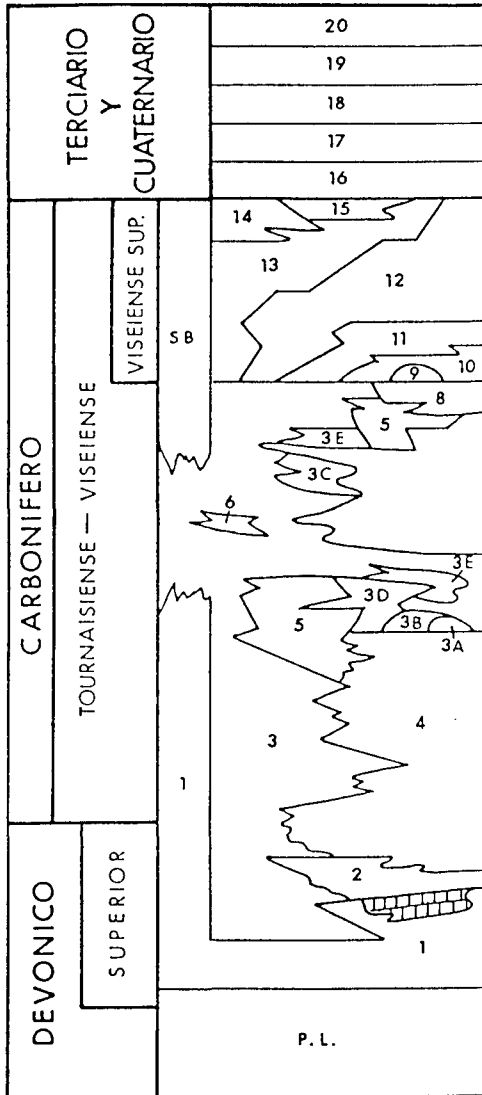
	EDAD	GRUPO	LITOLOGIAS
C A R B O N I F E R O	Westfaliense Viseense Sup.	Culm	Fase principal de plegamiento. Pizarras y grauwacas Escasos conglomerados
	CONCORDANCIA		
D E V O N I C O	Viseense Inf. Tournaisiense	Complejo Volcánico Silicioso	Varios tipos de pizarras y escasas calizas y tufitas, grauwacas, areniscas y cuarcitas. Rocas félsicas submarinas, principalmente piroclásticas. Rocas máficas, lavas, piroclásticas y sills diabásicos. Jaspes. Sulfuros masivos y mineralizaciones de manganeso.
	CONCORDANCIA		
	Fameniense	P-Q	Escasos lentejones calizos. Pizarras, areniscas y cuarcitas. Conglomerados cuarcíticos. Base desconocida.

LEYENDA

MINERALIZACIONES E INDICIOS

22	21
----	----

- 22 Oxidaciones, gossan, alteraciones hidrotermales
- 21 Sulfuros diseminados y/o masivos



- 20 Escombreras, mortongos y escorias. Sedimentos antrópicos
- 19 Aluviales, gravas, arenas y limos. Fluviales
- 18 Terraza de río
- 17 Rañas
- 16 Conglomerados, arenas y limos
- 15 Pizarras silíceas
- 14 Grauvacas con alterancias de pizarras arenosas
- 13 Pizarras con nódulos y lentejones de grauvacas
- 12 Pizarras arcillosas fosilíferas
- 5.B. Facies San Benito
- 11 V3. Aglomerados, brechas, tobas, tufitas y lavas ácidas y/o intermedias. Epiclastitas.
- 10 Pizarras púrpuras
- 9 Lentejones de jaspes ferruginosos y manganésíferos
- 8 Pizarras vinosas
- 7 V2. Aglomerados, brechas, tobas, tufitas y lavas ácidas y/o intermedias
- 6 Calizas
- 5 Volcanitas básicas (extrusivas e intrusivas)
- 4 V1. Aglomerados, brechas, tobas, tufitas y lavas ácidas
- 3E. Pizarras, tufitas y tobas
- 3D. Pizarras, areniscas
- 3C. Epiclastitas de grano grueso y medio
- 3B. Pizarras púrpuras
- 3A. Jaspes ferruginosos y manganésíferos
- 3 Pizarras y/o tobas, y/o tufitas, y/o cherts
- 2 Diabasas intrusivas. Sills. "Stocks"
- 1 Pizarras, areniscas y cuarcitas. Conglomerados, grauvacas. Nódulos calcáreos fosilíferos hacia el techo
- P.L. Formación de Pulo do Lobo

ROCAS FILONIANAS

Q	D
---	---

- Q Diques de cuarzo
- D Diques de diabasa

ROCAS PLUTONICAS

α	β	γ
----------	---------	----------

- α Granitos y/o granodioritas
- β Gabros
- γ Cuarzodioritas y/o tonalitas

Fig 3.3.—Columna litoestratigráfica adoptada.

Según G. K. Strauss *et al.* (1981), figura 3.4, la alineación meridional se caracteriza por una secuencia volcanosedimentaria con los tres episodios volcánicos unánimemente aceptados hoy en día; los dos primeros se encuentran coronados por lentejones o niveles de cherts hematíticos y manganesíferos, mientras que el último se encuentra a techo de las pizarras púrpuras. La banda central se caracteriza por la progresiva desaparición, bajo el Culm y hacia el Norte, del horizonte de pizarras púrpuras y del tercer volcanismo ácido, junto con el desarrollo gradual de «series intermedias» y la desaparición del primer volcanismo ácido. Finalmente, en la banda septentrional, esta evolución progresa y se acentúa, de forma que el primer volcanismo desaparece mientras que el segundo alcanza su máximo desarrollo y pasa gradualmente, hacia el Norte, a tener carácter dacítico.

3.2.1. Devónico

Los sedimentos más antiguos de la Reserva pertenecen al Devónico Superior (Fameniense).

La serie aflora en los núcleos de los anticlinales y está compuesta por pizarras, en su gran mayoría, y cuarcitas interestratificadas, cuya presencia aumenta hacia el techo. Las cuarcitas tienen forma lenticular y son de dimensiones muy variables. En el techo de esta formación se encuentran niveles calcáreos, calizas bioclásticas, que encierran la fauna utilizada para su datación.

Este grupo ha recibido varios nombres en la literatura de la Faja Piritica, según la localidad donde se ha estudiado.

- Serie Corona, por G. K. Strauss (1965) en la zona de Lousal (Portugal).
- Formación Cuarcítica de Gómez, por L. J. G. Schermerhorn y W. I. Stanton (1969) en Aljustrel (Portugal).
- Formación de Pernillas, por H. W. Pfefferkorn (1968), al Norte de Mértola (Portugal).
- Eira do García, por M. van den Boogaard (1967), en Pomarão (Portugal).
- Formación prevolcánica, por T. Febrel (1966/68), entre Tharsis y Calañas.
- Devónico, por F. Rambaud (1969), en Rio Tinto.

La litofacies es similar para toda la Faja Piritica, si bien los afloramientos calcáreos son más abundantes en España que en Portugal.

Estos afloramientos y su fauna fueron estudiados por vez primera en Pomarão, por P. Pruvost (1912), quien encontró «*Clymenia laevigata*» Munst, «*Phacops granulatum*» Munst y otros fósiles característicos del Fameniense, y posteriormente, por M. van den Boogaard (1963/67), quien, por su contenido en conodontos, los dató como Fameniense Medio o Superior.

En España, el primer autor que encontró fauna de esta edad fue J. Meseguer Pardo (1944), en unos nódulos existentes al Sur de Rio Tinto. Posteriormente J. Doetsch (1953) cita calizas en la zona de

Puebla de Guzmán, y R. Höllinguer (1959) afirma que los afloramientos situados a 1 km al SO de Cabezas del Pasto encierran conodontos de edad Fameniense Superior. Estos afloramientos fueron estudiados nuevamente, en 1975, por M. van den Boogaard que asignó la fauna a la parte media o superior de la «*Polygnathus Styriacus Zona*» (Fameniense).

Las pistas fósiles, Nereites, que fueron descritas por vez primera por Nery Delgado (1876), entre São Domingo y Aljustrel, aparecen tanto en las pizarras y cuarcitas devónicas como en las del C.V.S. Nery Delgado (1910) las consideró como verdaderos fósiles (anélidos) y J. Perdigo (1961) hizo un estudio exhaustivo de ellas, llegando a la conclusión de que se trataba de pistas de anélidos, gasterópodos y otros organismos sin valor estratigráfico.

3.2.1.1. Formación «Pulo do Lobo»

Se trata de una unidad con caracteres especiales que limita por el Norte con el Geoanticlinal de Beja-Aracena. Litológicamente está constituido por una secuencia de pizarras, cuarzovacas, algunas cuarcitas, grauvacas y rocas volcánicas, débilmente metamorfizadas y fuertemente deformadas.

Esta formación fue reconocida y separada como unidad independiente por Nery Delgado (1876-1905) atribuyéndole una edad Arcaica. G. Zbysewski *et al.* (1964) describieron parte de esta formación denominándola «*Complexo xistoso antigo*» y H. W. Pfefferkorn (1968) cartografió la formación y fue el que le dio el nombre actual.

Según D. Carvalho *et al.* (1976), la Formación Pulo do Lobo se encuentra en la base de la Formación Ribeira de Limas, de edad Devónico Superior a Tournaisiense, en paso transicional gradual, y, en consecuencia, los niveles más superiores, al menos, deben corresponder al Devónico Superior.

3.2.1.2. Cuarcitas

Su color varía entre el gris, gris rojizo y marrón pálido, según sea su contenido en óxidos de hierro. Las estructuras sedimentarias son escasas, a veces se pueden ver laminaciones cruzadas pero de pequeñas dimensiones.

En lámina delgada, no se observan orientaciones preferentes, la composición es muy homogénea y su contenido en cuarzo superior al 90 %, correspondiendo el resto a la matriz, accesorios, fragmentos de rocas y minerales opacos. Los granos de cuarzo, por lo general bien redondeados o subredondeados, se encuentran cementados por sílice, aunque en algunos los intersticios están ocupados por micas sericiticas o por minerales opacos. Los fragmentos de roca que aparecen son de «*chert*» y sus dimensiones y formas no difieren de las de los granos de cuarzo. Los feldespatos sólo se encuentran excepcionalmente. Como minerales accesorios más frecuentes hay que citar: circón, turmalina, esfena y rutilo, siendo óxidos de hierro, en su mayoría, los minerales opacos.

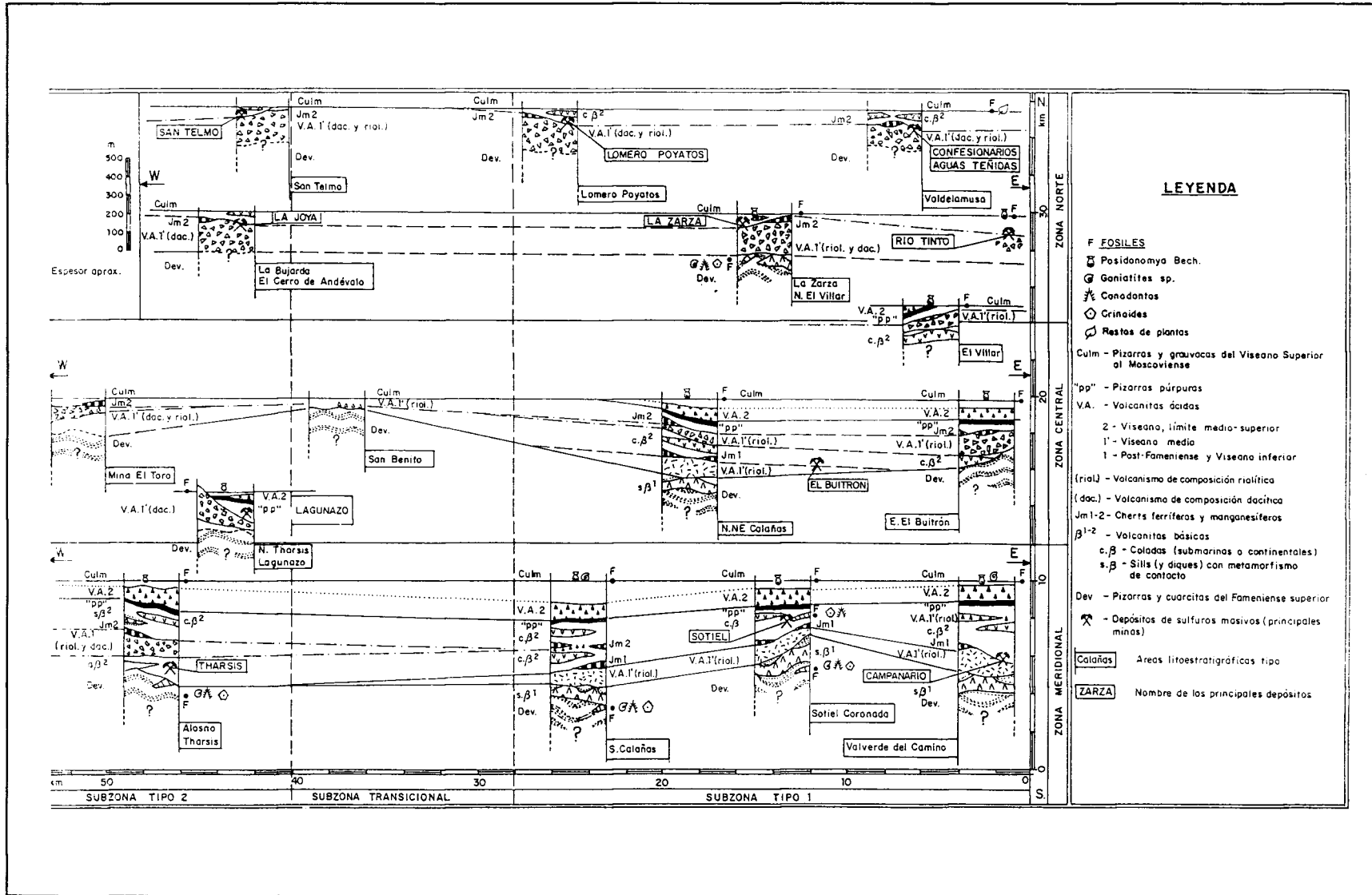


Fig. 3.4.—Secuencias litoestratigráficas y mineralizaciones en la provincia de Huelva (G. K. Strauss *et al.*, 1981).

3.2.1.3. Pizarras

Las pizarras presentan una acusada esquistosidad y son de color gris con variaciones hacia marrón.

En sección delgada se observa que los minerales de neofoliación son micas cristalizadas en los planos de foliación. Hay también pequeños granos de cuarzo y óxidos de hierro.

Los autores que han tratado las condiciones de formación de las pizarras se han dividido en dos grupos en torno a otras tantas hipótesis que son totalmente opuestas.

H. J. Mac Gillavry (1961), J. C. Perdigo (1961) y C. Teixeira (1954), entre otros, creen que la deposición se realizó en aguas someras, bien a causa del gran contenido de cuarzo en las arenas, bien por la existencia de pistas fósiles de anélidos (*Lophoctenium*). D. B. Ericson *et al.* (1952-1961), J. Hubert (1962) y A. Seilacher (1967) apoyan la hipótesis según la cual se depositaron en aguas profundas.

3.2.1.4. Calizas

Los niveles calizos se presentan en afloramientos discontinuos. En España los mejores ejemplos se hallan en el flanco Norte del anticlinal de Puebla de Guzmán, en la zona de Cabezas del Pasto, en Puebla de Guzmán (pueblo) y en la frontera con Portugal, en el paraje llamado «Castello de Malpique». En Portugal, los afloramientos de Pomarão son los más significativos.

La potencia es muy variable, desde centímetros a varias decenas de metros, y su extensión lateral máxima no pasa de 4 km, aunque no constituyen un horizonte continuo.

Se dan tres tipos de facies:

- Pizarras arcillosas con nódulos calizos de tamaño centimétrico a decimétrico. En estas pizarras, allí donde los nódulos se han disuelto, se da un tipo de afloramientos similar al de las «Kramenzel-Schiefer» del Devónico Superior del Oeste de Alemania. Este tipo de facies ha sido descrito en Portugal por M. van den Boogaard (1967), en la zona de Pomarão, y en España por E. Lopera (comunicación personal) al Nordeste de la Mina Isabel, en el flanco Norte del anticlinal de Puebla de Guzmán y al Oeste de la Mina de la La Zarza (Calañas); e inmediatamente al Norte de la Faja Pirítica, en el Georgiense del sinclinal de Cala (Huelva), por H. Schneider (1941) y F. Vázquez Guzmán (1968).
- Pizarras que engloban lentejones calizos de corrida métrica a decamétrica y potencia variable de hasta unos metros como máximo.
- Masas o paquetes de calizas. Este tipo de facies es muy local y únicamente se ha visto en un afloramiento situado al Oeste de Cabezas del Pasto, en donde existen masas de potencia desconocida, pero mayor de 10 m.

Las calizas engloban tanto macro como microfau-na, habiendo sido P. Pruvost (1912), como ya se ha señalado, el primero en datar, como Devónico

Superior, los afloramientos de Pomarão. Con posterioridad, M. van den Boogaard (1963/67) cita la presencia de ostrácodos, foraminíferos y conodontos en estos niveles, que le permitieron una más segura datación. Más tarde, M. van den Boogaard y L. J. G. Schermerhorn (1975) han descrito 39 especies de conodontos pertenecientes al Fameniense.

Las dataciones paleontológicas señalan una edad Devónico Superior para las facies calcárea y muy probablemente una edad Devónico Medio para la unidad de pizarras y cuarcitas, al menos en las zonas de núcleos anticlinales.

3.2.2. Carbonífero

3.2.2.1. Complejo volcánico sedimentario (C.V.S.)

La unidad estratigráfica suprayacente a los sedimentos devónicos, sobre los que descansa en aparente concordancia, es generalmente el C.V.S., denominación dada por G. K. Strauss (1965/70) a causa de las rocas que componen dicho grupo y el modo de su deposición, equivalente al «Complexo volcano-silicio-so» de Schermerhorn (1971). Comprende rocas volcánicas ácidas, básicas e intermedias interestratificadas con niveles sedimentarios.

Para P. Routhier *et al.* (1977) existe una discordancia regional entre el Devónico datado y la base de la serie volcánico-sedimentaria, al menos en la parte central de la provincia de Huelva. En las zonas donde el contacto entre ambas formaciones está ocupado por rocas básicas intrusivas la discordancia es más manifiesta que en aquellas otras en las que el Devónico pasa a facies epiclásticas finas o muy finas del C.V.S., ya que la análoga competencia de los sedimentos de una y otra formación conlleva una concordancia perfecta entre sustrato y cobertera. De cualquier forma, la existencia de facies con caracteres a la vez devónicos (cuarcitas claras de grano grueso), volcánicos (tobas y cineritas), y, a veces, incluso viseienses (grauvacas) ponen de manifiesto la existencia de paleorelieves al final del Devónico, según estos investigadores.

Desde el punto de vista minero el C.V.S. tiene la máxima importancia, pues es donde se encuentran los yacimientos estratiformes de pirita y manganeso.

Litológicamente es una unidad heterogénea, con rápidos cambios de facies, tanto en la horizontal como en la vertical.

Su potencia es extremadamente variable, reduciéndose apenas a unas decenas de metros cuando las rocas volcánicas están ausentes y alcanzando espesores superiores a los 500 m cuando el volcanismo se encuentra bien representado.

Ya que tanto el Devónico Superior como el Culm están bien datados, siendo el primero de edad Fameniense y el segundo de edad Viseiense Superior (parte inferior), cabe considerar, de una manera general, que el C.V.S. se depositó entre el Tournaisiense y la parte inferior del Viseiense Inferior. Sin embargo, localmente y de manera esporádica, existen manifestaciones de una cierta actividad volcánica en niveles superiores del Devónico.

Las características litológicas de las tres unidades que componen el C.V.S. se describen a continuación:

3.2.2.1.1. Rocas volcánicas ácidas

Las rocas volcánicas ácidas de la «Reserva Zona de Huelva», y también del conjunto de la Faja Piritica, pueden asignarse de una manera general a tres episodios fundamentales que originaron grandes acumulaciones de tobas, especialmente en las proximidades de los centros eruptivos, cuya potencia disminuye con la distancia a los mismos e interdigitan con materiales sedimentarios. El resultado es la existencia de niveles muy heterogéneos con rápidos cambios de facies, tanto en la horizontal como en la vertical.

Generalmente, el C.V.S. se inicia con un episodio volcánico ácido y/o intermedio, aunque localmente puede tener carácter básico. Es el denominado *Volcanismo Acido Primero* (V₁).

Las rocas correspondientes a este volcanismo son riolitas y dacitas, y, en menor proporción, traquitas y andesitas. Abundan los términos piroclásticos tanto masivos como bien estratificados e incluso con estratificación gradada.

Las tobas esquistas contienen frecuentemente pirita diseminada y, en ocasiones, se encuentran «gossanizadas», al igual que los niveles sedimentarios en los que se intercalan.

Este volcanismo es anterior en el tiempo a las calizas de la mina de Sotiel, datadas por M. van den Boogaard y L. J. G. Schermerhorn (1975), como del Viseiense Inferior, y espacialmente se encuentra bien desarrollado en la parte meridional de la Reserva. A él se asocian importantes yacimientos de sulfuros masivos, como los de Sotiel, Torerera, Campanario, Filón Norte, etc.

El segundo episodio volcánico o *Volcanismo Acido Segundo* (V₂) es posterior a la deposición de las calizas de Sotiel y fundamentalmente está constituido por dacitas e ignimbritas que ocupan la parte central y septentrional de la Reserva. Según P. Routhier *et al.* (1977), el episodio dacítico es posterior al ignimbrito, el cual ocupa extensas superficies del sector central; en la parte septentrional, donde adquiere un importante desarrollo, dichos autores lo relacionan con la aparición de macizos granodioríticos dada la probable naturaleza hipovolcánica de las grandes masas dacíticas.

La presencia de ignimbritas ha sido reconocida por diversos investigadores, si bien, en algunos casos, es difícil diferenciarlas de las riolitas. Así, F. Rambaud (1969) las cita en el área de Río Tinto, fundamentándose en las siguientes características: a) Extensión y volumen del orden de 120 km² y 10 km³, respectivamente. b) Frecuentes estructuras columnares. c) Bandeados de flujo. d) Corrosión de cuarzos y plagioclasas.

También se han cartografiado como tales, unos afloramientos con estructuras columnares al Este de la mina la Zarza y al Oeste de la zona minera de Tharsis (IGME 1975). Igualmente, P. Routhier *et al.* (1977) las han reconocido en una banda de 35 km de

largo por 5 km de ancho, que va desde el puente de Cinco Ojos hasta la mina de La Rica, así como en otros puntos de la Reserva.

Al volcanismo V₂ se asocian las más importantes mineralizaciones de la Reserva tanto de sulfuros masivos, Río Tinto, La Zarza, San Telmo, Herrerías, etc., como de manganeso, Soloviejo, Las Culebras, El Toro, etc.

El C.V.S. culmina con un tercer episodio volcánico (V₃) de carácter ácido y también intermedio e incluso básico, eminentemente piroclástico.

La naturaleza epiclástica y poligénica, al menos en parte, de este volcanismo permite suponer que se desarrolló en cuencas someras, lo que explicaría la ausencia o escasez de mineralizaciones o indicios en relación con el mismo.

Hasta muy recientemente se ha considerado que la actividad volcánica era sellada por los sedimentos carboníferos de facies Culm. Pero como se ha señalado en un estudio del IGME (1984), la existencia de niveles de tobas y aglomerados (epiclásticos con carácter turbidítico) sobre depósitos claramente marinos en facies Culm indica que éstos no constituyen un acontecimiento posterior y separado de los depósitos volcánicos, sino que, por el contrario, representan procesos simultáneos, coexistiendo en la cuenca, lo que implicaría que, a escala local y dada la distinta velocidad de sedimentación de ambos procesos, las facies Culm, consideradas como posteriores a las volcánicas, puedan ser equivalentes e incluso anteriores a ellas, como es el caso de la terminación oriental de la alineación volcánica del «aglomerado» de El Cerro de Andévalo.

La localización de los centros efusivos de rocas volcánicas así como la definición de su relación con las masas de sulfuros es difícil de establecer salvo en casos excepcionales como en Cerro Colorado. Por otra parte, como han señalado P. Routhier *et al.* (1977), es preciso no confundir la proximidad o relación de las mineralizaciones a los centros volcánicos con la existente, en muchos casos, respecto a las chimeneas o canales de surgencia de fluidos mineralizadores.

3.2.2.1.2. Rocas Básicas

Dentro del volcanismo básico se distinguen dos grandes grupos: rocas efusivas y rocas intrusivas.

Las rocas efusivas están compuestas en su mayor parte por lavas espiliticas con estructuras almohadilladas y por tobas submarinas de varios tipos.

Las tobas básicas, mucho menos frecuentes y abundantes que las ácidas, se diferencian claramente de éstas por su coloración verde mate, material fragmentario más fino y piroxeno. Suelen tener escasa potencia y se encuentran relacionadas con las coladas doleríticas y espiliticas.

Las rocas intrusivas están formadas por doleritas o diabasas albiticas en las que localmente y en forma de acumulados aparecen materiales ultrabásicos. Por la forma de intrusión se dividen en *stocks*, con contactos oblicuos a verticales con las estructuras generales, y *sills* diabásicos, más o menos concordantes con ellas.

Las diabasas intruyen principalmente a las rocas del C.V.S. pero también lo hacen en las unidades litológicas que forman la parte superior del Grupo Devónico. (Flancos Norte de los anticlinales de Puebla de Guzmán y de Valverde del Camino).

Hasta el momento sólo se han citado acumulados ultrabásicos, en el sector español de la Faja Piritica, al Sur de «*Filón Sur*», en Tharsis (G. K. Strauss y J. Madel, 1974) y posteriormente (IGME, 1976), en el anticlinal de Puebla de Guzmán, destacando el afloramiento situado en el paraje denominado «*Los Barros*», con una longitud de 1,2 km por 100 m de anchura aproximada.

La distribución espacial de las rocas básicas en la Faja Piritica fue descrita por L. J. G. Schermerhorn (1970), señalando que mientras en el Sur de Portugal las rocas básicas se encuentran cerca del techo del C.V.S., sobre rocas volcánicas félsicas y separadas del Culm por algunas decenas de metros de pizarras con jaspes, en la zona española las rocas básicas, aparecen generalmente, en los tramos inferiores del C.V.S. y están cubiertas a techo por rocas félsicas.

Para el ámbito de la Reserva, P. Routhier *et al.* (1977) constatan que las rocas básicas intercaladas entre el Devónico y el volcanismo ácido inicial V_1 ocupan una discordancia preexistente y producen metamorfismo de contacto (corneanas con cordierita y/o andalucita), y que, además, existen dos niveles de tales rocas, uno a techo y otro a muro del volcanismo segundo V_2 . Posteriormente, otros autores han reconocido igualmente estos dos últimos horizontes efusivos (IGME, 1982).

En cuanto a la edad en que se produjo la intrusión de estas rocas, G. K. Strauss (1965) afirma que, en la zona de Lousal, se debió realizar entre el Devónico Superior y la parte alta del Carbonífero Inferior y, que muy posiblemente, las intrusiones tuvieron lugar durante la fase Bretónica de la orogenia varisca. Para P. Routhier *et al.* (1977) las intrusiones tuvieron lugar con posterioridad al volcanismo V_1 y casi simultáneamente con la formación de las calizas de Sotiel (Viseense Inferior/Medio) pero con anterioridad al volcanismo V_2 .

3.2.2.1.3. Rocas sedimentarias

El resto de la columna estratigráfica del C.V.S. está constituida por sedimentos que se pueden dividir según su origen en:

- Productos volcano-sedimentarios que constituyen las tufitas y están formados por materiales volcánicos y detriticos terrigenos, aproximadamente en un 50 % cada uno de ellos.
- Sedimentos detriticos terrigenos, que dan lugar a la formación de pizarras, pizarras silíceas, cuarcitas, areniscas, escasas grauvacas y cuarzovacas.
- Sedimentos fisico-quimicos, constituidos por jaspes y «*cherts*».
- Sedimentos organógenos: escasos lentejones de calizas y «*cherts*».

Las *tufitas*, como se ha dicho, son rocas formadas por la sedimentación conjunta de materiales volcáni-

cos y terrigenos. Su depósito, por tanto, tiene relación espacial clara con los posibles centros efusivos volcánicos, ya que en estos predominan los productos piroclásticos y sólo al alejarnos de ellos es posible encontrar, de forma constante, una deposición terrigena. En el campo, es difícil diferenciar las tufitas de las pizarras, sobre todo cuando el contenido de material volcánico es bajo.

Las *pizarras* son con mucho las rocas sedimentarias más abundantes en el C.V.S. Sus colores varían desde el gris oscuro al negro, según el contenido en material carbonoso. Al alterarse, los colores pasan a pardos, rosáceos y rojos, por oxidación del material ferruginoso que contienen.

Las *pizarras silíceas* se caracterizan por la abundancia de cuarzo microcristalino. Este cuarzo puede tener dos orígenes: biogénico (radiolarios), o detritico.

Localmente las pizarras pueden englobar niveles finos y nódulos de manganeso y de pirita.

Hacia el techo del C.V.S. se encuentran unos niveles pizarrosos que destacan por sus colores vivos, que les dan nombre particular: son las *pizarras vinosas* y las *pizarras o esquistos hematíticos*. No existe unanimidad de criterio sobre si estos niveles constituyen o no horizontes guías. Para determinados investigadores, se repiten más de una vez en la columna estratigráfica de ciertas áreas, para otros (P. Routhier *et al.*, 1977) las pizarras púrpuras junto con el volcanismo ácido tercero constituyen una buena referencia litoestratigráfica para establecer correlaciones regionales y la paleografía.

Las *cuarcitas* y *areniscas* dentro del C.V.S. fueron descritas por primera vez por M. van den Boogaard (1967), en Pomarão, dentro de la «*formación Tourib*», habiendo sido cartografiadas, posteriormente, en otras zonas de Portugal y España.

El color de las cuarcitas varía de gris a marrón oscuro; presentan abundantes estructuras internas, tales como laminación, sedimentación gradada y entrecruzada. En el terreno afloran en capas decimétricas, pero con una extensión lateral superior a 50 m. Petrográficamente son cuarcitas impuras en su gran mayoría, pasando a areniscas cuarcíticas. El máximo porcentaje de cuarzo es del orden de 80-85 % y los granos muy finos (0,07 mm de diámetro).

Las *cuarzovacas*, que constituyen una unidad litológica descrita por L. J. G. Schermerhorn (1971), aparecen interestratificadas entre pizarras de la parte inferior del C.V.S. Litológicamente están formadas por granos finos de cuarzo, en su gran mayoría, y de pizarras con láminas de biotita detritica. No tienen feldespato ni fragmentos volcánicos.

Las *grauvacas* aparecen muy localmente y siempre próximas al techo del C.V.S. En Portugal, han sido cartografiadas al Sur de Grândola; L. J. G. Schermerhorn y W. I. Stanton (1969) las citan en la «*Formación de Vale de Agua*» al NE de Aljustrel; igualmente se cortaron en los sondeos de investigación de este distrito minero.

En España han sido citadas al Norte de «*Mina La Isabel*», en el flanco Norte del Anticlinal de Puebla de Guzmán, IGME (1976).

Los *jaspes* se encuentran en capas y/o lentejones interestratificados con las pizarras, siempre relacio-

nados con rocas volcánicas ácidas, en las que se localizan los yacimientos estratiformes de manganeso. Sus colores son muy variables, desde gris oscuro a blanquecino, rojizo (hematítico) y verde. Estratigráficamente se sitúan siempre a techo de los dos primeros volcanismos ácidos, asociados a pizarras de polvo de hematites a las que siguen tufitas verdes y violetas.

En ocasiones y localmente, junto con estas tufitas se depositan lavas básicas vacuolares correspondientes a las clasificadas por T. Febrel (1966) como espilitas con textura amigdaloides, con vesículas rellenas de calcita y clorita que tienen hasta varios milímetros de diámetro.

H. W. Pfefferkorn (1968) hizo un estudio comparativo de los jaspes, «*cherts*» y radiolaritas llegando a la conclusión de que los jaspes se formaban cuando las aguas marinas eran muy ricas en sílice. Si el contenido en SiO₂ era menor, precipitaban los «*cherts*».

Para D. Carvalho (1979), los jaspes posiblemente sean las rocas más características del Cinturón Piritico Ibérico. Las facies más estrechamente relacionadas con las mineralizaciones de sulfuros son aquellas de color gris claro y que contienen cristales de pirita diseminados. Descansan directamente sobre la pirita o en horizontes laterales equivalentes (G. K. Strauss & J. Madel, 1974), e incluso se intercalan entre la pirita masiva, como en la mina de Lomero-Poyatos.

Se admite, hoy en día, que los jaspes se forman durante las etapas tempranas de la actividad hidrotermal, en un ambiente predominantemente oxidante.

Las *radiolaritas*, formadas por la acumulación de esqueletos de Radiolarios, no llegan a ser típicas radiolaritas, ya que casi nunca sobrepasan el 80 % de contenido en restos esqueléticos. Sus colores más comunes son el gris y el negro, lo que indica un alto contenido en materia orgánica y que la diagénesis y la epigénesis se han realizado en medio reductor.

La presencia de lentejones calcáreos en el C.V.S. es muy restringida y los afloramientos son de pequeñas dimensiones. Han sido citados tanto en la zona española como portuguesa. Así, G. K. Strauss (1965) cita unos niveles siderítico-dolomíticos intercalados con la pirita y pizarras en la zona de Lousal. En España, estos lentejones, con fauna del Viseense Inferior, se han localizado intercalados con las masas de piritas (Sotiel). Los afloramientos calizos situados al Sur de la mina de Aznalcollar (Sevilla) pertenecen igualmente al Viseense Inferior.

3.2.2.2. Grupo Culm

Concordante con el C.V.S. se encuentra una monótona serie alternante de pizarras arcillosas y grauvacas, intruida por algunos pórfidos. En ciertas áreas, como el flanco Sur del anticlinal de Sanlúcar de Guadiana, en los tramos basales y próximos al volcanismo V₃ se intercalan algunos nódulos calcáreos; en otras áreas, el nivel inferior puede faltar, en cuyo caso las grauvacas se encuentran en contacto directo con el C.V.S.

Se trata de una secuencia con todas las características de las facies «*flysch*», con granoclasificación,

laminaciones cruzadas, huellas de carga, estructuras de deslizamiento, etc., que muestran el carácter turbidítico de la sucesión.

Dada la gran homogeneidad antes mencionada, ha habido autores que han intentado, aunque fuese a «*grosso modo*», una diferenciación dentro de la serie de pizarras y grauvacas.

Así M. van den Boogaard (1967) divide el Culm de la región de Pomarão, en dos unidades, con criterios puramente litológicos: a) Unidad filítica. b) Unidad grauváquica.

F. Rambaud (1969), en la región de Rio Tinto, hace una división del Culm, basándose en criterios paleontológicos y litológicos, en las siguientes unidades: Nivel de Posidonomia; nivel de Goniatites con nódulos; nivel de facies flysch de pizarras más grauvacas.

L. J. G. Schermerhorn y W. I. Stanton (1969) dividen el Culm de la región de Aljustrel de acuerdo con criterios litológicos según predominen pizarras sobre grauvacas o viceversa.

P. Routhier *et al.* (1977) reconocen dos grandes facies: una constituida por pizarras y grauvacas, y otra por pizarras y cuarcitas, con grauvacas accesorias. La primera con yacimientos fosilíferos de Posidonomias, Goniatites y plantas continentales, y la segunda azoica.

La E. N. Adaro, en la parte Sur de la Reserva, ha establecido cuatro unidades litológicas que de muro a techo son: Pizarras basales fosilíferas; pizarras con nódulos interstratificadas con lentejones de grauvacas; grauvacas y pizarras arenosas; pizarras silíceas.

Igualmente, en la zona portuguesa, J. T. Oliveira *et al.* (1979) han definido tres grandes unidades litoestratigráficas: a) La Formación Mértola, de pizarras y grauvacas en secuencias turbidíticas, inmediatamente a techo del C.V.S. del que le separan unos 20 m de pizarras negras. b) La Formación Mira, de carácter análogo a la anterior pero más distal. c) La Formación Brejeira, de carácter turbidítico como las anteriores, que en su parte inferior es más proximal que la Formación Mira, pero que en su techo, correspondiente al Westfaliense A, es muy distal.

Los afloramientos del Culm rodean a los anticlinales del Sub-Culm y cubren una amplia zona al Sur de la Faja Piritica.

En determinadas áreas, el Culm está constituido fundamentalmente por bancos de cuarcitas, areniscas y cuarzovacas, en los que se intercalan, a veces, lentejones de tobas y polvos volcánicos de escasa extensión y potencia, que en su conjunto puede alcanzar espesores superiores a 250 m. A techo se sitúa otra potente serie (200 m) de pizarras y bancos de grauvacas. Es la denominada facies San Benito aflorante en la parte Oeste-Noroeste de la Reserva.

La potencia del Culm no está determinada con exactitud pero se puede afirmar que, en la zona de Ajustrel, sobrepasa los tres mil metros (L. J. G. Schermerhorn y W. I. Stanton, 1969).

Las *grauvacas* son rocas detríticas, de color gris claro, intercaladas con pizarras con las que se relacionan por toda clase de tránsitos. Por disminución del material detrítico y aumento del intergranular pasan a pizarras arenosas y a pizarras arcillosas puras.

La mayor parte del material cristalino y pétreo de las grauvacas procede del C.V.S. y también de los sedimentos devónicos. Las formas angulosas de este material fragmentario indican el corto transporte sufrido desde la roca madre.

El cuarzo presenta las formas bipiramidales del cuarzo de riolitas y rocas afines. También existen, en el cuarzo detrítico de las grauvacas, las formas corroídas y las penetraciones de la pasta o cemento, tan frecuentes en el cuarzo de riolitas. El feldespato es un plagioclasa maclado análogo al de los fenocristales de riolitas, microlitos de espilitas y secciones tabulares de basaltos doleríticos, T. Febrel (1966).

Una particularidad petrológica de las grauvacas, puesta de manifiesto por diversos autores, H. F. W. Kleyn (1960), T. Febrel (1966), E. Frischmuth (1968) y H. W. Pfefferkorn (1968), es la casi total ausencia de feldespato potásico. Otros autores como Strauss (1965), M. van den Boogaard (1967) y F. Rambaud (1969) citan su presencia, pero siempre de forma esporádica.

Las *pizarras* se encuentran íntimamente relacionadas con las grauvacas por una serie ininterrumpida de tránsitos y tienen un color ligeramente más oscuro que éstas. Es frecuente la existencia de nódulos margosos de hasta 10 cm de diámetro, contenidos en la matriz arcillosa y alargados en el sentido de la estratificación, que al meteorizarse dan un aspecto oqueroso a las pizarras. La matriz fundamental es una trama sericitica con componentes detríticos aislados: granillos de cuarzo, láminas de mica de origen detrítico y material opaco, T. Febrel (1966).

La fauna de Posidonomia y Goniatites, que se encuentra en ellas, permite datar con precisión el Culm.

Los *paraconglomerados* tienen un desarrollo irregular tanto vertical como horizontalmente. Su composición es idéntica a la de las grauvacas y los cantos son los mismos que los fragmentos de roca encontrados en ella. Estos cantos están bien redondeados y tienen un alto índice de esfericidad. No aparecen en contacto unos con otros, ya que están separados por una matriz de grauvaca fina.

Las estructuras sedimentarias son abundantes, como ya se ha señalado, y están originadas por erosión de corrientes (*«flute casts»*), de objetos (*«groove casts»*) o por carga (*«load casts»*). Las estructuras internas son: grano-clasificación (*«graded bedding»*), laminaciones, *«ripple marks»*, *«convolute bedding»*. Es también frecuente la presencia de cantos blandos. Todas estas estructuras y su sucesión vertical coinciden con la secuencia establecida por Bouma (1962) para las facies turbidíticas clásicas.

Con algunas variaciones, la mayoría de los autores sitúan el área madre de los sedimentos en el Norte o Nordeste. La gran abundancia de grauvacas y el hecho de que éstas se encuentren bordeando el anticlinal de Beja-Aracena (zonas de Terena y Ficalho), indican la posibilidad de que aquellas provengan de la denudación de este macizo emergido durante el Devónico Superior.

La gran potencia del Culm en comparación con el C.V.S. indica una fuerte subsidencia de la cuenca de deposición junto con la elevación simultánea del área fuente. En la cuenca subsidente existe concordancia

entre el C.V.S. y el Culm; sin embargo, como las grauvacas engloban clastos del tipo de rocas existentes en el C.V.S. y de una edad presumiblemente sincrónica con éste, es lo más probable que, de acuerdo con H. J. Mac Gillavry (1961), la mayor parte de los sedimentos clásticos que engloban las grauvacas, al menos un 60 %, procedan de la denudación de estratos del C.V.S. emergidos, en un proceso de autodestructión.

La existencia de lamelibranquios, cefalópodos, huellas de reptación y tallos vegetales, ha permitido precisar la edad Viseense Superior para el Culm, en la zona española, donde no se conocen estratos más jóvenes. En la zona portuguesa se han datado sedimentos del Namuriense y Westfaliense Inferior (J. T. Oliveira, 1983).

3.2.2.3. Rocas graníticas

Hasta muy recientemente las rocas intrusivas graníticas existentes en la Faja Piritica han sido consideradas como post-tectónicas y sin relación alguna con las mineralizaciones de sulfuros masivos.

En 1987, W. Schutz *et al.* señalaron las estrechas relaciones existentes entre las dioritas, tonalitas y trondhjemitas que afloran al Norte de la Faja Piritica, y el origen comagmático de la asociación espilita-queratófido del Carbonífero Inferior. La inicial composición mineralógica y geoquímica de las plutonitas y volcanitas, sus manifestaciones de tipo ácido a básico, así como sus posiciones en los procesos orogénicos indican que constituyen los sucesivos productos de la fusión parcial de corteza oceánica en vías de subducción. Las intrusiones trondhjemíticas representan el estado inicial en la evolución orogénica-magmática.

Previamente, J. P. Bard y J. Fabries (1970) habían considerado el *«sill de Gil Márquez»* como anterior al último plegamiento, y E. Soler (1980) que las rocas graníticas de Campofrío eran pre-tectónicas y contemporáneas con las volcanitas de dicha región.

Por otra parte, más recientemente, según C. Hallsall (1988), hay evidencia geológica y geoquímica de que la secuencia volcánica de Río Tinto y las rocas intrusivas de composición diorítica-tonalítica, existentes al Norte y Este de dicha localidad, son comagmáticas. En consecuencia, ello implicaría una actividad intrusiva simultánea a la deposición de la mineralización y la posibilidad de una componente magmática en los fluidos mineralizadores; igualmente, la existencia de una fuente de calor que pudiera originar una celda convectiva, la cual actuara o formara parte del proceso de generación de los depósitos de sulfuros.

Las rocas intrusivas graníticas se encuentran, dentro de la Reserva Zona de Huelva, fundamentalmente en las zonas Norte y Este de la Hoja de Nerva con composiciones de ácidas a básicas, y en la mitad Norte de la Hoja de El Cerro de Andévalo, con composiciones tonalíticas y gabroideas.

3.2.3. Sedimentos postpaleozoicos

En la parte Sur de la Reserva, sobre los materiales paleozoicos, se encuentran, en discordancia angular y erosiva, sedimentos detríticos neógenos, que mar-

can el límite septentrional de la transgresión miocena que ocupó toda la cuenca del Guadalquivir.

La sedimentación miocena se inicia con una capa de calcarenitas muy rica en fragmentos fosilíferos, con seis metros de espesor medio, no siempre presente. Sobre este nivel se encuentra una serie limomargosa de color azulada, que hacia el techo pasa a tonalidades amarillentas al mismo tiempo que se enriquece en niveles arenosos, dentro ya del Plioceno.

Finalmente, en pequeñas áreas, más o menos aisladas, se han depositado arenas y aluviones cuaternarios, así como sedimentos antrópicos: escombreras, morrongos, escorias, etc.

3.3. TECTONICA

Las rocas de la Faja Pirítica muestran diverso grado de deformación con un estilo de plegamiento, desde isoclinal a concéntrico según la competencia de las rocas y el nivel estratigráfico que se considere, así como una fuerte pizarrosidad de plano axial, junto con fallas y cabalgamientos, todos ellos originados durante la Orogenia Hercínica.

La vergencia general de los pliegues es hacia el S-SW, lo que implica planos axiales buzando al Norte, por lo general con valores superiores a 50°, y que las estructuras anticlinales tengan su flanco Sur fallado o invertido, e incluso cabalgado.

Las megaestructuras están constituidas por anticlinales de Sub-Culm, cuya orientación hercínica va girando lentamente y pasa de prácticamente E-W, en la parte española, a NW-SE en la zona portuguesa. Estas megaestructuras no están constituidas por pliegues únicos, sino que hay una gran complicación de pliegues secundarios.

La intensidad del plegamiento aumenta en profundidad y disminuye de Norte a Sur; por ejemplo, en el Culm de Castro Marín (Portugal), las grauvacas no presentan esquistosidad y los pliegues son suaves.

En cuanto a las deformaciones que han actuado sobre los estratos paleozoicos de la Faja Pirítica, vista la concordancia entre las distintas unidades, desde el Devónico hasta los estratos paleozoicos más jóvenes, que en la parte portuguesa son de edad Westfaliense (L. J. G. Schermerhorn, 1971), parece lógico considerar una única fase principal de plegamiento, que afecta de forma uniforme a toda la columna estratigráfica, seguida por otra fase tectónica más joven que generó estructuras NE-SW.

La fase principal de plegamiento, que actuó en varios pulsos, produjo, en un primer estadio, pliegues abiertos acompañados localmente por cabalgamientos subhorizontales, que ponen los estratos del Sub-Culm sobre el Culm. Este primer pulso fue acompañado de una pizarrosidad poco penetrativa, que forma un bajo ángulo con el plano axial. Con posterioridad, un aumento de la intensidad del plegamiento dio lugar a la pizarrosidad o crucero más penetrativo y visible.

Una segunda fase causó micropliegues y un crucero de fractura, localmente asociados con un plegamiento transversal, a mayor escala, o «*buckling*», L. J. G. Schermerhorn (1971).

Según D. Carvalho *et al.* (1976) y J. B. Silva (1980, 1981), la complejidad tectónica de la Faja Pirítica se debe a la existencia de superficies de corrimiento que muestran relaciones variables con el plegamiento regional, distinguiendo las siguientes estructuras:

- Corrimientos sinsedimentarios, como en Pero da Vinha-Biguina, puestos de manifiesto por la existencia de un olistostroma en el techo de las turbiditas del Culm.
- Corrimientos deformados por pliegues ligados a la pizarrosidad regional, pero en los que existen pliegues anteriores a la pizarrosidad del alóctono (parte frontal del cabalgamiento de Mértola).
- Cabalgamientos deformados por pliegues ligados a la pizarrosidad regional y con una pizarrosidad del alóctono anterior al cabalgamiento (cabalgamientos de Galé y Vale de Évora).

La variación en las relaciones corrimiento-plegamiento pueden explicarse mediante el modelo «*thin skinned*», en el que las relaciones varían según el nivel estructural considerado: a) En una primera etapa, se produciría una deformación interna del alóctono que cabalgaría sobre el autóctono prácticamente sin deformar. En función del nivel estructural se tendría: deformación interna nula cerca de la superficie; pliegues concéntricos sin pizarrosidad y pliegues concéntricos atenuados o similares con pizarrosidad de plano axial (S_{1a}) buzando fuertemente hacia el Nordeste y que tiende a la horizontalidad cerca del plano de cabalgamiento que funciona como una zona de cizalla dúctil, J. B. Silva (1980, 1981). b) En una segunda etapa, con el emplazamiento del siguiente cabalgamiento bajo el primero, el plano de éste es plegado con un crucero de plano axial (S_{1b}) en el autóctono, afectado concomitantemente por la primera deformación penetrativa. Según el nivel estructural, se tendría: en el alóctono más superficial, S_{1b} es el único crucero visible, común con el del autóctono; en un nivel intermedio, los pliegues concéntricos son achatados por la generación del crucero S_{1b} ; en los niveles más profundos el crucero regional es $S_{1(a+b)}$, si S_{1a} y S_{1b} son subparalelos, o S_{1b} riza a S_{1a} . Este modelo es similar al propuesto por L. J. G. Schermerhorn y W. I. Stanton (1969) para el cabalgamiento de Aljustrel, si bien difiere en su interpretación.

El desplazamiento a lo largo de los planos de corrimiento puede alcanzar unos 20 km, si se tiene en cuenta el replegamiento posterior. En la etapa final de la evolución se producen fallas inversas de gran ángulo, subparalelas a S_{1b} , que pueden provocar el cabalgamiento del alóctono por el autóctono. Estas fallas inversas pueden ser la manifestación en superficie de planos de corrimiento en profundidad.

Generalmente en los estratos del Culm sólo se observa una pizarrosidad pero localmente es visible una segunda que forma ángulo con la primera.

La existencia de varios cruceros o pizarrosidades, producidas por distintas fases de deformación, ha sido tratada por diversos autores. Así H. F. W. Kleyn (1960) en la zona del anticlinal Cercal-Odemira reconoce pizarrosidades deformadas por una fase posterior más amplia. Según dicho autor las fases de deformación son coaxiales, por lo que sólo se trataría de una única fase con distintos pulsos de acción. H. W. Pfefferkorn (1968) distingue, en la zona de Lousal,

dos fases de plegamiento, cada una con su esquistosidad asociada, originando la primera estructuras con direcciones hercínicas N 150°, mientras que la segunda, más joven, origina pliegues transversos de dirección NE-SW. Posteriormente, hay otro pulso tectónico que deforma a su vez a la esquistosidad generada por el segundo plegamiento. T. Febrel (1965, 1966) en sus estudios de la zona de Calañas distingue asimismo dos fases de plegamiento cruzado con sus respectivas pizarrosidades, deformadas ambas por otra fase tardía. M. Lecolle (1970) en la zona de Calañas distingue hasta cuatro fases distintas, la última de ellas asociada al origen de las fallas de desgarre.

Según G. F. Borradaile (1978) y A. Ribeiro *et al.* (1980) la pizarrosidad regional S_{1b} intersecciona a los pliegues. La pizarrosidad es, en determinados dominios, el plano axial de pliegues, pero en otros los corta oblicuamente, ya que existe una componente de cizallamiento siniestral que se suma a la compresión perpendicular al plano axial de pliegues y que se manifiesta por la disposición «*en escalón*» de los pliegues mayores de la Faja Pirítica. Esta intersección aumenta con la profundidad, lo cual indica que la sedimentación es sintectónica, como es bien patente por el carácter flyschoides de los sedimentos del Culm. Todas estas características pueden darse en un proceso casi continuo desde la sedimentación a la deformación de la roca dura pasando por deslizamiento y deformación sinsedimentaria de la roca blanda o no compactada.

La tectónica de fractura está ampliamente desarrollada en forma de fallas directas o inversas, transversales a las estructuras o en su misma dirección.

Destacan las fallas de desgarre, unas con desplazamiento dextral y otras de desplazamiento siniestral. La más importante es la gran falla de Messejana o Plasencia, que, con un recorrido de 500 km y una dirección NE-SW, se extiende desde la provincia de Avila hasta el Océano Atlántico (Aljezur). El movimiento en la falla es siniestral y su desplazamiento variable entre 1 y 3 km. En esta falla se emplazó un sistema de diques de magma toleítico, el «*Dolerito de Messejana*», durante una etapa de dilatación posthercínica (L. J. G. Schermerhorn & W. I. Stanton, 1969).

La mayoría de los autores sitúan la fase principal de plegamiento en el Westfaliense-Estefaniense co-

rrespondiente a la fase Astúrica (C. Teixeira, 1954; G. K. Strauss, 1965; T. Febrel, 1966; E. Frischmuth, 1968; H. W. Pfefferkorn, 1968 y F. Rambaud, 1969).

3.4. METAMORFISMO

Los materiales paleozoicos del Cinturón Pirítico han sufrido metamorfismos regional, dinámico, y localmente de contacto.

El metamorfismo de contacto se relaciona con el emplazamiento de las rocas intrusivas básicas y las rocas eruptivas graníticas.

El metamorfismo de las intrusiones básicas, descrito por H. F. W. Kley (1960) y M. van den Boogaard (1967), se desarrolla en una banda estrecha, no superior a los 10 metros, en los sedimentos encajantes.

A pesar de constituir afloramientos más extensos que los de las intrusiones básicas, las rocas graníticas producen aureolas de metamorfismo de menores dimensiones.

El metamorfismo regional es de bajo grado, facies inferior de los esquistos verdes a la facies de la Pumpellyta (Prehnita-Pumpellyta + Pumpellyta-Actinolita), habiendo sido M. van den Boogaard (1967) quien primero citó la facies Prehnita-Pumpellyta, en la zona de Pomarão (Portugal). Este metamorfismo se produjo conjunta y posteriormente al desarrollo de la fase orogénica que plegó la Faja Pirítica en el Westfaliense Medio.

La Pumpellyta se desarrolla en las rocas máficas, tanto intrusivas como efusivas, y en las de composición intermedia, cuyos afloramientos no son continuos, por lo que el trazado de la isograda es, en todo caso, aproximado.

Por datos deducidos de los diagramas experimentales, la facies de la Pumpellyta se produjo en un punto en que el gradiente geotérmico era aproximadamente de 40 °C/km. Las presiones de carga, suponiendo una columna de sedimentos con un mínimo de 6 km y un máximo de 15 km, serían del orden de 1,5 a 4 kb, L. J. G. Schermerhorn (1975).

Además de los minerales de metamorfismo ya citados, aparecen actinolita, tremolita, algunos piroxenos metamórficos y gran cantidad de epidota y calcita.

4. SITUACION ACTUAL DE LA INVESTIGACION GEOFISICA

4.1. METODOLOGIAS APLICADAS

Frente a las técnicas de investigación geofísica, los depósitos de sulfuros polimetálicos del Suroeste de la Península se caracterizan por: 1) elevada conductividad eléctrica, 2) alta densidad, y 3) débil susceptibilidad magnética, en relación siempre con las rocas de su entorno geológico.

La resistividad eléctrica de sulfuros y rocas se incluye en la figura 4.1, mutuamente correlacionadas. Como puede observarse, el contraste entre piritita masiva y rocas encajantes supera normalmente el factor 100 excepto para pizarras grafitosas en las que dicho factor se reduce a 10-50 frente a pirititas y aún más frente a blenda + piritita + galena, sobre todo cuando predomina el primero de estos metales, circunstancia sólo excepcional dentro de la Faja Piritica. Estos valores se han obtenido midiendo sobre afloramientos homogéneos, tanto en superficie como en el interior de minas subterráneas y explotaciones a cielo abierto, y representan resultados de una población superior a 50 determinaciones en cada unidad litológica o mineralógica distribuida a lo largo y ancho de toda la provincia metalífera.

La figura 4.2 muestra los histogramas y valores medios de las densidades de pizarras y grauvacas de Culm, por un lado; pizarras + tufitas + tobas + lavas del Complejo Volcánico Sedimentario por el otro; y finalmente sulfuros masivos. Reflejan mediciones en laboratorio de muestras representativas en número superior a 75 en el Culm, y a 400 tanto de sulfuros como de las restantes unidades rocosas que conforman el Complejo Volcánico Sedimentario. Esta figura pone claramente de manifiesto el acusado contraste entre la densidad de sulfuros y la de las restantes litologías de la región.

Las mineralizaciones diseminadas tipo «*stockwork*» son eléctricamente conductoras cuando la mineralización forma una red de vetillas espacialmente continua, y resistivas cuando se trata de diseminaciones aisladas, en cuyo caso son fácilmente polarizables si se someten a la acción de un campo eléctrico exterior.

Respecto a la densidad, estas «*menas mezcladas*» tienen un valor intermedio entre las de sus componentes puros, dado por la expresión:

$$d_r = d_s v_s + d_m (1 - v_s) = \Delta d v_s + d_m$$

siendo:

- d_r : densidad de la roca resultante.
- d_s : densidad de los sulfuros.
- v_s : volumen de los sulfuros.
- d_m : densidad de la matriz.
- Δd : $d_s - d_m$ = contraste de densidad.

Teniendo en cuenta los valores medios de la figura 4.2, la variación de la densidad de mineralizaciones diseminadas del Cinturón Piritico sigue la expresión:

$$d_r = 1,79 v_s + 2,75$$

que es la ecuación de la recta de la figura 4.3, en la que conocido el porcentaje de sulfuros de un yacimiento se puede determinar su densidad o bien, procediendo a la inversa, conocida la densidad de muestras representativas de mineralizaciones diseminadas se puede establecer el porcentaje en sulfuros del yacimiento.

Como resumen, en la figura 4.4, se expone la columna litofísica, con densidades y resistividades, exclusivamente, que pone de manifiesto el comportamiento, frente a estos dos parámetros, de las diferentes unidades litoestratigráficas, destacando claramente la doble propiedad conductora y densa de las masas de sulfuros. No se incluye la susceptibilidad magnética debido al reducido número de observaciones realizadas hasta la fecha, laguna que desde ahora recomendamos cubrir.

En función de los resultados de las mediciones paramétricas precedentes, los yacimientos de sulfuros producen simultáneamente un mínimo de resistividad o una anomalía electromagnética, y un máximo gravimétrico. Por esto, la coincidencia espacial de ambas anomalías, acorde con buzamientos locales, es condición necesaria para atribuir naturaleza «*metálica*» al cuerpo anómalo, frente a las anomalías «*sin metal*» que vienen caracterizadas por la presencia de sólo un mínimo eléctrico («*anomalía grafitosa*») o un máximo de gravedad («*anomalía litológica*» y/o «*litoestructura*»). En consecuencia, son aplicables en la investigación de la Faja Piritica, los métodos eléctricos y electromagnéticos «*s.l.*», y el método gravimétrico (F. Fernández Alonso, 1984).

Respecto al método magnético, la presencia de pirrotina como mineral minoritario más común, hace inciertos los resultados de su aplicación debido a las peculiaridades de este mineral en relación con su susceptibilidad magnética. En los ensayos terrestres sobre depósitos conocidos, anteriores a 1982, se constata que no hay anomalías apreciables, excepto en Castillo de Las Guardas, Cueva de la Mora y Concepción donde está comprobada la presencia de pequeños lentejones con magnetita asociados a la masa de sulfuros, que constituye realmente el objetivo minero. En línea con lo expuesto, la diferencia de tamaños entre uno y otro tipo de mineralizaciones, observada en los tres yacimientos citados, obliga a diseñar una red de observaciones apretada, a utilizar instrumentos de medida muy sensibles y a aplicar sistemáticas de trabajo muy precisas, con el fin de

RESISTIVIDAD DE SULFUROS Y ROCAS DE LA FAJA PIRITICA Y SU RELACION MUTUA

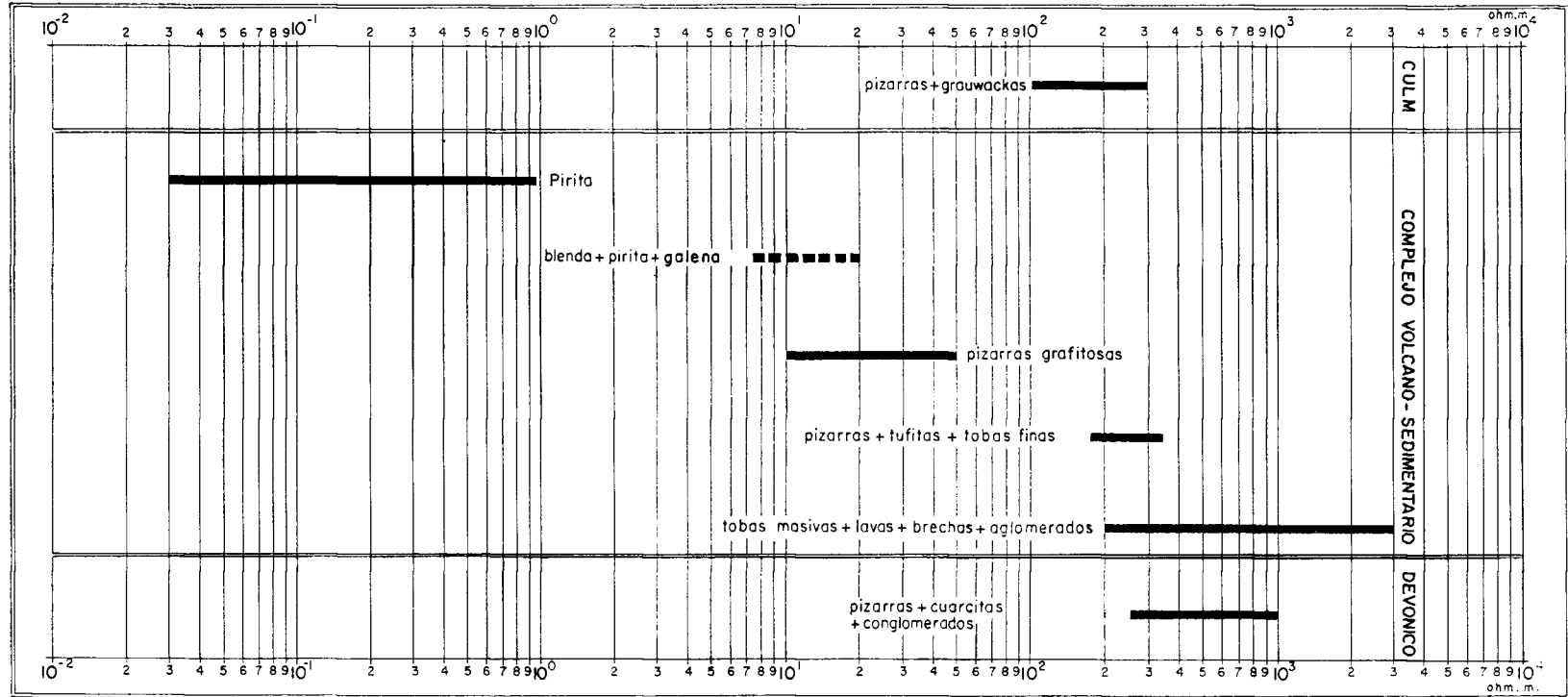


Fig. 4.1.

DENSIDADES DE ROCAS Y SULFUROS DE LA FAJA PIRITICA Y SU RELACION MUTUA

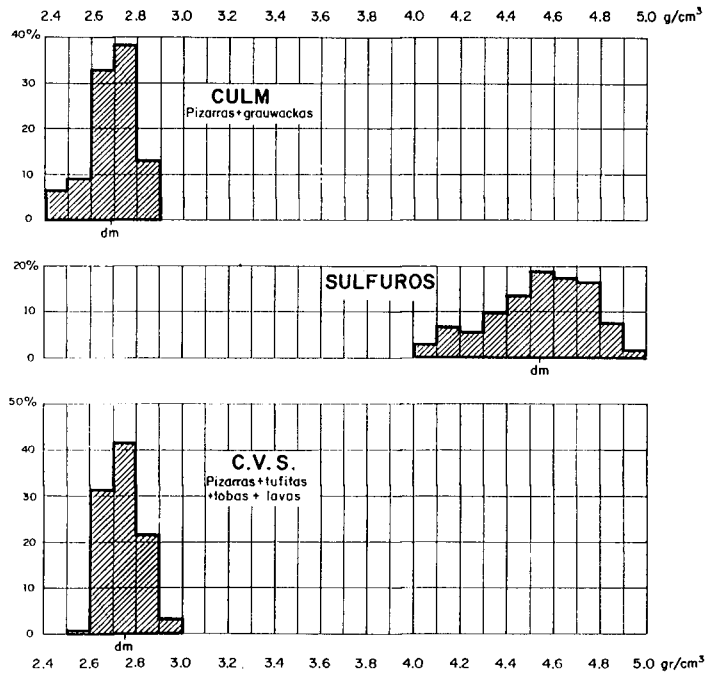


Fig. 4.2.

DENSIDAD DE YACIMIENTOS EN FUNCION DE SU CONTENIDO EN SULFUROS

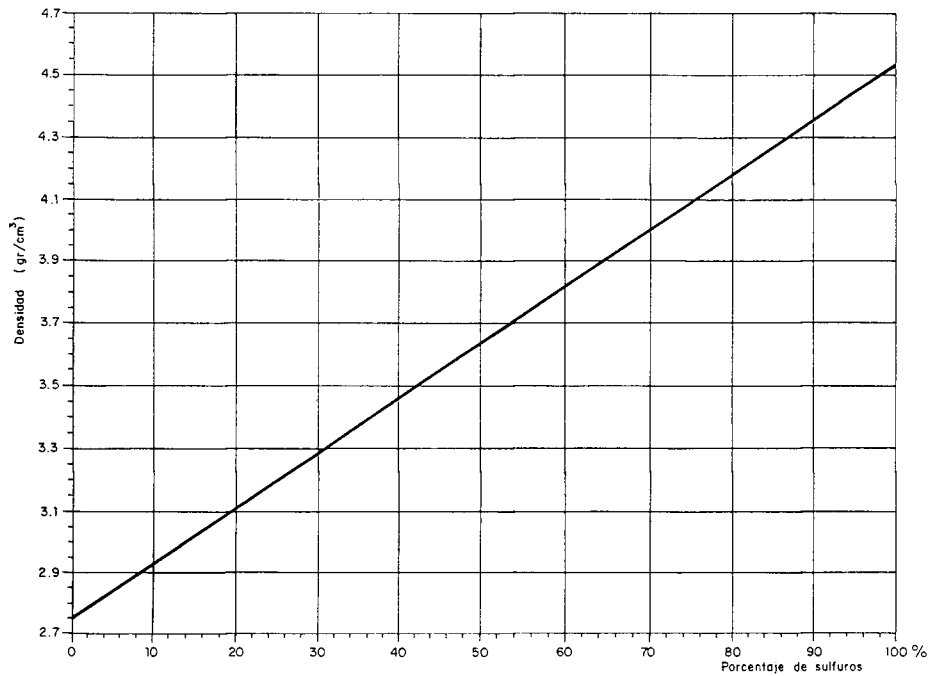


Fig. 4.3.

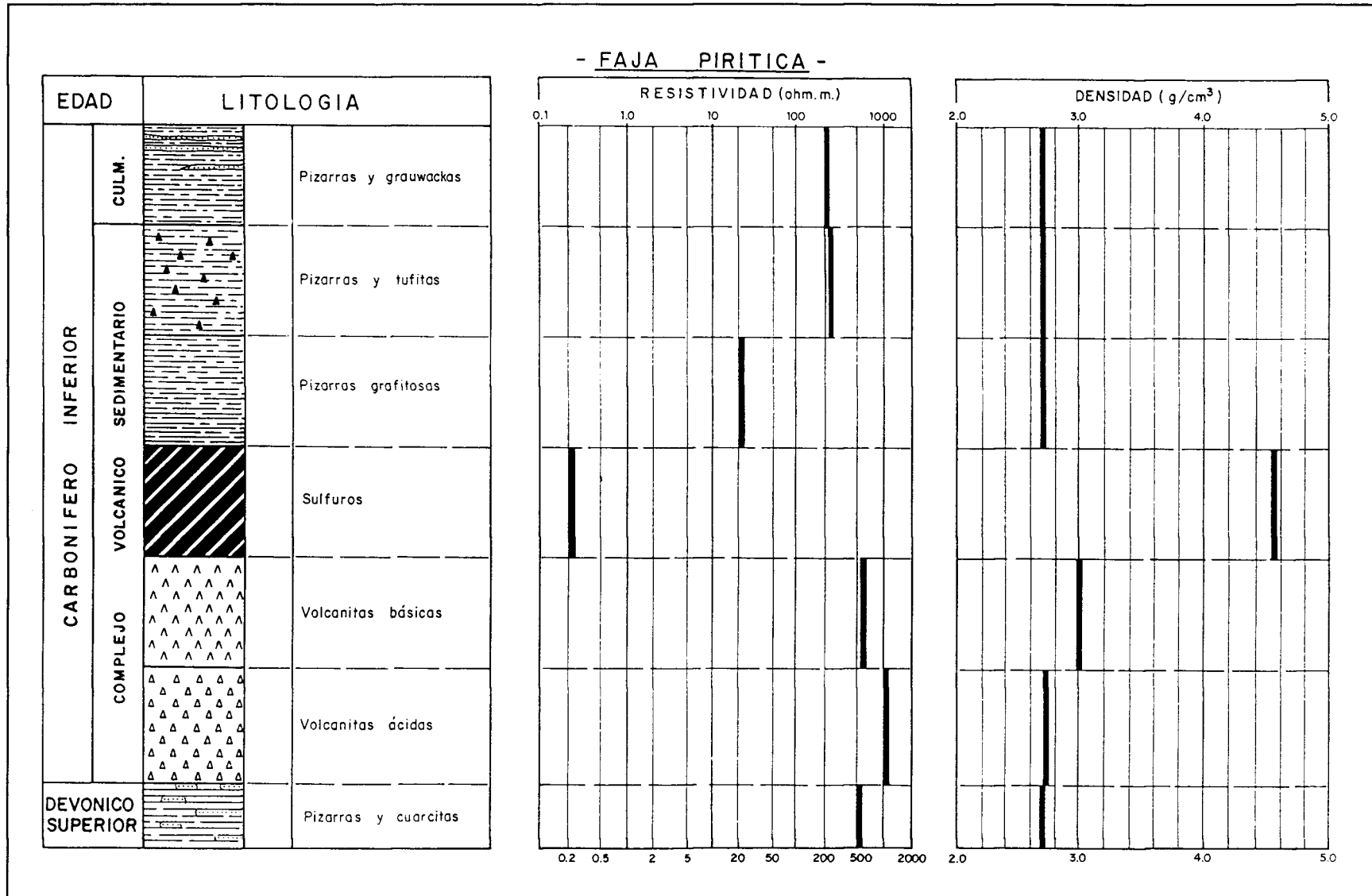


Fig. 4.4.—Columna litofísica.

detectar anomalías de pequeña intensidad o reducida amplitud, extremos que es posible no se hayan respetado, en los referidos ensayos, con suficiente rigor. No obstante los resultados negativos de las campañas tanto aeromagnéticas como pie a tierra realizadas sobre amplias zonas en el período 1982-1985, que se ajustan a la más pura ortodoxia de investigación magnética, confirman los ensayos efectuados con anterioridad y ponen de relieve la incapacidad del método para detectar la presencia de yacimientos de sulfuros en todo el ámbito de la Faja Piritica. Sobre este punto se volverá en los próximos capítulos.

El método magnético, sin embargo, es muy adecuado para cartografiar horizontes de volcanitas básicas, como se ha puesto de manifiesto a lo largo de esta campaña, y, en principio, puede ser una excelente herramienta para averiguar la presencia del C.V.S. oculto por sedimentos Culm o terciarios, y evaluar su profundidad.

Al igual que en las restantes provincias metalogénicas o distritos mineros, en la Faja Piritica los métodos geofísicos pueden aplicarse tanto en exploraciones regionales como en estudios de detalle, bien en la investigación de nuevos yacimientos o para evaluar el potencial minero de depósitos previamente confirmados con sondeos mecánicos o labores mineras.

En general, los métodos aeroportados pertenecen a la categoría de regionales, mientras que los métodos terrestres de malla apretada representan estudios de detalle minero. Entre estos últimos pueden darse situaciones híbridas cuando se trata de perfiles aislados de largo recorrido u observaciones puntuales de amplia o irregular malla, por lo que cabe una tercera clasificación que puede denominarse estudios de semidetalle.

4.2. DESCRIPCIÓN SOMERA DE LOS MÉTODOS: POSIBILIDADES Y LIMITACIONES

4.2.1. Método aeromagnético

Mide el campo magnético de la tierra por medio de un magnetómetro transportado por una aeronave (avión o helicóptero), y utiliza el contraste de susceptibilidad de las rocas para determinar la presencia en el subsuelo de objetivos mineros, litológicos o estructurales.

En la Faja Piritica el método aeromagnético tiene un carácter regional y su aplicación se reserva, sobre todo, a estudios estructurales. No obstante, en el período de tiempo que analizamos, el equipo de investigación de alguna de las empresas concesionarias especuló fuertemente con las posibilidades del método para la detección directa de masas de sulfuros.

En relación con la metodología, en la Reserva *Zona de Huelva* se ha empleado, como instrumento de medida, magnetómetros de protones Geométrics G-803, con 1 gamma de sensibilidad.

La separación media de líneas de vuelo y altura de la aeronave fueron 500 y 90 m, respectivamente, en un levantamiento realizado en toda la parte española del Cinturón Piritico, reducidas posteriormente a 200 y 30 m en bloques concretos. En el primer caso la

aeronave fue un avión y en el segundo un helicóptero.

También se ha empleado, como sistema de navegación, un avión que vuela a 120 m de altura sobre líneas separadas entre 100 y 500 m.

4.2.2. Métodos aeroelectromagnéticos

4.2.2.1. Dominio de frecuencias

En líneas generales, el método electromagnético, tanto aéreo como terrestre, en el dominio de frecuencias, se caracteriza por energizar el subsuelo mediante el campo magnético creado por el paso de una corriente alterna a través de una bobina o bucle (transmisor), cuya respuesta se recoge en otra bobina (receptor).

En las distintas aplicaciones del método, o sistemas comerciales la casuística es muy variada en función de:

1. Que el transmisor sea activo o pasivo (natural o artificial) fijo o móvil, para un receptor siempre activo que puede permanecer estático durante la investigación o por el contrario desplazarse a lo largo del perfil a estudiar.
2. Que transmisor y receptor estén o no unidos por un cable.
3. La posición mutua de transmisor y receptor: los bucles pueden disponerse con los ejes verticales u horizontales y los acoples pueden ser paralelos, ortogonales, máximo, mínimo, etc.
4. Las frecuencias empleadas y el número de ellas (siempre entre 0,1 y 3×10^4 Hz).
5. Que los métodos aeroportados utilicen transmisor-receptor rígido, o bien receptor colgado («pájaro») de la aeronave, en cuyo fuselaje va alojado el transmisor.

El equipo electromagnético aéreo empleado en la Faja Piritica en el dominio de frecuencias, ha sido el Geonics EM 33-3 transportado en helicóptero a una altura de 30 m, con líneas de vuelo cada 200 m. Se suele utilizar un sistema transmisor-receptor rígido de unos 6 m de longitud, con frecuencia de 736 Hz (puede elegirse entre 400 y 4.000 Hz), registrando las componentes en fase y en cuadratura del campo resultante. Este dispositivo tiene un ruido inferior a 0,5 ppm y, en las frecuencias más bajas de su gama de trabajo, la incidencia del recubrimiento es pequeña.

4.2.2.2. Dominio de tiempos

En este método, el transmisor crea un «impulso» de corriente eléctrica cuya brusca interrupción induce corrientes de remolino en la superficie de un eventual conductor del subsuelo, que se difunden en él disipándose gradualmente. En un buen conductor, el período de tiempo empleado por la corriente inducida para disiparse es más largo que en conductores pobres. El campo secundario tiene la misma forma que el flujo de corriente y después de un corto período de tiempo, que depende de la geometría y propie-

dades físicas del conductor, se anula. Sincronizando transmisor y receptor es posible medir el campo magnético secundario entre 0,1 milisegundo y unos 100 milisegundos después de interrumpida la corriente, midiendo en varios intervalos de tiempo su intensidad residual.

La información obtenida de estas curvas transitorias es equivalente a la suministrada por un sistema multifrecuencial.

Los métodos transitorios, de origen ruso, se han desarrollado en Occidente en los últimos años alcanzando gran popularidad, sobre todo en su versión terrestre, debido a la relativamente elevada profundidad de investigación que alcanzan, a su capacidad para diferenciar la calidad de los distintos conductores del subsuelo y a carecer de sensibilidad frente a los relieves topográficos, siempre en relación con los sistemas tradicionales de frecuencias.

La modalidad aeroportada en el dominio de tiempos se denomina INPUT y ha sido aplicada, en combinación con magnetometría. Se utilizó en esta campaña un equipo Barringer a bordo de un avión con el receptor remolcado.

Las características del vuelo y la distancia entre líneas son las mismas que para el levantamiento aeromagnético y se han registrado doce canales en otros tantos tiempos, distribuidos entre dos «impulsos» consecutivos de corriente.

4.2.3. Métodos eléctricos

Como fuente energizante se emplea una corriente eléctrica inyectada en el terreno mediante dos electrodos (A y B) puestos a tierra, y se mide el campo resultante con otros dos electrodos M y N, igualmente puestos a tierra. Este conjunto de electrodos se denomina tetrapolo (AMNB) o dipolo-dipolo (AB-MN), en función de la separación mutua de los electrodos de corriente y de potencial cuando los cuatro son activos, y trielectródico o polo-dipolo cuando uno de los de corriente es pasivo. La corriente enviada al terreno puede ser continua o alterna de baja frecuencia.

4.2.3.1. Calicatas eléctricas (C.E.)

Un dispositivo tetraelectródico o trielectródico rígido (manteniendo constante la separación interelectródica) se desplaza a lo largo de una alineación transversal a la dimensión mayor del objetivo minero o tectónico. La profundidad investigada, constante a lo largo del perfil, viene dada teóricamente por $AB/2$, y las anomalías se refieren a todo el bloque afectado por las mediciones. Para determinar si el cuerpo anómalo es superficial o profundo, se superponen al menos dos dispositivos electródicos de dimensiones una múltiplo de la otra (sistemas combinados).

El campo de aplicación de estos métodos se encuentra en medios con estratigrafía subvertical o vertical y, dentro de la Faja Pirítica, su objetivo es detectar conductores eléctricos que, pueden corresponder a sulfuros (anomalías «metálicas») o a pizarras grafitosas (anomalías «sin metal» o «grafitosas»).

4.2.3.2. Sondeos eléctricos verticales (S.E.V.)

Investigan cambios de resistividad horizontales o subhorizontales o profundidades sucesivamente crecientes. Para ello, los electrodos de corriente de un tetrapolo AMNB o, en su caso, el electrodo de corriente activo de un dispositivo trielectródico, se separan progresivamente del centro geométrico del dispositivo, que permanece fijo a lo largo de todo el sondeo y representa el punto investigado.

Se utilizan principalmente en medios con estratigrafía subhorizontal, y, dentro de la Faja Pirítica, su principal aplicación es estratigráfica. Solo en depósitos con buzamiento suave pueden utilizarse los S.E.V. para determinar la geometría del cuerpo mineralizado y en particular la morfología de su techo.

4.2.3.3. Polarización inducida (P.I.)

Si en un dispositivo electródico (dipolo-dipolo, tetrapolo, polo-dipolo, etc.) se interrumpe bruscamente la corriente, el voltaje recibido en los electrodos de potencial cae lentamente, siguiendo una función exponencial, y sólo transcurridos algunos segundos, o incluso hasta minutos, alcanza el valor cero.

Si en lugar de corriente continua, como en el caso anterior, se hace pasar por el circuito emisor una corriente alterna, la intensidad de este circuito y la tensión en él de potencial no se encuentran en fase y en consecuencia la resistividad aparente del subsuelo es función de la frecuencia, decreciendo al aumentar ésta.

Ambos mecanismos son dos expresiones del fenómeno de polarización inducida. El primero sucede en el «dominio de tiempos» y se determinan parámetros relacionados con la curva de decrecimiento del potencial residual. El segundo se produce en el «dominio de frecuencias» y mide la variación que experimenta la resistividad aparente con la frecuencia de la corriente aplicada.

El sistema de tiempos es actualmente el más utilizado y ha sido el empleado en la Faja Pirítica, por ser particularmente eficaz en la localización de mineralizaciones diseminadas.

4.2.4. Métodos electromagnéticos

4.2.4.1. Dominio de frecuencias

El fundamento de estos métodos y los sistemas prácticos en uso se han expuesto en el apartado 4.2.2.

En investigaciones pie a tierra, las frecuencias de trabajo oscilan entre 0,1 y 4×10^4 Hz y son tres las metodologías fundamentales de aplicación práctica según que las bobinas o bucles transmisor-receptor se dispongan verticales, horizontales o tipo Turam.

Las dos últimas metodologías, se han aplicado en las modalidades transmisor-receptor activos y móviles (Max-Min, Genie); transmisor pasivo artificial (VLF) y natural (magnetotelúrico), y transmisor activo fijo-receptor móvil (TURAM).

4.2.4.2. Dominio de tiempos

En las aplicaciones terrestres de esta nueva técnica electromagnética, cuyo fundamento se expone en el apartado 4.2.2, se puede emplear las configuraciones «bobinas horizontales» y «Turam» que en este caso sólo necesita una bobina como receptor.

Se han utilizado los equipos comerciales: EMP (Newmont), EM-37 (Geonics) y CRONE (ahora de Scintrex) en la exploración de la zona reservada de la Faja Piritica.

Los sistemas electromagnéticos en el dominio de frecuencia ven limitada su profundidad de investigación por el efecto «skin». En la figura 4.5, se incluye un ábaco con las limitaciones que este efecto supone en las distintas litologías de la Faja Piritica para las frecuencias de trabajo de los métodos aplicados, señalando dichos límites para las pizarras y grauwacas del Culm. Para otras litologías puede procederse de manera similar a partir del campo de variación de sus resistividades que se incluyen en la parte izquierda de la figura.

En los sistemas que trabajan en el dominio de tiempos el límite de profundidad viene condicionado por el efecto de canal («channeling effect») que se origina cuando un cuerpo relativamente conductor recubre un sustrato muy resistivo (por ejemplo, Culm sobre volcanitas en la Reserva).

4.2.5. Gravimetría

El método gravimétrico aprovecha el acusado contraste de densidad existente entre sulfuros y las rocas de su entorno, figura 4.2, para localizar nuevas masas mineralizadas. En función de los valores paramétricos, que conforman la columna litofísica de la Faja Piritica (Fig. 4.4), la gravimetría se perfila como la modalidad geofísica más idónea para localizar masas ocultas de sulfuros polimetálicos.

Un factor limitante de su aplicabilidad es el relieve topográfico imperante que obliga a trabajos de campo y de gabinete de mucha finura con el fin de reducir al máximo el «ruido», y de esta manera conseguir detectar masas para las cuales la relación profundidad/tamaño sea lo más elevado posible. Este mismo fenómeno puede utilizarse como «filtro» para fijar las dimensiones del depósito y la profundidad máxima del objetivo minero, establecidas «a priori» por consideraciones económicas.

Dentro de la Faja Piritica la gravimetría puede emplearse en estudios de detalle o en investigaciones estructurales y su concurso es imprescindible para determinar la naturaleza «metálica» o «litológica» de anomalías eléctricas o electromagnéticas. También puede suministrar información valiosa sobre anomalías de P. I. cuando la disseminación sea suficientemente importante para incrementar el contraste de su densidad respecto a la de la roca encajante (Fig. 4.3).

Otro campo de aplicación del método es la evaluación de yacimientos, permitiendo una primera estimación de sus reservas.

En la zona reservada del Cinturón Piritico, se han efectuado levantamientos gravimétricos en varios

bloques, tanto en fase de detalle como en estudios regionales previos.

4.2.6. Magnetometría

Con las excepciones recogidas en el apartado 4.1, las masas de sulfuros conocidas no son magnéticas, por lo que este método no puede utilizarse para detectar los yacimientos piriticos del Suroeste peninsular.

Es posible su aplicación en estudios regionales, fundamentalmente con objetivos estructurales, y localmente para descartar anomalías gravimétricas relacionadas con rocas básicas.

Puede suministrar información sobre la profundidad del Complejo Volcánico Sedimentario oculto por materiales del Culm.

4.2.7. Otros métodos

Se han efectuado ensayos con el método sísmico, cuyas posibilidades están aún prácticamente inéditas. En teoría este método puede ser una herramienta útil para fijar el espesor del Culm, sobre todo cuando se haya establecido con precisión las velocidades de las distintas unidades litológicas. Un factor limitante para su aplicación la constituye la complejidad tectónica de la región.

Se han efectuado igualmente diagrfias con el método electromagnético de impulsos (dominio de tiempos), con resultados frecuentemente poco claros, principalmente por dificultades en los sondeos mecánicos.

También se ensayaron «puesta a masa», polarización espontánea y magnetotelúrico, pero siempre de forma muy limitada, sin gran relevancia en el contexto general.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS: ANALISIS CRITICO

El estudio de la documentación presentada por las empresas adjudicatarias de bloques, pone de manifiesto que el nivel de conocimientos adquirido sobre el subsuelo de la Reserva de Huelva, proporcionado por la geofísica, es muy irregular de unos bloques a otros, debido tanto a la filosofía adoptada por aquellas como a las metodologías aplicadas. Tampoco es comparable, ni en cantidad ni en calidad, la información aportada, lo que hace aún más difícil homogeneizar resultados.

Algunas empresas efectuaron estudios aeroportados de mayor o menor detalle, y de acuerdo con los resultados obtenidos han seleccionado las áreas donde investigar con geofísica terrestre de detalle. Los estudios geológico-mineros suelen ocupar, en este caso, un lugar secundario, como apoyo del levantamiento geofísico. Las empresas que siguen esta filosofía son normalmente extranjeras acostumbradas a desarrollar proyectos similares en todo el mundo.

Otras empresas, por el contrario, parten de estudios geológico-mineros minuciosos para seleccionar áreas donde efectúan campañas geofísicas. En gene-

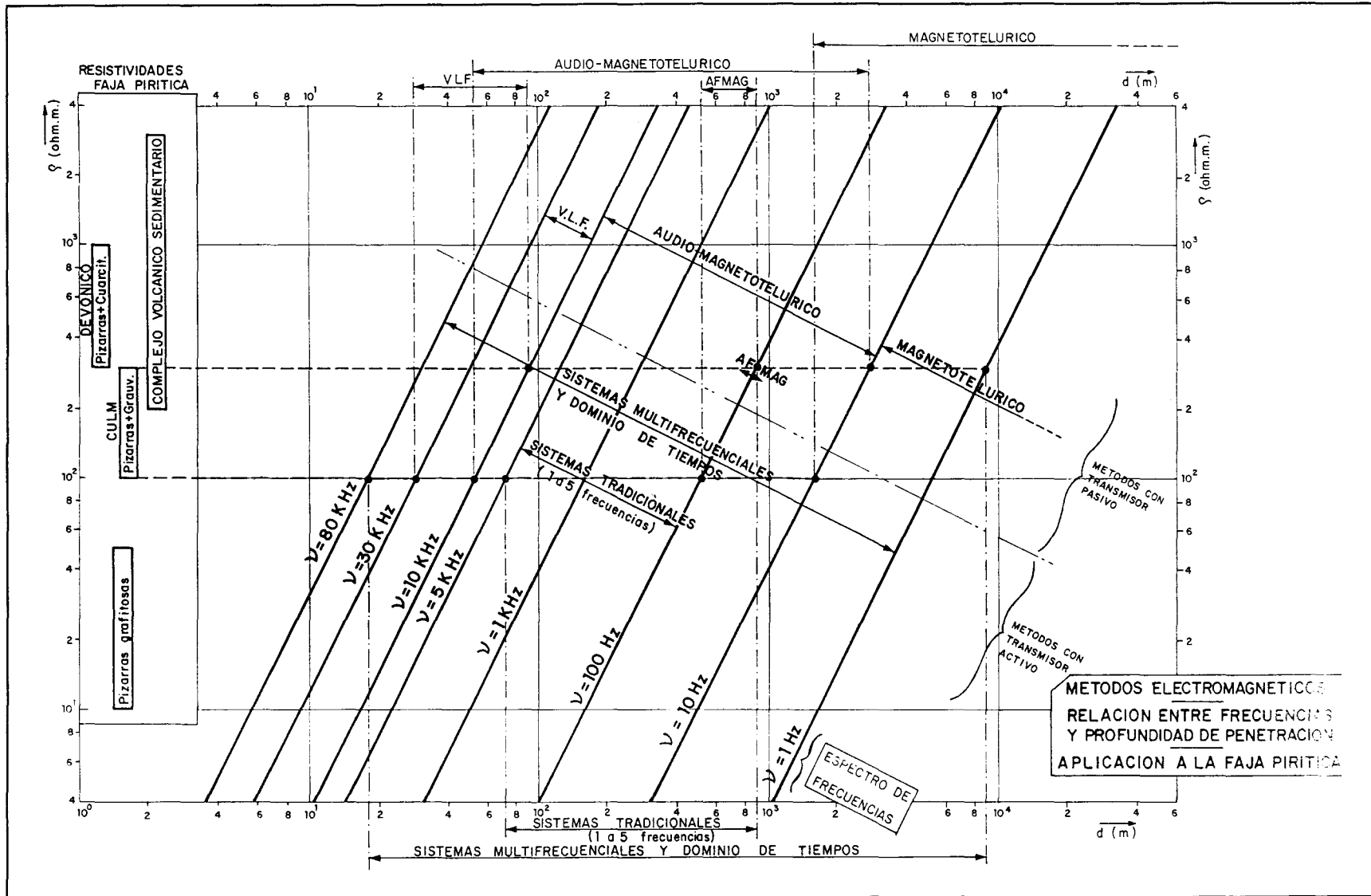


Fig. 4.5

ral, tales empresas llevan muchos años trabajando en la Faja Piritica y prácticamente en todos los casos tienen explotaciones mineras en desarrollo.

Finalmente, un tercer grupo utiliza ambos criterios, optimizando así las posibilidades de la investigación.

Un nuevo factor discordante lo constituyen las metodologías aplicadas, no sólo las consideradas básicas, con las cuales se cubre toda la zona seleccionada, sino también las complementarias que reconocen las anomalías detectadas por las primeras. Esto incide tanto en la profundidad de la investigación como en lo que se puede conocer como «*factor de agotamiento prospectivo*» de la Reserva para nuevos depósitos de sulfuros. Así, en las áreas cubiertas exclusivamente con técnicas electromagnéticas, si se aplicaron métodos en el dominio de frecuencias, se pueden considerar exploradas en los 20-120 metros más superficiales, pero si el método utiliza dominio de tiempos la profundidad es superior. Por otro lado, las zonas cubiertas con magnetometría no se pueden considerar exploradas para sulfuros (ver apartado 4.1). Cuando, por el contrario, se utilizó gravimetría como método de detalle, la zona puede considerarse, en general, reconocida adecuadamente, máxime si se complementa con métodos electromagnéticos o eléctricos. En relación con los levantamientos gravimétricos llama la atención el hecho de que en varios bloques sólo se ha llegado hasta la Anomalia Bouguer sin incluir ningún otro tratamiento, con lo que en principio, no se ha sacado todo el partido posible al método.

Otro punto a destacar es la distinta denominación empleada por unas y otras empresas para designar el equipo electromagnético en el dominio de tiempos. Un intento de homologación no resulta fácil debido fundamentalmente a la escasa información técnica suministrada en algunos casos.

Considerando en conjunto todas las metodologías, se han detectado diversas anomalías geofísicas. Estas anomalías, en función del comportamiento geofísico de rocas y mineralizaciones de la provincia metalogénica, sólo son «*metálicas*» cuando coinciden espacial y estructuralmente máximos gravimétricos con conductores eléctricos (anomalías electromagnéticas o mínimos electrorresistivos). Este aserto ha sido claramente confirmado con varios sondeos mecánicos efectuados para comprobar anomalías electromagnéticas sin respuesta gravimétrica. Todos ellos resultaron negativos y el cuerpo conductor corresponde siempre a pizarras carbonosas.

A partir de 1960, el método gravimétrico ha desempeñado un papel primordial en la localización de todas las masas de sulfuros en la Faja Piritica. En el momento actual se ha confirmado, una vez más, su eficacia, principalmente en el hallazgo de las nuevas masas de sulfuros de Valverde y Aguas Teñidas Este.

El método magnético, tanto aéreo como terrestre, ha mostrado su ineficacia para localizar, en general, depósitos de sulfuros, aun cuando su concurso es positivo para determinar el techo del C.V.S. oculto por sedimentos del Culm. En este sentido, un sondeo mecánico es particularmente instructivo para futuros programas de investigación de la Faja Piritica. Fue realizado para reconocer una anomalía electromagnética profunda bajo sedimentos del Culm, sin respuesta gravimétrica. Los resultados de dicho sondeo confirman, por un lado, que a partir de levantamientos magnéticos, aeroportados en este caso pero evidentemente también terrestres, es posible determinar la profundidad del techo del C.V.S., y por otro, la limitación que el «*efecto canal*» (channeling effect) supone para los métodos electromagnéticos en el dominio de tiempos cuando se investiga sobre pizarras y grauvacas del Culm. Este resultado refuerza aún más el papel del método gravimétrico como herramienta imprescindible para optimizar la investigación geofísica de esta provincia metalogénica.

Los métodos aereoelectromagnéticos son igualmente ineficaces, sobre todo el INPUT, el único del que se dispone de información detallada.

En la práctica, sobre depósitos conocidos: Almagrera, Cantareras, Nueva Almagrera, Lagunazo, San Platón, etc., el método electromagnético en el dominio de tiempos ha probado su eficacia con claras anomalías. Igualmente este método es muy útil para la diagrafía de sondeos mecánicos aun cuando frecuentemente se tropieza con problemas de realización por estrangulamiento del agujero de la perforación.

El método de P.I. se manifiesta, como no podía menos de suceder, muy sensible a las mineralizaciones diseminadas.

Por su lado, el método de «*puesta a masa*» es de gran utilidad tanto para confirmar si existe o no conexión entre mineralizaciones atravesadas por varios sondeos mecánicos, como para establecer una primera geometría del cuerpo de sulfuros localizado por labores mecánicas de investigación.

5. LEVANTAMIENTO GRAVIMETRICO DE LA PARTE OCCIDENTAL DE LA RESERVA «ZONA DE HUELVA»

De acuerdo con los criterios expuestos en la Introducción de esta publicación se ha realizado el levantamiento gravimétrico de la parte occidental de la Reserva, aprovechando los datos gravimétricos suministrados por las empresas adjudicatarias de los bloques y completándolos con una toma de datos sobre el terreno en las áreas no seleccionadas, por aquellas, para estudios de detalle. De esta manera se ha conseguido un documento de primordial importancia, con una gran economía de tiempo e inversiones.

Todos los datos disponibles, adecuadamente elaborados y tratados para lograr su homogeneización, conforme a la buena práctica de la gravimetría minera, permiten contemplar, en un plano único, el relieve de la gravedad de todo el sector, logrando así por primera vez un documento objetivo y básico cuya interpretación minero-estructural ayudará, tanto a empresas privadas como a organismos públicos, a localizar y delimitar nuevas áreas de interés preferente en las cuales concentrar investigaciones geológicas y geofísicas detalladas.

Para alcanzar estos objetivos, ha sido necesario reelaborar los datos gravimétricos para adaptarlos a las siguientes condiciones técnicas:

- En cada estación la planimetría se refiere al sistema de proyección UTM y la altimetría al nivel del mar por intermedio de la Red Geodésica Nacional (R.G.N.).
- Los valores de la gravedad se enlazaron a la Red Gravimétrica Fundamental Española de 1973 (R.G.F.E.-73) y, por lo tanto, y a través de ella, a la I.G.S.N. 71 (International Gravity Standardization Net 1971).
- La corrección del relieve se ha extendido hasta la zona M de Hammer (radio externo 21.950 m).
- La gravedad normal utilizada es la definida por la Fórmula Internacional de 1967.
- Se adopta, como densidad de reducción, el valor de $2,60 \text{ g/cm}^3$.

5.1. ADQUISICION DE DATOS

5.1.1. Procedentes de las empresas adjudicatarias

Se han utilizado datos de las empresas incluidas en el cuadro 5.1, ordenadas, en base a su área de trabajo, de Oeste a Este y de Norte a Sur. En cada caso se indica la hoja topográfica y el bloque o bloques adjudicados.

También se incluye en dicho cuadro el ITGE con el

estudio regional de la Hoja de Calañas (n.º 959), cuyos datos se han utilizado como relleno y enlace entre cuadrículas de detalle de la referida hoja topográfica.

En conjunto se han manejado unas 14.000 estaciones, correspondiendo la mayor parte a estudios detallados según mallas con dimensiones: 200×200 ; 200×100 ; 200×50 ; 100×100 y 50×50 m principalmente. De todas ellas en los planos gravimétricos se incluyen algo menos de la mitad y, ante tal cúmulo de datos, en el proyecto original, se decidió adoptar la escala 1:25.000 para su representación, en lugar de la inicialmente programada (1:50.000) que resulta pequeña. No obstante y para mostrar una panorámica de conjunto, se reúne en dos planos reducidos a escala 1:50.000 todo el levantamiento. Dichos planos se adjuntan en esta publicación (planos 5.1 y 5.2). Las mallas resultantes tienen dimensiones de 400×200 ; 200×200 ; 200×100 y 100×100 m.

5.1.2. Medidos directamente en campo

Las áreas sin datos de gravedad existentes entre las cuadrículas de detalle de la Hoja de El Cerro de Andévalo (n.º 937) fueron cubiertas directamente por la Dirección General de Minas y de la Construcción por medio de una campaña de 400 estaciones.

5.1.3. Estaciones tratadas

Finalmente, de una y otra procedencia, en el Sector Occidental de la Reserva se incluyen 6.600 estaciones con valor de la gravedad que representan una cobertura media de seis estaciones por kilómetro cuadrado.

5.2. ELABORACION DE LA CAMPAÑA DE CAMPO

Se ajusta al condicionado incluido al comienzo de este capítulo y la metodología aplicada se expone a continuación.

5.2.1. Topografía

Para determinar la posición de las estaciones, en coordenadas UTM, y su altitud, referida al nivel del mar, se aplicó el método de itinerarios encuadrados entre vértices de la R.G.N., para implantar otros secundarios que, conjuntamente con aquellos, se utilizaron para radiar a las estaciones gravimétricas. Localmente, y ante la imposibilidad de visar desde ninguno de los vértices disponibles, debido al relieve del terreno, ciertos puntos situados en carreteras, se tomaron mediante itinerarios secundarios encuadrados entre dos estaciones radiadas. La nivelación

CUADRO 5.1
DATOS GRAVIMETRICOS PROCEDENTES DE EMPRESAS ADJUDICATARIAS Y DEL ITGE

EMPRESA O GRUPO DE EMPRESAS	HOJA 1:50.000	BLOQUES
BILLITON ESPAÑOLA, S. A. PROMOTORA RECURSOS NATURALES, S. A. SAN TELMO IBERICA MINERA, S. A.	937	II y III
BILLITON ESPAÑOLA, S. A. PROMOTORA RECURSOS NATURALES, S. A. PIRITAS DE HUELVA, S. A.	937	IV y V
RIO TINTO MINERA, S. A.	937	III, VIII y IX
COMPAÑIA ESPAÑOLA DE MINAS DE THARSIS, S. A. NEWMONT ESPAÑOLA, S. A.	937 y 959	XI, XV, XVI, XXII y XXIII
SOCIEDAD MINERA Y METALURGICA DE PEÑARROYA ESPAÑA, S. A.	959	XXII y XXIII
EXXON MINERA ESPAÑOLA, S. A.	959	XVI y XVII
CHARTER EXPLORACIONES, S. A. TOLSA, S. A.	959	XXIV
EMPRESA NACIONAL DE ADARO DE INVESTIGACIONES MINERAS, S. A.	959	XXV
INSTITUTO TECNOLOGICO Y GEOMINERO DE ESPAÑA	959	Estudio regional de toda la hoja

en dichos itinerarios secundarios se realizó por alturas para obtener una precisión similar a la de los puntos extremos. Las medidas de campo se realizaron con teodolitos de segundos, distanciómetros y niveles.

El error cuadrático del levantamiento, deducido de las diferencias de cierre observadas, es de $\pm 0,15$ m en X: $\pm 0,18$ m en Y (aproximadamente latitud) y $\pm 0,095$ m en altura (Z).

5.2.2. Gravimetría

Las medidas gravimétricas se efectuaron con un gravímetro WORDEN PROSPECTOR cuya deriva dinámica propia en punto fijo, es de 0,02 miligales/hora.

Con motivo de este levantamiento se implantaron dos nuevas bases, denominadas C.A.0 y C.A.1, enlazadas con V.1 y S.T.0 ya establecidas con antelación; además de las mencionadas bases se ha utilizado la S.T.1. Todas ellas se encuentran referidas a la R.G.F.E.-73 por intermedio de las bases de Huelva y Ayamonte que forman parte de la referida Red.

5.2.3. Correcciones y controles de calidad

Las lecturas fueron corregidas de influencia luni-solar y deriva instrumental.

La corrección topográfica se calculó por el método de Hammer de la siguiente manera:

— Zonas B, C y D de «visu» en campo.

— Zonas E, F, G, H e I desde planos 1:25.000, con curvas de nivel cada 10 m.

— Zonas J, K, L y M desde planos 1:200.000, con curvas de nivel cada 100 m., siguiendo la metodología de Neumann con malla cuadrada de 3 km de lado.

Para controlar la calidad, tanto de las medidas gravimétricas como de la corrección topográfica, se repitieron algo más del 10 % de las estaciones. En la figura 5.1 se reproduce el gráfico acumulado de frecuencias porcentuales de las diferencias observadas en las lecturas repetidas del gravímetro. La mediana vale 0,025 mgal y el error cuadrático medio es $\pm 0,0269$ mgal, parámetros ambos que confirman la excelente calidad del trabajo de campo.

En cuanto al efecto de relieve la repetición tanto de campo (zonas B, C y D) como de plantillas en plano 1:25.000 (zonas E a I) proporcionan un error cuadrático medio de $\pm 0,032$ mgal, que puede alcanzar $\pm 0,04$ mgal incluyendo la incidencia estimada de la corrección a larga distancia (zonas J a M).

5.3. HOMOLOGACION DE LOS DATOS DE LAS EMPRESAS

Los levantamientos de las áreas investigadas por las diferentes empresas se ajustan a criterios muy diversos. Así, en topografía algunos están referidos a

LEVANTAMIENTO GRAVIMETRICO DE LA PARTE OCCIDENTAL DE LA RESERVA «ZONA DE HUELVA»

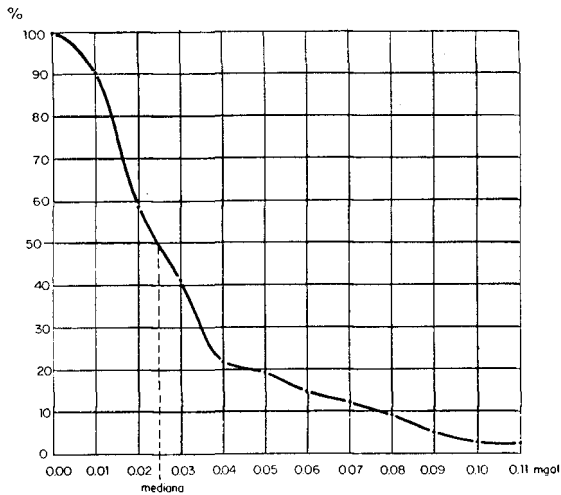


Fig. 5.1.—Control de calidad de observaciones gravimétricas —gráfico de frecuencias acumuladas.

coordenadas Lambert e incluso locales, y las altitudes no siempre se encuentran relacionadas con el nivel del mar; en gravimetría a veces refieren los valores de g a «datum» arbitrario, la corrección topográfica termina en las zonas F (radio máximo 895 m) o H (radio máximo 2.615 m) de Hammer, utilizan gradientes de la latitud constantes o valores de gravedad normal no ajustados a fórmulas internacionales y densidades de reducción diferentes de $2,60 \text{ g/cm}^3$.

Todo esto motiva que los valores calculados para la gravedad Bouguer en las distintas cuadrículas no sean homogéneos y, en consecuencia, no se puede, con dichos valores, elaborar un plano gravimétrico del sector.

Para eliminar estos defectos, con los datos procedentes de las empresas adjudicatarias, se ha procedido de la siguiente manera:

De todas las estaciones se toman exclusivamente los valores de planimetría, altimetría y gravedad medidos en campo. Si no lo están, se enlazan por medio de trabajos complementarios con la R.C.N. y la R.C.F.E.-73 para referirlos al nivel del mar en cotas y a valores absolutos de gravedad. Cuando es necesario, a partir de las coordenadas Lambert o locales de cada estación se calculan sus equivalentes en el sistema

UTM y la corrección topográfica se amplía hasta la zona M de Hammer.

Con estos cálculos y correcciones, elaborados en un ordenador IBM, se ha creado un fichero de datos homogéneos entre sí, con el levantamiento de la Hoja de Calañas y con la campaña gravimétrica ahora realizada por la Dirección General de Minas y de la Construcción en la Hoja de El Cerro de Andévalo.

A partir de dicho fichero es ya posible calcular la Anomalia de Bouguer unificada para todo el Sector Occidental de la Reserva.

5.4. PRECISION DEL LEVANTAMIENTO

Es función de los errores cometidos en las distintas etapas de medida, necesarias para establecer los valores de la gravedad.

Con referencia a la campaña efectuada en la Hoja de El Cerro de Andévalo, la precisión del levantamiento se resume en el cuadro 5.2.

El error medio cuadrático (E_c) es por tanto:

$$E_c = \pm \sqrt{0,00268452} = \pm 0,0518 \text{ mgal}$$

y, en consecuencia, son interpretables anomalías desde $\pm 0,13$ miligales que representan el error máximo.

Aún cuando la precisión de los levantamientos de las cuadrículas en ambas hojas topográficas sea igual o incluso mayor que la aquí obtenida, parece razonable elevar hasta $\pm 0,20$ miligales el error máximo del levantamiento de todo el Sector Occidental de la Reserva, debido a inhomogeneidades residuales que aún persisten, originadas por la multiplicidad tanto de vértices geodésicos como de bases gravimétricas en que se apoyan dichos trabajos. Estas inhomogeneidades se manifiestan preferentemente en los bordes de cada cuadrícula.

5.5. ANOMALIA DE BOUGUER

La anomalía de la gravedad de Bouguer se ha calculado por medio de la expresión:

$$AB = g_{obs} - IG_N - (F - B \cdot d)Z - T$$

donde:

- AB = Anomalia de Bouguer en mgal.
- g_{obs} = Gravedad observada.
- GN = Gravedad normal (sistema de 1967).
- F = Coeficiente de Aire Libre o de Faye.

CUADRO 5.2
PRECISION DEL LEVANTAMIENTO EFECTUADO EN LA HOJA DE EL CERRO DE ANDEVALO

Fuente de error	Error e	e en mgal	e^2
Lectura gravímetro	$\pm 0,0269 \text{ mgal}$	$\pm 0,0269$	0,00072361
Latitud	$\pm 0,18 \text{ m}$	$\pm 0,0001415$	0,0000002
Altitud	$\pm 0,095 \text{ m}$	$\pm 0,018997$	0,00036089
Topografía	$\pm 0,04 \text{ mgal}$	$\pm 0,04$	0,00160000

$$\Sigma e^2 = 0,00268452$$

- B = Coeficiente de Bouguer.
- d = Densidad de reducción = 2,60 g/cm³.
- Z = Cota absoluta de la estación, apreciada hasta el cm.
- T = Efecto topográfico.

El valor de AB se determinó procesando los datos en un ordenador IBM PC XT.

El levantamiento gravimétrico de la zona explorada se presenta, en forma de isolinneas, a escala 1:50.000, en las Hojas de El Cerro de Andévalo (plano 5.1) y de Calañas (plano 5.2).

La equidistancia entre isoanómalas es 0,25 miligales, acorde con la precisión del levantamiento establecida en el apartado precedente.

La gravedad crece de Norte a Sur y de Este a Oeste y su relieve se encuentra comprendido entre 27,0 miligales en las proximidades del borde nororiental de la Hoja de El Cerro, y 52,0 miligales cerca del límite suroccidental de la Hoja de Calañas. Este último valor se ha superado sólo en anomalías locales relacionadas con yacimientos de Tharsis.

En general las isoanómalas siguen trayectorias que van de WNW-ESE a E-W y sólo en áreas locales pasan a N-S e incluso a NE-SW. Su trazado es regular dentro de la superficie cubierta con estaciones regionales, y ligeramente ondulado en las cuadrículas de detalle, donde se hace más patente el «ruido».

Las tendencias submeridianas abundan en una franja de aproximadamente 5 km de anchura situada en el borde oriental de la zona. Dentro de dicha franja son de destacar las estructuras situadas al Norte de Silos de Calañas, en la Hoja de El Cerro de Andévalo, y al Sur de Calañas en la Hoja de igual denominación.

El gradiente regional del sector investigado es de 0,61 mgal/km, positivo en dirección suroccidental. Localmente el gradiente puede multiplicarse hasta por el factor siete.

Analizando los mapas de Bouguer en términos de frecuencia en el dominio espacial (ciclos por unidad de longitud), es posible diferenciar tres poblaciones de anomalías como componentes fundamentales de la periodicidad espacial del levantamiento:

- Anomalías con longitud de onda de varios kilómetros.
- Anomalías con longitud de onda hectométrica.
- Anomalías con longitud de onda kilométrica.

Las dos primeras son funciones armónicas y representan la expresión gravimétrica de un mismo proceso orogénico que corresponde a la fase principal de plegamiento. La diferencia de longitud que se observa entre ambas poblaciones refleja los contrastes de densidad de las rocas del subsuelo. Entre las macroanomalías se destaca la antifforma positiva de Cabezas Rubias, limitada al Sur por la sinforma de Montes de San Benito, y la también antifforma de Alosno con el apéndice elíptico, igualmente positivo, de Tharsis, al Norte, y el domo negativo de la Rivera de Agustín, al Sudeste.

La tercera población de anomalías es disarmónica con las precedentes, posterior a ellas y refleja la fase de fracturación subsecuente al plegamiento.

5.6. INTERPRETACION MINERO-ESTRUCTURAL

En el proyecto original se han materializado los ejes de gravedad positiva y negativa, así como las principales alineaciones transversales que desplazan o interrumpen dichos ejes. Se observa buena coincidencia con las estructuras cartografiadas en el estudio geológico.

Los ejes positivos y negativos se orientan preferentemente en torno a la dirección Este-Oeste, vienen definidos por anomalías con longitudes de onda de varios kilómetros y representan ejes de plegamiento. Las alineaciones transversales se agrupan en dos familias conjugadas de direcciones NE-SW y NW-SE, se caracterizan por longitudes de onda kilométrica y corresponden a fallas posteriores al plegamiento. Superpuestos a ambas estructuras se detectan numerosos máximos y mínimos con menor desarrollo superficial, que son las anomalías con longitudes de onda hectométricas del capítulo precedente.

Como fondo cartográfico, se incluyen en ambos planos las distintas minas, tanto de sulfuros como de manganeso, conocidas en la zona investigada. También se incluyen los nuevos descubrimientos como la masa Valverde.

La alta densidad de los depósitos de sulfuros polimetálicos frente a las restantes unidades litológicas de la región hace que sobre aquellos aparezcan máximos de gravedad. Un análisis estadístico de dichas anomalías positivas permite diseñar el modelo gravimétrico que constituye el objetivo práctico de la investigación realizada.

Con este objetivo como meta, se resumen a continuación los parámetros gravimétricos del modelo que resulta del binomio «máximo de gravedad-yacimiento polimetálico» representado en planta.

Morfología. La anomalía, siempre positiva, vendrá definida por isolinneas cerradas de forma elíptica (Filón Norte, por ejemplo) o abiertas con forma de «cresta de ola» (Masa Valverde, por ejemplo).

Gradiente. En todos los casos el gradiente horizontal es superior al valor medio de la zona investigada.

Longitud. La longitud de onda de la anomalía se encuentra comprendida entre 300 y 1.500 m en dirección Este-Oeste, preferentemente, y 200 a 800 m en dirección transversal.

Amplitud. La intensidad residual de la anomalía oscila entre 0,4 y 5 miligales, según dimensiones y profundidad de emplazamiento del cuerpo mineralizado.

Este modelo recoge la respuesta gravimétrica de: Filón Norte-San Guillermo, Filón Sur, Almagrera, Nueva Almagrera, Cantareras, Prado Vicioso, Valverde, Lagunazo, El Carpio y San Telmo.

No aparece máximo gravimétrico, o es inferior a 0,25 miligales, sobre: Vulcano, Filón Centro, San Germán, Cruzadillo, Lancha, Sorpresa y Lomero-Poyatos debido, en unos casos, a la pobre cobertura gravimétrica realizada y, en otros, al pequeño tamaño de las masas o por encontrarse ya prácticamente agotadas.

El modelo gravimétrico así definido coincide con la subpoblación de anomalías positivas de longitud de

onda hectométrica que delimitan, por ello, áreas con elevada esperanza minera, perfilándose como objetivo prioritario de futuras investigaciones de detalle.

5.7. ESTUDIO CRITICO DE LAS PRINCIPALES ANOMALIAS: AREAS DE INTERES PREFERENTE

De acuerdo con el modelo minero-gravimétrico establecido en el apartado anterior, en el proyecto original, se han seleccionado, dentro de cada mapa 1:25.000, áreas de interés minero preferente delimitadas por anomalías positivas cuyos parámetros gravimétricos se ajustan a los de dicho modelo. Obviamente se excluyen las anomalías correspondientes a yacimientos conocidos y a los recientes descubrimientos.

En relación con las áreas de interés localizadas en zonas reconocidas con estaciones de carácter regional, es necesario resaltar que todos los puntos con

valores de gravedad anómalos de la Hoja de El Cerro de Andévalo fueron oportunamente filtrados y se aceptaron sólo cuando se confirmaba que no correspondían a lecturas «idas» bien en gravimetría o en topografía. Este mismo filtrado lo suponemos realizado en las restantes campañas por lo que los puntos que se incluyen en los planos son todos gravimétricamente correctos. No obstante, la fiabilidad de tales áreas anómalas es mayor cuando incluyen varias estaciones y cuando no se ubican en los bordes de cuadrículas de detalle. Ambas circunstancias pueden comprobarse en los respectivos planos en los que, a estos efectos, figuran las estaciones utilizadas.

Con estas salvedades, se analizan, en el proyecto original, las distintas áreas seleccionadas, contemplando en cada una de ellas: características gravimétricas, emplazamiento geológico y nivel de reconocimiento por labores mineras (sondeos mecánicos), según los datos disponibles. En esta publicación no se incluye dicho apartado, remitiendo al lector al referido proyecto original.

6. RED DE BASES GRAVIMÉTRICAS DE LA FAJA PIRITICA Y ENLACE CON PORTUGAL

6.1. CONSIDERACIONES GENERALES

De cuanto queda expuesto se deduce que el método gravimétrico es una de las principales técnicas geofísicas, si no la principal, para localizar nuevos depósitos de sulfuros en la Faja Piritica Ibérica, según se puede demostrar por consideraciones teóricas y, lo que es más importante, se ha confirmado en la práctica con el decisivo papel que la gravimetría ha desempeñado en la localización de las masas descubiertas en las últimas décadas.

La prolongada e intensa actividad minera de esta provincia metalogénica, y, en particular, después de las campañas de investigación desarrolladas en los últimos años, hace cada vez más improbable la presencia de masas de mineral, aún desconocidas, cercanas a la superficie. Es necesario, por lo tanto, investigar a mayor profundidad en áreas ocupadas por sedimentos del Culm, por volcanitas, por materiales devónicos cuando éstos cabalgan sobre el Complejo Volcánico-Sedimentario y por sedimentos terciarios. En estas condiciones la relación señal-ruido debe ser necesariamente pequeña y, por ello, para establecer las posibilidades mineras potenciales de una anomalía de gravedad es imprescindible conocer su posición, dentro de las distintas unidades gravimétrico-estructurales de la Faja, además de los parámetros propios del máximo de gravedad (intensidad, longitud, gradiente, etc.).

Para lograr estos objetivos es imprescindible realizar levantamientos precisos que a la vez sean mutuamente correlacionables.

Esta última condición pasa ineludiblemente por disponer de una referencia común, tanto para topografía como para gravimetría.

En topografía, la Red Geodésica Nacional (R.G.N.) representa el «datum» de referencia con coordenadas planimétricas dadas en el sistema UTM y altitudes referidas al nivel del mar.

En gravimetría el «datum» correspondiente lo constituye la Red Gravimétrica Fundamental Española-1973 (R.G.F.E.-73) relacionada con la International Gravity Standardization Net 1971 (I.G.S.N.-71) por medio de las estaciones de Barcelona J y Madrid C.

Pero mientras en España la R.G.N. cubre adecuadamente todo el territorio, siendo muy fácil la conexión de cualquier levantamiento topográfico parcial, la cobertura de la R.G.F.E.-73 es muy pobre como lo demuestra el hecho de contar con 79 estaciones distribuidas por todo el territorio peninsular e islas Baleares, más otras 45 referidas a dicha red por el Instituto Geográfico Nacional en 1975 como línea de calibrado Santander-Málaga, lo que hacen un total de 124 estaciones.

Consciente la Dirección General de Minas y de la Construcción de esta deficiencia y de la utilidad que para un mejor conocimiento geológico-minero de la Faja Piritica representan los mapas gravimétricos, subsanó dicha laguna creando una red de segundo orden como paso previo para disponer en el futuro de planos de gravimetría minero-estructurales, a escala adecuada, de toda la parte española de dicha provincia metalogénica.

Dicha red se enlazó con la Red Fundamental portuguesa, abriendo así la posibilidad de realizar, en un futuro, el levantamiento gravimétrico de toda la Faja Piritica Ibérica, con la integración de los datos gravimétricos disponibles en territorio portugués y español.

6.2. CARACTERÍSTICA DE LA RED

En el plano 6.1, se indica la situación de las nuevas bases medidas con un gravímetro La Coste-Romberg. En todos los casos se han colocado en puntos de fácil acceso: puertas de iglesias, puertas de cementerios, monumentos públicos, etc., que garantizan su permanencia futura.

De cada base se ha elaborado una ficha, que se adjunta, donde se incluye: croquis, fotografía, breve descripción del emplazamiento, coordenadas UTM y geográficas deducidas de planos 1:25.000 ó 1:50.000, altitud aproximada, término municipal al que pertenece, señalización con pintura roja (sólo en algunos casos por razones estéticas), valor de la gravedad, equipo que la observó y fecha.

En total se han establecido 23 bases en la parte española de la Faja Piritica y 3 en territorio portugués que junto a las pertenecientes a las redes fundamentales de uno y otro país representan 33 bases diferentes.

6.3. SISTEMÁTICA DE TRABAJO

En cada base se efectuaron entre seis y nueve lecturas diferentes en itinerarios de ida y vuelta para cada lado del polígono que en ella confluye, lo que supone un mínimo de doce lecturas y un máximo de cincuenta y cuatro según el número de vértices que concurren en la estación. En la base de Sevilla sólo se hicieron seis medidas.

Todas las lecturas fueron transformadas en miligales, y corregidas por deriva y luni-solar. Con los valores así obtenidos se promedió el gradiente o diferencia gravimétrica existente entre dos vértices consecutivos de cada polígono. Definido un sentido

de giro, cada poligonal se cerró con el valor indicado en su centro (plano 6.1).

En todos los cierres se cumple la condición $e \leq 0,03 \sqrt{n}$ miligales, siendo n el número de lados del polígono. Estos errores se han compensado preferentemente entre lados comunes de polígonos adyacentes obteniendo de esta manera el gradiente de gravedad corregido (ver plano 6.1).

6.4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para calcular la gravedad de cada estación se ha supuesto como valor fijo la base de Huelva B que tiene 979.970,41 mgal, y a partir de aquí, por arrastres sucesivos de los correspondientes gradientes, se ha calculado la gravedad de las diferentes bases, que se reproducen en el cuadro 6.1 correspondientes a la parte española.

Los resultados son plenamente satisfactorios ya que en Ayamonte B se obtiene el mismo valor que en la R.G.F.E.-73 (979.979,55 mgal) y en Sevilla B se obtiene una diferencia de 0,01 mgal (979.937,24 mgal), respecto a la referida Red.

6.5. PRECISION DE LA RED

El error medio cuadrático de los cierres de todos los polígonos es $\pm 0,03$ miligales que representa la precisión del levantamiento.

Por su parte la R.G.F.E.-73 tiene un error medio cuadrático de $\pm 0,02$ mientras que las de la I.G.S.N.-71, en la que ésta se apoya, tiene un error de $\pm 0,025$ en Barcelona J, $\pm 0,022$ en Lisboa A y $\pm 0,021$ en Madrid C.

CUADRO 6.1

BASES GRAVIMETRICAS: FAJA PIRITICA

ESTACION	VALOR DE LA GRAVEDAD (en mgal)
BASES: ESPAÑA	
ALOSNO	979.966,55
AYAMONTE B	979.979,55
AZNALCOLLAR	979.949,49
BERROCAL	979.930,45
CABEZAS RUBIAS	979.966,49
CALAÑAS	979.949,37
CAMPOFRIO	979.894,86
CARTAYA	979.974,25
CASTILLO DE LAS GUARDAS	979.924,93
GIBRALEON	979.982,83
HIGUERA DE LA SIERRA	979.880,07
HUELVA B	979.970,41
NERVA	979.926,73
PATRAS	979.918,76
PAYMOGO	979.974,66
PINOS	979.947,24
PUEBLA DE GUZMAN	979.964,37
ROSAL DE LA FRONTERA	979.984,37
SANTA BARBARA DE CASA	979.954,93
SAN BARTOLOME DE LA TORRE	979.968,65
SAN SILVESTRE DE GUZMAN	979.961,54
SEVILLA B	979.937,24
VALDELAMUSA	979.934,52
VILLANUEVA DE LOS CASTILLEJOS	979.957,05
VILLANUEVA DE LAS CRUCES	979.980,59
ZALAMEA LA REAL	979.929,20

7. ESTUDIO GEOQUIMICO

Sobre las mineralizaciones descubiertas recientemente se ha realizado un estudio geoquímico con el fin de poner de manifiesto las posibles relaciones entre las masas de sulfuros y determinados elementos menores, tanto de la mineralización como de la roca de caja.

El objetivo fundamental ha sido establecer aquellos elementos-traza que definen más adecuadamente la posible existencia de mineralizaciones, aportando incluso datos sobre las condiciones de formación de las mismas, y logrando una reducción del número de elementos necesarios a analizar, con el consiguiente ahorro de costos y tiempo de ejecución.

Simultáneamente y aprovechando los análisis existentes en la bibliografía, se ha realizado el estudio de los volcanismos ácidos V_1 y V_2 con los que, por el momento, se consideran asociadas las mineralizaciones. Es este último estudio el único de los realizados que se incluye en esta publicación.

7.1. TRATAMIENTO DE DATOS: METODOLOGIA

Para el tratamiento de los datos de análisis se ha establecido, una metodología propia, válida para la aplicación de los métodos de análisis estadístico multivariable, que conlleva una importante economía de los tiempos de cálculo, estableciendo, además, el número mínimo de elementos químicos compatibles con la determinación de las diferencias geoquímicas entre las rocas de un ámbito geológico, sin que la pérdida de información que supone eliminar ciertos elementos implique introducir errores en la interpretación.

El esquema de tal metodología figura en el cuadro 7.1 y se detalla a continuación.

En primer lugar, mediante diagramas geoquímicos tradicionales tales como el diagrama T.A.S. de clasificación de rocas volcánicas, el diagrama AFM de evolución geoquímica en series volcánicas, los diagramas R_1 y R_2 de La Roche y Latelier, etc., complementados con estudios petrológicos, se realiza el «*estudio geoquímico inicial*».

A continuación, se realiza el «*análisis estadístico sencillo*» que consiste en estudiar las poblaciones correspondientes a las variables analizadas, o bien las distribuciones que presentan los diferentes contenidos en elementos-traza, del que pueden extraerse ya unas conclusiones iniciales.

El objetivo del «*análisis de componentes principales en modo-Q*» (ACP en modo-Q) es determinar las variables significativas que pueden explicar el proceso geológico-minero en estudio, definir la existencia de

grupos de estas variables y caracterizar a los mismos de acuerdo con ellas. Para esto se realiza un análisis de componentes principales, no sobre la matriz de datos (X), de dimensiones n (número de individuos) por p (número de variables), sino sobre su traspuesta (X^T), obteniendo así unos factores principales que se definen como individuos tipo (l_m), siendo m el número de dichos individuos de forma que $m \leq p$.

Este método se aplica sobre la matriz de los cosenos de theta (similaridades entre individuos) de la matriz X inicial:

$$\delta_{ij} = \frac{\sum_k (X_{i,k} X_{j,k})}{\sqrt{\sum_k (X_{i,k})^2 \sum_k (X_{j,k})^2}} \quad (k = 1, \dots, p)$$

Esta matriz de similaridades es de orden $n \times n$ con lo que el proceso de cálculo se hace muy penoso. Aplicando la teoría de J. E. Klován & J. Imbrie (1971), se realiza el análisis de componentes principales sobre una matriz de orden $p \times p$, en la forma:

$$\delta = D^{-1/2} X X^T D^{-1/2}, \quad \text{siendo } D = \text{diag}(X X^T),$$

haciendo: $\delta = W W^T$, la matriz de los coeficientes del modelo factorial en modo Q resulta ser: $F = V$, donde V es la matriz de los vectores propios de ($W^T W$), de orden $p \times p$, de modo que:

$$l_k = \sum_j (f_{kj} V_j) \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, p \\ k = 1, \dots, n \end{matrix}$$

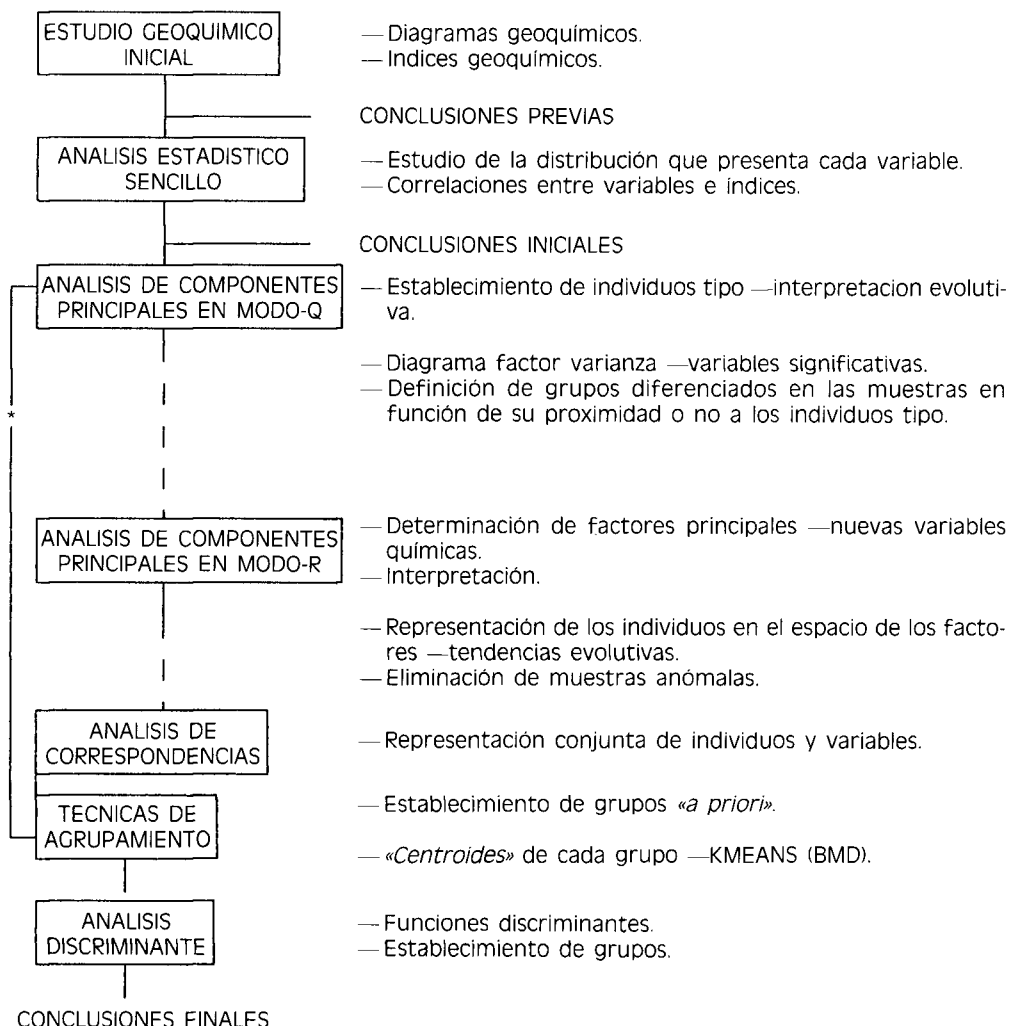
Y la matriz factorial del modo-Q: $A = W F$, de forma que: $x_i = \sum_k (a_{ik} l_k)$, lo que permite expresar los individuos en el espacio de los individuos tipo.

De acuerdo con A. T. Miesch (1979), se aplica el diagrama factor-varianza, que se realiza calculando los coeficientes de correlación existentes entre las columnas de la matriz inicial transformada (W) y la obtenida por el método factorial ($W' = A F^T$) para diferente número de factores (individuos tipo) considerados.

En este diagrama se dispone del cuadrado de dicho coeficiente de correlación frente al número de factores, junto con la varianza acumulada explicada por cada factor que se añade. Lo cual permite establecer las variables que explican satisfactoriamente el proceso (en la medida que el cuadrado del coeficiente de correlación $-r^2-$ se aproxime a la unidad) para un número de factores que permita una representación espacial ($n = 1, 2, 3$).

El «*análisis de componentes principales en modo-R*» (ACP en modo-R) sólo tiene justificación si las variables significativas determinadas en el ACP en modo-Q presentan alguna correlación interna, ya que en caso contrario el ACP modo-R sólo serviría para establecer un orden de variables de acuerdo a valores decre-

CUADRO 7.1
ESQUEMA METODOLOGICO



* Línea de trabajo a utilizar si las variables significativas resultan ser incorreladas, en cuyo caso es inútil llevar a cabo un Análisis de Componentes Principales en modo-R.

cientes de sus varianzas, lo que puede hacerse sin recurrir a este tipo de análisis.

El «ACP en modo-R» puede realizarse sobre la matriz de correlaciones o sobre la de covarianzas, siendo preferible el estudio sobre esta última, pues implica considerar no sólo la interdependencia entre las variables sino también la variabilidad que éstas presentan.

Este tipo de análisis permite determinar los denominados «factores principales» correspondientes a unas variables químicas ideales, conformadas como combinación lineal de las variables químicas analizadas o reales:

$$F_k = \sum_{j=1}^m (f_{kj} v_j) \quad \text{con } k = 1, \dots, m < p$$

Dicha metodología permite expresar cada una de las muestras en función de las nuevas variables químicas generadas o «factores principales».

El «análisis de correspondencias (AC)» combina las ventajas de los dos modos R y Q del ACP. Este método ha sido utilizado para el análisis de tablas de contingencias, por lo que no sería, en principio, de aplicación en el presente caso, ya que se trata de analizar una tabla de datos no enteros, al contrario de lo que cabría esperar de una tabla de contingencias. Este problema ha sido resuelto por diversos autores que efectúan sobre la matriz de datos iniciales una serie de consideraciones, de manera que los elementos de la nueva matriz transformada corresponderían a hipotéticas frecuencias. Es decir, mediante una transformación convierten la matriz de datos inicial en una tabla de contingencias.

El objeto de este método es obtener una representación simultánea de variables y muestras en un espacio bidimensional, cuyos ejes quedarían definidos por el AC realizado. Se trata pues, de definir unos factores principales comunes a variables y muestras, que permitan una representación conjunta con posi-

bilidad de establecer relaciones evolutivas entre variables y muestras.

Previamente al «*análisis discriminante*» (AD) y dado que los grupos no están separados, se realiza un «*Clustering*» (KMEANS) para formar dos grupos con todas las muestras.

Con los grupos formados, como grupos de aprendizaje, se realiza el AD, dando lugar a las funciones discriminantes.

Con el «*análisis discriminante (AD)*» se intenta definir una regla que permita la asignación de una nueva muestra a alguno de los grupos ya definidos. La regla de asignación utilizada, que en esencia consiste en la división del espacio p-dimensional (p: número de variables) en tantas regiones disjuntas como grupos definidos, tal que si una muestra se encuentra en una determinada región ésta será asignada al grupo correspondiente, ha sido la de funciones discriminantes lineales, lo que implica la suposición de que las matrices de covarianza-varianzas de los grupos, «*a priori*» definidos, son similares, de manera que la regla de asignación viene dada por:

$$X_i \in G_k, \text{ si } \text{Máx} \{h_j(x_i)\} = h_k \quad j = 1, \dots, p$$

$$h_j, \text{ funciones discriminantes} \quad i = 1, \dots, n$$

7.2. GEOQUIMICA DE LOS VOLCANISMOS PRODUCTIVOS V₁ Y V₂

La metodología anterior ha sido aplicada al estudio de los volcanismos productivos, aprovechando los datos de distintos autores sobre la zona central de la Reserva (área de Calañas), y dado el interés que presenta la doble cuestión de la existencia de una serie de evolución magmática y la posibilidad de estable-

cer, por geoquímica, caracteres diferenciadores de las rocas volcánicas.

7.2.1. Estudio geoquímico inicial

El cuadro 7.1, de coeficientes de correlación lineal para los contenidos en elementos mayores, pone de manifiesto la fuerte correlación negativa existente entre la sílice y los minerales ferromagnesianos, correspondiente a un claro proceso de diferenciación fraccionada, y la opuesta correlación que presentan los álcalis, Na₂O y K₂O, con aumento del contenido de K₂O a medida que crece SiO₂ (correlación lineal positiva), y disminución del contenido en Na₂O (correlación lineal negativa). Ello estaría de acuerdo con la existencia de riolitas potásicas, señaladas por T. Febrel, 1966.

El cuadro 7.2, de correlación entre elementos mayores e índices de diferenciación (ID) y de solidificación (IS), ratifica lo expuesto anteriormente, de manera que con la diferenciación (aumento progresivo del ID y disminución consecuente del IS) se produce un incremento de los contenidos en sílice y potasio (coeficientes de correlación de los contenidos en sílice y potasio (coeficientes de correlación positivos con el ID y negativos con el IS) y una disminución en los de titanio, aluminio, hierro, magnesio y calcio, comportándose el sodio de manera opuesta al potasio.

El índice de solidificación, que representa el grado de fraccionamiento del magma, siendo una medida de la cantidad de líquido residual respecto a la fase sólida cristalizada (S. Fernández & A. Hernández, 1981), se calcula a partir de los porcentajes en peso de los óxidos, según la siguiente expresión:

$$IS = 100 \times \frac{MgO}{MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O}$$

CUADRO 7.1
COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL PARA LOS CONTENIDOS EN ELEMENTOS MAYORES EN LOS VOLCANISMOS V₁ Y V₂

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
TiO ₂	-0,81									
Al ₂ O ₃	-0,80	0,43								
Fe ₂ O ₃	-0,28	0,15	0,32							
FeO	-0,89	0,80	0,60	-0,03						
MgO	-0,93	0,80	0,65	0,16	0,87					
CaO	-0,86	0,67	0,63	0,22	0,75	0,82				
Na ₂ O	-0,13	0,09	0,16	-0,04	0,25	0,06	-0,05			
K ₂ O	0,51	-0,36	-0,42	-0,21	-0,52	-0,53	-0,58	-0,56		
P ₂ O ₅	-0,71	0,76	0,48	-0,05	0,71	0,71	0,58	0,22	-0,45	
PPC	-0,85	0,66	0,72	0,35	0,72	0,78	0,72	0,14	-0,55	0,63

CUADRO 7.2
CORRELACION ENTRE ELEMENTOS MAYORES E INDICES DE DIFERENCIACION Y SOLIDIFICACION

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC
ID	0,95	-0,74	-0,74	-0,27	-0,84	-0,92	-0,95	-0,01	0,61	0,68	0,76
IS	-0,87	0,72	0,65	0,06	0,82	0,96	0,85	0,02	-0,60	-0,64	-0,82

Igualmente, el índice de diferenciación se calcula a partir de los minerales de la norma CIPW, en la forma:

$$ID = Q + Or + Ab + Ne + Lc$$

La relación $ID = 100 - 1,93IS$ permite estimar el grado de diferenciación de la muestra sin tener que calcular la norma CIPW.

Igualmente, el diagrama ternario IS-Na-K, de la figura 7.1, indica claramente la existencia de un proceso de potasificación en los términos finales de los correspondientes procesos diferenciadores de los volcanismos V₁ y V₂, o bien de alguno de ellos, ya que no se conoce su asignación a uno u otro episodio volcánico.

7.2.2. Análisis estadístico sencillo

Con el fin de estudiar las poblaciones correspondientes a las variables analizadas se ha utilizado el paquete BMD, con los siguientes resultados más destacables:

- El silicio presenta una distribución simétrica y bastante leptocúrtica (normal picuda), correspondiendo a este elemento el coeficiente de variación menor entre los analizados. Por el contrario, el potasio presenta el mayor coeficiente de variación, y una distribución muy achatada.
- Otras variables, como el aluminio y las pérdidas por calcinación tienen una distribución asimétrica y picuda (log-normal).
- El resto de los elementos (sodio, calcio, magnesio, hierro divalente y titanio) presentan distribuciones asimétricas y algo picudas, incluso con varios picos.

Los posibles procesos de asimilación se han estudiado mediante los coeficientes de correlación existentes entre los parámetros de P. Niggli: *si*, *al*, *fm*, *c* y *alk*, calculados a partir de los datos de los análisis de elementos mayores. Como se deduce del cuadro 7.3, los altos valores de correlación, incluso para el parámetro *alk* (función de los contenidos en álcalis), ponen de manifiesto la existencia de una fuente magmática uniforme dentro de un emplazamiento geotectónico determinado, que ha experimentado procesos de diferenciación y no de asimilación.

CUADRO 7.3
COEFICIENTES DE CORRELACION PARA LOS
PARAMETROS DE NIGGLI

	<i>si</i>	<i>al</i>	<i>fm</i>	<i>c</i>
<i>al</i>	0,893			
<i>fm</i>	-0,894	-0,921		
<i>c</i>	-0,687	-0,694	0,581	
<i>alk</i>	0,846	0,823	-0,878	0,857

7.2.3. «ACP en modo-Q»

Previamente a la obtención del diagrama factor-varianza (ver apartado 7.1) se ha realizado el «ACP en modo-Q», del cual se deduce la escasa significación de

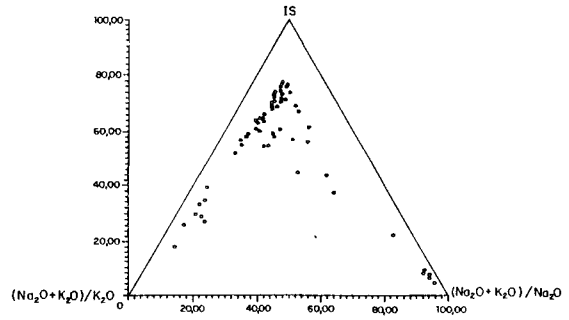


Fig. 7.1.—Diagrama Is-Na-K.

las variables TiO_2 , Fe_2O_3 y P_2O_5 , y con el fin de suavizar el posible efecto de los mayores contenidos en sílice del resto de las variables significativas, se ejecutó una primera transformación en la forma:

$$X \rightarrow Y \equiv Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j \min}}{X_{j \max} - X_{j \min}}$$

y esta matriz Y se normalizó con objeto de que $Y_{ij} \in [0, 1]$.

Según se deduce del diagrama factor-varianza, con sólo dos factores se tiene un 83,68 % de la varianza explicada, siendo exclusivamente variables significativas la sílice y los álcalis (sodio y potasio), figura 7.2.

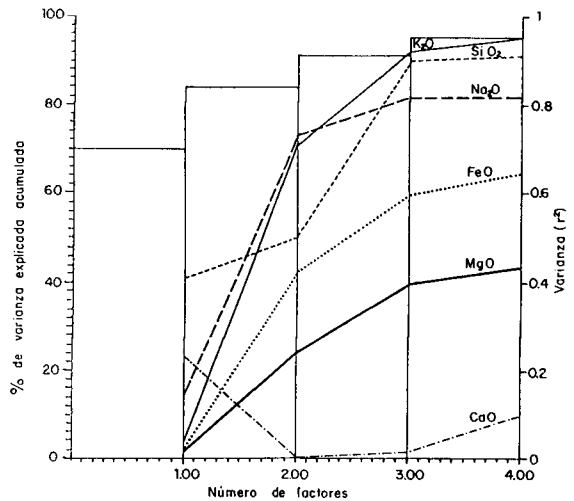


Fig. 7.2.—Diagrama factor-varianza.

Por otra parte al verificarse ($FF^T = 1$), las variables químicas pueden expresarse en el espacio de los individuos tipo, como se indica en la figura 7.3.

Si se efectúa una normalización sobre las coordenadas de los individuos en el espacio de los dos factores o individuos tipo principales, y se considera una interpretación de los individuos tipo según la cual el primero de ellos correspondería a una muestra no diferenciada (Cuadro 7.4) y el segundo a una muestra no potásica, se puede establecer la existencia de tres grupos de volcanitas: a) Riodacitas calcisódicas. b) Riolitas s.s. c) Riolitas potásicas.

Estas dos consideraciones tienen su expresión gráfica en la figura 7.4, ya que las muestras se sitúan en

CUADRO 7.4
COEFICIENTES DE CORRELACION PARA MUESTRAS CON ID > 75

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O
Al ₂ O ₃	-0,833					
FeO	-0,730	0,489				
MgO	-0,399	0,238	0,551			
CaO	-0,525	0,247	0,389	0,409		
K ₂ O	-0,045	0,003	-0,831	-0,438	-0,266	
Na ₂ O	-0,263	0,335	0,555	0,290	0,169	-0,860

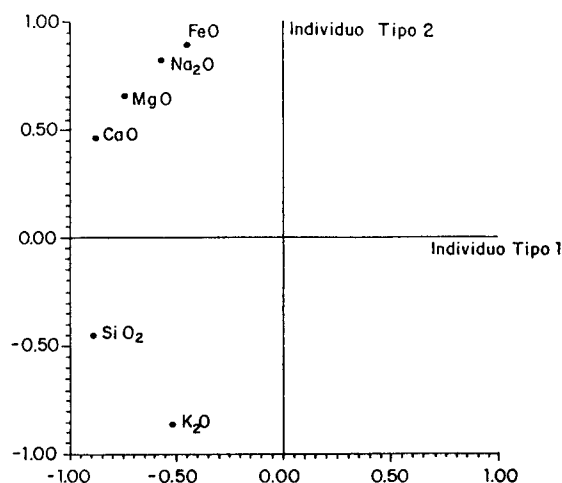


Fig. 7.3.—Representación normalizada de las variables en el espacio de los individuos tipo.

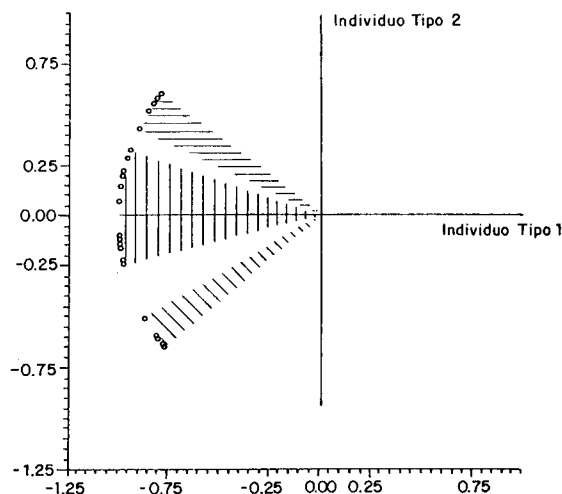


Fig. 7.4.—Proyección normalizada de los individuos en el espacio de los individuos tipo principales.

el semiespacio contrario al individuo tipo principal, y las muestras riolíticas potásicas en el semiespacio contrario al individuo tipo 2 (no potásico).

7.2.4. «ACP en modo-R»

Como las variables SiO₂, Na₂O y K₂O bastan por sí mismas para justificar la existencia de varios grupos en los términos finales de la diferenciación en el

conjunto de los volcanismos ácidos V₁ y V₂, y éstas presentan una marcada incorrelación (ver Cuadro 7.4), excepto en el caso de los álcalis (por lo que este «ACP en modo-R» sólo serviría para separar muestras potásicas de sódicas, que pueden conseguirse con el diagrama Is-Na-K) no es necesario realizar este ACP

7.2.5. Análisis de correspondencias

Los resultados del tratamiento efectuado se recogen en la figura 7.5 que pone de manifiesto la potasificación que han experimentado las muestras de los términos finales de la diferenciación.

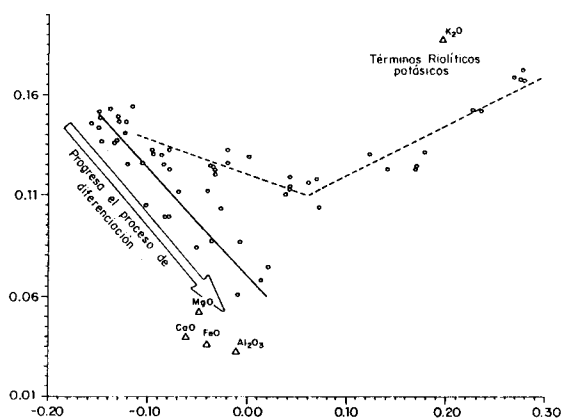


Fig. 7.5.—Resultados normalizados del análisis de correspondencias.

En el AD se ha aplicado el análisis KMEANS del paquete BMD, con el resultado de dos grupos bien diferenciados cuyos «centroides» se especifican en el cuadro 7.5.

CUADRO 7.5
RESULTADOS DEL KMEANS (BMD)

Grupo	Coordenadas del centroide		
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
1 (No potásicas)	67.372	4.298	3.417
2 (Potásicas)	76.689	2.696	4.289

En el cuadro 7.6 se recogen tanto las funciones discriminantes lineales como las cuadráticas, pues si bien en rigor hay que utilizar las últimas no se habría podido conseguir una representación espacial para la clasificación. En el primer caso no se incluye la sílice

CUADRO 7.6
RESULTADOS DEL ANALISIS DISCRIMINANTE

a) Funciones discriminantes lineales		
Variables tenidas en cuenta	Proporción correcta de clasificación	Proporción de clasificación para la validación cruzada
Al ₂ O ₃ , FeO, MgO, CaO	0,931	0,862
Na ₂ O, K ₂ O y PPC		
SiO ₂ , Na ₂ O y K ₂ O		
b) Funciones discriminantes cuadráticas		
Variables tenidas en cuenta	Proporción correcta de clasificación	
Al ₂ O ₃ , FeO, MgO, CaO	0,966	
Na ₂ O, K ₂ O y PPC		
SiO ₂ , Na ₂ O y K ₂ O		

dada la alta correlación que presenta con las restantes variables; y esta tabla pone de manifiesto la importancia de eliminar variables no significativas para definir las funciones discriminantes. La figura 7.6 corresponde a una representación estereográfica de las regiones definidas por las funciones discriminantes lineales.

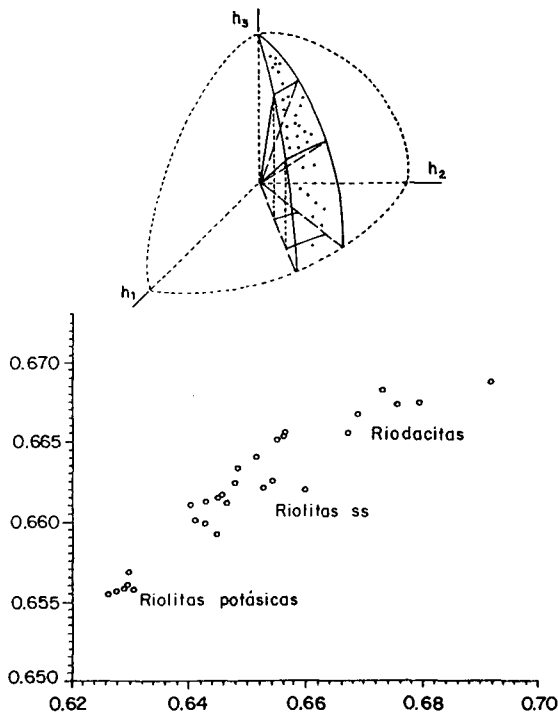


Fig. 7.6.—Representación espacial normalizada de las regiones definidas por el AD. Proyección Lambert.

7.2.6. Agrupamiento y análisis discriminante (AD)

En el apartado 7.2.3 se ha definido la posible existencia de tres grupos, considerando las variables SiO₂, Na₂O y K₂O. Las técnicas de agrupamiento («Clus-

tering») permiten establecer las muestras que pertenecen a cada grupo y los «centroides» correspondientes.

De todas las posibilidades existentes se ha optado por normalizar los datos mediante una transformación de raíz cuadrada, con el fin de suavizar posibles valores extremos, utilizando como métrica la euclídea, con lo que en conjunto se opera con la distancia de Batchara, de gran utilidad en análisis porcentuales:

$$d_{ij} = [\sum_k (X_{ik}^{1/2} - X_{jk}^{1/2})^2]^{1/2} \quad (k = 1, \dots, p)$$

De los algoritmos de formación de «clusters» se ha elegido el «single linkage» (formación de «clusters» según el vecino más próximo) al objeto de intentar incluir el efecto de diferenciación, ya que la diferencia existente entre los dos primeros grupos es debida a este proceso.

Los resultados obtenidos no han sido muy satisfactorios dada la escasa diferencia que existe entre los grupos de riódacitas y riolitas s.s., si bien se observa un embrión de este segundo grupo en el dendograma, mientras que se diferencian muy bien las muestras potásicas.

7.2.7. Conclusiones

Desde el punto de vista geoquímico interesa resaltar la existencia de series de evolución volcánicas con diferenciación de términos más básicos a más ácidos, a las que se asocian las mineralizaciones.

Estas series presentan en sus términos finales rasgos diferenciales de evolución, de manera que se produce una potasificación de las riolitas, permitiendo una discriminación y clasificación de las mismas en riódacitas calcisódicas, riolitas s.s. y riolitas potásicas, en función del grado de diferenciación geoquímico y de su contenido en potasio.

Desde el punto de vista estadístico señalar la aplicación de metodologías de investigación que permiten eliminar variables no significativas con objeto de que la discriminación final sea más efectiva, reduciendo tiempos de computación y costes de investigación.

8. CONCLUSIONES GENERALES

El análisis de los trabajos efectuados durante el periodo 1982-1985 en los bloques de la Reserva *Zona de Huelva*, por las empresas adjudicatarias de los mismos, permite afirmar, más allá de las consideraciones sobre la heterogeneidad y falta de uniformidad en la investigación realizada, que los resultados obtenidos, aunque no han sido ciertamente espectaculares, ponen de manifiesto que la aplicación de una metodología general más o menos extendida ofrece más garantías de éxito cuando se consideran detalladamente las características geológicas específicas de cada bloque, se integra el conjunto de informaciones existentes y se restringe la utilización indiscriminada de tecnologías, de probada eficacia en determinados casos pero de dudosa validez en otros.

El hallazgo de mineralizaciones cuya importancia económica está determinándose (por ejemplo: bloques V, VIII y proximidades del XXV), pero con interés técnico indudable por su ubicación en áreas locales sin antecedentes en cuanto a labores mineras y en posición geológica con las características consideradas favorables, según los criterios habitualmente empleados en esta zona, alienta sobre el potencial minero que todavía alberga la Faja Piritica.

Indudablemente este potencial es desigual para los distintos bloques, como lo son los diversos aspectos litoestratigráficos y estructurales, de Norte a Sur y de Este a Oeste, siendo necesario en un futuro inmediato un esfuerzo para aproximar en lo posible las discrepancias existentes en la cartografía geológica y en la petrología, para alcanzar una mejor comprensión y valoración de lo logrado hasta ahora.

Como criterios de prospección, sigue siendo prioritaria la investigación en terrenos del Complejo Volcánico Sedimentario, portador de las mineralizaciones de sulfuros masivos y de manganeso. Quedan eliminadas la mayoría de las áreas con materiales devónicos, en tanto que extensas áreas de Culm permanecen como potencialmente interesantes, tal como se ha demostrado con el descubrimiento de las masas de Neves-Corvo (Portugal) y, recientemente, con el permiso «*Autonomía*», en la provincia de Huelva.

No obstante, hay que tener muy en cuenta aquellas áreas de la *Formación Pulo do Lobo* y aquellas otras ocupadas por sedimentos devónicos cuando cabalgan sobre el C.V.S. De hecho la proyección vertical de la mina de Sotiel se encuentra en terrenos devónicos, al Norte del cabalgamiento del mismo nombre, y el trabajo gravimétrico, realizado por la Dirección General de Minas y de Construcción (capítulo 5), pone de manifiesto la potencialidad e interés de una extensa banda al Norte del mencionado cabalgamiento. Algo análogo ocurre al Norte de La Joya, donde una anomalía gravimétrica se sitúa en

sedimentos *Pulo do Lobo*, inmediatamente al Norte del cabalgamiento existente en esta zona.

Igualmente son interesantes las áreas más meridionales de la Faja Piritica, cubiertas por el Mioceno (por ejemplo: masa del Arroyo de los Frailes, situada al SE de las minas de Aznalcóllar).

Dentro del CVS, todas las mineralizaciones conocidas se encuentran, por lo general, estratigráficamente a techo de los volcanismos ácidos primero y segundo, y ligadas a determinadas facies: pizarras negras carbonosas, como encajante de las masas, rocas tufíticas y cineritas (Tharsis, La Zarza, Sotiel, Aznalcóllar, etc.), jaspes incluidos en la parte superior de la mineralización piritica (Lomero-Poyatos) o a techo de ésta (La Zarza), etc.

La alteración hidrotermal que suele acompañar a las rocas del muro de la mineralización (cloritización, sericitización) cuando ésta se sitúa, bien sobre los centros de efusión ácidos, bien en las cercanías de conos o canales adventicios de surgencias hidrotermales, constituye un criterio más de prospección. A este respecto, según D. Carvalho *et al.* (1976) y J. B. Silva (1980, 1981), la presencia de centros volcánicos puede detectarse por la disposición de la pizarrosidad regional que se amolda en torno a las rocas menos dúctiles que aumentan de espesor hacia dichos centros.

Prácticamente todas las masas conocidas presentan una montera de hierro o «*gossan*» más o menos desarrolladas, vistosas o llamativas, y aunque la antigüedad de la Faja Piritica y su intensa investigación hacen sumamente difícil la localización de una nueva masa mineral, la existencia de mineralizaciones, como las de Herrerías y Nueva Almagrera, con afloramientos de «*gossan*» no superiores a 30 cm obliga a no desechar cualquier manifestación de este tipo.

Los métodos geofísicos constituyen herramientas de considerable eficacia en la prospección. Las características físicas de la mineralización y de su encajante, junto con la topografía y la tectónica condicionan los métodos a utilizar.

Se confirma la utilidad del método magnético, en la versión aeroportada y por extrapolación también en su aplicación pie a tierra, para determinar la profundidad de las volcanitas. Al mismo tiempo, se pone de relieve que no es técnica adecuada para detectar la presencia de mineralizaciones ocultas, si bien su concurso, como método complementario, puede ser útil en problemas muy concretos.

El método electromagnético en el dominio de frecuencias, en las versiones utilizadas durante el periodo analizado, muy sensibles a conductores superficiales, tiene una aplicación limitada en la Faja Piritica.

ca debido a que, después de los trabajos realizados a lo largo de más de veinte años, se puede considerar reconocidos los cien primeros metros de su subsuelo, profundidad que, en el mejor de los casos, son el techo de casi todos ellos.

Se ha confirmado la eficacia de los métodos electromagnéticos en el dominio de tiempos para detectar masas de sulfuros, con claras anomalías sobre yacimientos previamente conocidos. Igualmente se confirma que, como no podía menos de suceder, pizarras carbonosas o grafitosas originan anomalías similares a las producidas por sulfuros. Por otro lado el «efecto de canal» puede originar, en determinados casos, anomalías «fantasmas» cuando se investiga sobre afloramientos del Culm, lo que representa una importante limitación para el método. No obstante es una herramienta muy eficaz en la investigación de la Faja Piritica debido principalmente a su mayor penetración en relación con los métodos de frecuencia. La aplicación de estas técnicas en la testificación de sondeos mecánicos es de gran utilidad, tanto si han sido positivos como negativos, para un reconocimiento completo de su entorno.

Los métodos eléctricos (calicatas, bloques, sondeos eléctricos verticales, inclinados, etc.), han probado su utilidad para detectar conductores aún cuando tropiezan con las limitaciones de ser lenta y costosa su aplicación.

Por su parte el método de Polarización Inducida es insustituible para investigar mineralizaciones diseminadas, y en relación con la Faja Piritica tropieza con la limitación que supone la presencia de pizarras carbonosas y de numerosas diseminaciones sin interés práctico.

El método gravimétrico es el idóneo para investigar depósitos polimetálicos masivos e incluso diseminados cuando el porcentaje de sulfuros es elevado. Un factor limitante, dentro de la Faja Piritica, viene representado por la topografía que en algún paraje hace prácticamente inviable su aplicación, y en todos

los casos su correcta aplicación conlleva rigurosas correcciones y un levantamiento topográfico muy preciso para minimizar el «ruido» y, en consecuencia, apreciar anomalías de pequeña intensidad que, según su longitud, corresponderán a cuerpos profundos de gran tamaño o a pequeños cuerpos cercanos a la superficie. Un tratamiento matemático adecuado aumenta la eficacia del método. Por otro lado su concurso es insustituible para determinar si una anomalía eléctrica o electromagnética es «metálica» o por el contrario ha sido producida por pizarras carbonosas.

Con el fin de facilitar la utilización e integración de los datos gravimétricos producidos por las diferentes empresas, y cara a futuros trabajos de gravimetría, se recomienda referirlos a «datum» internacional en gravedad, llevar la corrección de relieve hasta la zona M de Hammer, relacionarlos con el nivel del mar, en altitudes, y con coordenadas del sistema UTM, en planimetría.

Para facilitar esta homogenización, en lo referente a observaciones de gravedad, la Dirección General de Minas y de la Construcción ha establecido a lo largo y ancho de la Faja Piritica una red de segundo orden con 31 bases gravimétricas enlazada a la R.G.F.E.-73 y, a través de ésta, a la I.G.S.N.-71 que facilita la referencia a dicha Red Fundamental de los levantamientos parciales con detalle minero que se efectúen en esta provincia metalogénica. Dicha red se encuentra enlazada con la red portuguesa para que sirva de apoyo a un eventual levantamiento que en el futuro pueda hacerse del Cinturón Piritico Ibérico.

Los métodos geoquímicos de exploración han sido aplicados en la Faja Piritica con resultados no muy alentadores, hasta el momento.

En la actualidad se realizan estudios para la determinación de elementos indicadores de las alteraciones de carácter hidrotermal y de las distintas zonas, ricas en determinados elementos, de las mineralizaciones de sulfuros.

9. BIBLIOGRAFIA

- Bard, J. P. & Fabries, J. (1970): «Aperçu pétrographique et structural sur les granitoides de la Sierra Morena occidentale (Espagne)», *Bo. Geol. Min.*, 81, 226-241.
- Bard, J. P.; Capdevilla, R.; Matte, P., y Ribero, A. (1973): «Geotectonic Model for the Iberian Variscan Orogen», *Nature Physical Science*, 241, 15 p., 50-52.
- Boogaard, M. (1963): «Conodonts of Upper Devonian and Lower Carboniferous age from southern Portugal», *Geol. en Mijnb.*, 42, 8, 248-259, Gravenhage.
- (1967): *Geology of the Pomarão region (Southern Portugal)*, Grafisch Centrum, Deltro, 113 p.
- Boogaard, M. & Schermerhorn, L. J. G. (1975): «Conodont faunas from Portugal and southwestern Spain; Part 2. A Famennian conodont fauna at Cabezas del Pasto; Part 3. Carboniferous conodont at Sotiel Coronada», *Scr. Geol.*, 1-43, Leiden.
- Borradaile, G. J. (1978): «Transected folds; a study illustrated with examples from Canada and Scotland», *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 89, 481-493.
- Bouma, A. H. (1962): «Sedimentology of some flysch deposits», *Elsevier*, Amsterdam, 168 p.
- Carvalho, D. (1979): «Geologia, metalogenia e metalogia da investigação de sulfuretos polimetálicos do Sul de Portugal», *Com. Serv. Geol. Port.*, 65, 69-191.
- Carvalho, D.; Correia, H. & Inverno, C. (1976): «Contribuição para o conhecimento geológico do Grupo Ferreira-Ficalho. Suas relações com a Faixa Piritosa e Grupo Pulo do Lobo», *Mem. Not. Univ. Coimbra*, 82, 145-169.
- Delgado, J. F. N. (1910): «Terrains paléozoïques du Portugal. Etude sur les fossiles des schistes à Néréites de San Domingos et des schistes à Néréites et à Graptolites de Barrancos», *Mem. Comm. Serv. Geol. Port.*, Lisboa.
- Doestsh, J. (1953): «Introducción a un estudio del término municipal de Puebla de Guzmán, en la provincia de Huelva», *Bol. Inst. Geol. Min. España*, 65, 35-218, Madrid.
- Ericson, D. B. (1952): «Turbidity currents and sediments in north Atlantic», *B. A. Petrol.*, March, 489.
- Ericson, D. B.; Ewing, M.; Wollin, G. & Heezen, B. C. (1961): «Atlantic deep-sea sediment cores», *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72, 2, 193-286.
- Febrel, T. (1966): *Estratigrafía, tectónica y petrografía en la zona de Calañas (Huelva)*, Pub. E. N. Adaro de Inv. Min.
- (1968): «Mapa geológico de España 1:50.000, Hoja 959. Calañas», *Inst. Geol. Min. España*, Madrid.
- Fernández Alonso, F. (1984): «La geofísica en la investigación minera: Evolución histórica, bases para su aplicación y estado actual de la metodología», I Congreso Español de Geología, tomo V, p. 379-395.
- Fernández Santin, S. & Hernández Pacheco, A. (1981): *Cálculos y diagramas geoquímicos*. Apuntes de la Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.
- Frischmuth, E. (1968): «Sedimentation und Tektonik in des Subvariszischen Vortief von Süd-Portugal», *Münster Forsch. Geol. Paläont.*, 4, 1-99.
- Gillavry, H. J. Mac (1961): «Deep or not deep, fore-deep or "after-deep"», *Geol. en Mijnb.*, 40, 4, 133-148.
- (1961): «The Upper Paleozoic of the Baixo Alentejo Southern Portugal», *C. R. Quat Cong. pour l'Avancement des Etudes des Etudes de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère (Heerlen, 1958)*, 2, 395-408.
- Halsall, C. (1988): *The relationship between intrusive magmatism, volcanism and ore genesis in the Iberian Pyrite Belt. Current Research on the genesis, exploration and exploitation of mineral deposits*. Geology Department, Imperial College.
- Höllinger, R. (1959): «Beitrag zur Kenntnis der Geologie im Südwesten der Provinz Huelva», *Unveröff. Diss.*, 168 p., Munster.
- Hubert, J. (1962): «Grain-size frequency distribution of deepsea terrigenous sands and silts western North Atlantic», *B. S. G. Amer.*, 76A.
- Instituto Geográfico y Catastral (1975): *Red Gravimétrica Fundamental Española 1973*, Madrid.
- (1976): «Mapas Gravimétricos», II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, Barcelona.
- IGME (1976): *Estudio geológico-minero, a escala 1:10.000, en el flanco norte del anticlinal de Puebla de Guzmán. I-958/1*, Colección Informe.
- (1982): *Síntesis geológica de la Faja Piritica del SO de España*.
- (1984): *Informe sobre los trabajos de infraestructura geológica realizados por el IGME en la Faja Piritica (nov. 1983 a julio 1984)*.
- Klován, J. E. (1976): «A generalization of extended Q-mode factor analysis to data matrices with variable run sums», *Mathemat. Geol.*, 13, 3.
- Klován, J. E. & Imbrie, J. (1971): «An algorithm and FORTRAN-IV program for large-scale Q-mode factor analysis and calculation of factor scores», *Mathematical Geology*, 3, 1, 61-67.
- Lécolle, M. (1970): «Note préliminaire sur le métamorphisme et la tectonique de la Province pyritocuprifère d'Huelva (Espagne). Consequences pétrologiques», *C. R. Acad. Sci. Paris*, 270, Sér. D, 1563-1566, Paris.
- (1972): «Successions lithologiques et stratigraphiques dans la province d'Huelva (Espagne). Position

- des minéralisations manganésifères et pyriteuses», *C. R. Acad. Sci. Paris*, 274, 505-508, Paris.
- Lotze, F. (1945): «Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta», *Geotekt. Forsch.*, 6, 78-92, Berlin.
- Mardia, K. V. (1972): «Statistics of directional data», *Academic Press. New York*.
- Meseguer Pardo, J. (1944): «El devoniano en la provincia de Huelva», *Not. Com. Inst. Geol. Min. España*, 12, 67-74, Madrid.
- Nery Delgado, J. F. (1876): «Terrains Paléozoïques du Portugal. Sur l'existence du terrain Silurien dans le Baixo-Alentejo», *Mem. Sec. Trab. Geol.*, 33 p., Lisboa.
- (1905): «Contribuições para o estudo dos terrenos paleozoicos», *Comm. Ser. Geol. Port.*, 6, 56-122, Lisboa.
- Niggli, P. (1954): *Rocks and Mineral Deposits* W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Oliveira, J. T. (1983): «The marine carboniferous of south Portugal. A stratigraphic and sedimentological approach», *Mem. Serv. Geol. Port.*, 29, 3-37.
- Oliveira, J. T.; Horn, M. & Paproth, E. (1979): «Preliminary note on the stratigraphy of the Baixo Alentejo flysch group carboniferous of southern Portugal, and on the paleogeographic development compared to corresponding units in NW Germany», *Com. Serv. Geol. Port.*, 65, 151-168.
- Oliveira, J. T.; Horn, M.; Kullman, J. & Paproth, E. (1985): «The stratigraphy of the Upper Devonian and Carboniferous sediments of Southwest Portugal», *Int. Cng. Strat. Geol. Carb. Madrid 1983, Comp. Rend.*, 1, 107-120.
- Perdigão, J. C. (1961): «Nereites do Baixo Alentejo», *Comunic. Serv. Geol. Port.*, 45, 339-363, Lisboa.
- Pfefferkorn, H. W. (1968): «Geologische Gliederung und Faziesverhältnisse des Gebietes zwischen Serpa und Mértola (Sud-Portugal)», *N. JB. Geol. Paläont. Mh.*, Stuttgart, 89-99.
- (1968): «Geologie der Gebietes zwischen Serpa und Mértola (Baixo Alentejo, Portugal)». Tesis Doctoral, Univ. of Münster, *Münst. Forsch. Geol. Paläont.*, 9, 143.
- Pruvost, P. (1912): «Sur la présence de fossiles d'âge Devonien supérieur dans les schistes à Nereites de Sam-Domingos», *Comunic. Com. Serv. Geol. Port.*, 9, 58-68, Lisboa.
- Rambaud Pérez, F. (1969): «El sinclinal carbonifero de Río Tinto Huelva y sus mineralizaciones asociadas», *Mem. Inst. Geol. Min. España*, 71, 229 p., Madrid.
- Ribeiro, A. (1980): Introduction à la géologie générale du Portugal. 26.º Cong. Geol. Int. Libro-guia Exc. 016A-045A: 3-45.
- Ribeiro, A. & Silva, J. B. (1983): «Structure of the south Portuguese Zone», *Mem. Serv. Geol. Portugal*, 29, 83-89.
- Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Zbyszewski, G.; Almeida, F. M.; Calvalho, D., y Monteiro, J. M. (1980): «Introduction à la géologie générale du Portugal», *Ser. Geol. Portugal*, 26 Congr. Int. Geol. Paris.
- Routhier, P.; Lécolle, M.; Roger, G.; Aye, F.; Moliere, P.; Boyer, G. & Picot, P. (1977): Amas sulfurés volcano-sédimentaires, La ceinture Sud-Ibérique à amas sulfurés dans sa partie espagnole médiane. Tableau géologique et métallogénique, Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire de Geologie Appliquée, Paris.
- Schermerhorn, L. J. G. (1970): «Mafic geosynclinal volcanism in the Lower Carboniferous of South Portugal», *Geol. en Mijnb. J. Geol. and Min. Soc. of Netherlands*, 48, 6, 439-449, Leiden.
- (1971): «An outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt», *Bol. Geol. Min.*, 82, III-IV, 239-268, Fig. 3, Madrid.
- (1975): «Spillites, regional metamorphism and subduction in the Iberian Pyrite Belt. Some comments», *Geol. en Mijnb.*, 54, 1-2, 23-35, Leiden.
- (1975): «Pumpellyite facies metamorphism in the Spanish pyrite Belt», *Petrologie*, I, 1, 71-86, Paris.
- Schermerhorn, L. J. G. & Stanton, W. I. (1969): «Folded overthrusts at Aljustrel (South Portugal)», *Geol. Mag.*, 106, 130-141, Londres.
- Schneider, H. (1941): «Das Kambrium der Herrerías-Mulde bei Cala. Geol. Einleitung zu R. E. Richter, Die Fauna des Unter-Kambriums von Cala in Andalusien», *Abh. Senckenb. Natur. Ges.*, 455, Frankfurt a M.
- Schütz, W.; Ebner, J. & Meyer, K. D. (1987): «Trondjemites tonalites and diorites in the South Portuguese Zone and their relations to the volcanites and mineral deposits of the Iberian Pyrite Belt», *Geol. Rundsch.*, 76, 201-212.
- Seilacher, A. (1967): «Tektonischer, sedimentologischer oder biologischer Flysch», *Geol. Rundsch.*, 56, 1, 189.
- Silva, J. B. (1980): Cartografia estrutural do sector 5 km a NW de Mértola. Faculd. Ciências de Lisboa. (Relatório de estágio científico.)
- (1981): Estudo estrutural dum sector da Faixa Piritosa (região de Mértola). Comun. Encontro de Geociências, Coimbra.
- Strauss, G. K. (1965): Zur Geologie der SW-Iberischen kiesprovinz und ihrer Lagerstätten, mit besonderer Berücksichtigung der Pyrit-grube Lousal, Portugal. These, Univ. de München.
- (1970): «Sobre la geología de la provincia piritifera del Suroeste de la Península Ibérica y de sus yacimientos, en especial sobre la mina de pirita de Lousal (Portugal)», *Mem. Inst. Geol. Min. España*, 77, 266 p.
- Strauss, G. K. & Madel, J. (1974): «Geology of Massive Sulphide Deposits in the Spanish-Portuguese Pyrite Belt», *Geol. Rdsch.*, 63, 1, 191-211, Stuttgart.
- Strauss, G. K.; Roger, G.; Lécolle, M. & Lopera, E. (1981): «Geochemical and geologic study of the volcano-sedimentary sulfide orebody of La Zarza, Huelva Province, Spain», *Ec. Geol.*, 76, 7, 1975-2000.
- Teixeira, C. (1954): Notas sobre geologia de Portugal. O sistema Devónico, Ed. autor, 29 p., Lisboa.
- Vázquez Guzmán, F. (1968): «Contribución al estudio de los yacimientos de hierro del SO de España», *Bol. Geol. Min.*, LXXI-IV, 358-379.
- Zbyszewski, G.; Ferreira, O. V. & Carvalhosa, A. (1964): «Carta geológica de Portugal na escala 1/50.000. Noticia explicativa da folha 46-A-Castro Verde», *Serv. Geol. Port.*, Lisboa.