

**PRIMER CURSO IBEROAMERICANO SOBRE LA  
INFRAESTRUCTURA GEOLÓGICA Y EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE**

**"LA FAJA PIRÍTICA ESPAÑOLA. METALOGENIA.  
EXPLORACIÓN. EXPLOTACIÓN. APROVECHAMIENTO DE  
SUS MINERALES"**

**Alejandro Sánchez Rodríguez**

**Septiembre, 1996**

## **INTRODUCCION**

Importancia por su historia minera. Datos de actividad anterior al 2.000 a.C.

Más de 30 Mt de escorias de una metalurgia orientada fundamentalmente a los metales preciosos y al cobre.

Importancia por sus reservas (tabla 1).

Más de 80 depósitos conocidos y unos recursos que superan los 1.700 Mt (extraídos unos 250 Mt). Suponen 14,6 Mt de Cu, 13 Mt Pb, 35 Mt de Zn, 46.000 t de Ag, 880 t de Au. Esto sin mencionar el contenido en metales de los yacimientos considerados tradicionalmente como piríticos.

La Faja Pirítica comparada con otras provincias clásicas adquiere la categoría de "monstruo" (Fig.1).

Es uno de los distritos mineros más antiguos del mundo, con unos 4.500 años de actividad extractiva.

Merece la pena hacer un rápido repaso de su historia:

3.000 años a. C. se produce la llegada al S.E. de la Península de buscadores de metales procedentes de Oriente.

Hacia el 2.700 a. de C. ya hay una industria metalúrgica incipiente.

En el 2.500 a. de C., que corresponde al comienzo del período Neolítico, en Occidente, se inicia la actividad minera en el SO. Colonizadores pretartésicos introducen las técnicas de la explotación minera y la industria metalúrgica. Se buscaba, sobre todo, la plata (patrón de cambio).

En el 1.200 a. de C. se produce un desplazamiento de los pueblos del mar hacia occidente (fin de Troya, del imperio Hitita y de Creta).

A la región que nos ocupa llegan los tirsetanos, buscando metales y establecen una colonia tirsetana o tartésica que acabará por extenderse a toda Andalucía, llegando incluso hasta el valle del Tajo.

El mundo tartésico mantiene sus relaciones comerciales con los fenicios, por mutuo interés lógicamente. Las fuentes clásicas hacen mención de la cultura tartésica: textos bíblicos.

Estrabón, Plinio.

Para neutralizar la creciente influencia de los navegantes griegos, los fenicios establecen un monopolio de navegación en el Mediterráneo occidental que perjudica notablemente a los tartesos. Pero, al decaer la influencia de los fenicios, hacia el año 700 a. de C. los griegos inician una etapa de floreciente comercio con los tartesos (580 a. de C.) que se verá interrumpida con la llegada de los cartagineses (535 a. de C.).

La cultura tartésica desaparece y con ella la actividad minera y metalúrgica.

La siguiente etapa de apogeo minero-metalúrgico se inicia en el año 43 a. de C., con la romanización de la Bética y se extenderá hasta comienzos del siglo V.

La actividad minera de los periodos tardorromano, visigótico y medieval está poco documentada, pero indudablemente existió demanda y oferta de metales básicos procedentes de esta región. Sí existe información sobre la extracción, durante el dominio árabe, de minerales secundarios, como sulfatos y carbonatos, para la farmacopea y las industrias textiles y del curtido de pieles.

El redescubrimiento de Río Tinto se produce en el siglo XVI, Fray Diego Delgado, por encargo de Felipe II, realiza una inspección sobre el terreno.

La actividad es escasa hasta llegar al siglo XVIII en el que los trabajos adquieren mayor importancia.

En el siglo XIX se abren explotaciones por doquier. De esta época son los informes de Gonzalo Tarín, Ezquerria del Bayo, Luciano Escobar, etc.

El francés Ernesto Deligny es el impulsor de la exportación de minerales piríticos a través del puerto de Huelva. Crea la compañía de Tharsis, más tarde asociada con un grupo escocés.

Las iniciativas de Deligny animan a otras compañías a la solicitud de concesiones mineras.

Inicialmente la actividad se centra en la recuperación del cobre, pero más tarde se amplía al azufre al agotarse los depósitos italianos.

Las piritas españolas serán la fuente inagotable de cobre y azufre que atienda las crecientes necesidades de metales y ácido sulfúrico en la pujante industria europea.

Tras la serie de altibajos producidos por las dos guerras mundiales, las producciones de piritas aumentan hasta los años 70 y desde 1979 diversas causas (cierre de la D.K.H., problemas medioambientales, plantas de depuración, excedentes de ácido sulfúrico...) provocan un paulatino descenso hasta llegar a la situación actual.

A partir de 1979, se ponen en marcha diversos proyectos de explotación y aprovechamiento de sulfuros complejos, que, en nuestros días, se han visto afectados por el descenso de las cotizaciones de los metales básicos.

El gran revulsivo para el relanzamiento de la exploración minera en la zona fue el descubrimiento de Neves-Corvo en 1977 y su puesta en marcha en 1989 como mina de cobre y estaño.

- **EL TOTAL DE LOS RECURSOS DE LA FPI SE ESTIMAN EN MÁS DE 1.000 Mt DE MINERALES CON EL SIGUIENTE REPARTO:**

\* *En la parte española*

Piritas (incluidas las cobrizas) .....	208 Mt
Sulfuros complejos masivos.....	138,1 Mt
Mineral cuprífero diseminado.....	281,7 Mt
Gossan de oro y plata.....	47,3 Mt
	-----
	675 Mt

\* *En la parte portuguesa*

Piritas (incluidas las cobrizas).....	284,3 Mt
Cobrizo rico (aprox. 8% Cu).....	30,9 Mt
Mineral de estaño-cobre.....	2,9 Mt
Sulfuros complejos.....	49,6 Mt
	-----
	367,7 Mt

TABLA 1

## **MARCO GEOLÓGICO**

La Faja Pirítica Ibérica representa la unidad estructural más septentrional de las que constituyen la Zona Surportuguesa (Lotze, 1945) del Macizo Ibérico o Hespérico (Extremo suroriental de la Cadena Hercínica Europea, Fig.2).

Recientemente se ha definido una nueva zona, conocida como Zona Pulo do Lobo (Quesada 1991), que ocupa el área intermedia entre la Zona Surportuguesa y el resto del Macizo Ibérico (Fig.3) y cuyas características oceánicas implican la existencia de una sutura en dicha ubicación. (Munhá et al. 1986; Quesada 1991).

En opinión de estos autores, la ZSP representa el margen de un bloque continental, diferente del Bloque Ibérico, que colisionó con este último durante el Paleozoico superior. El proceso de convergencia, que denominamos orogenia hercínica, tuvo una etapa inicial durante la cual se eliminó la cuenca oceánica que separaba ambos bloques continentales, mediante subducción bajo el Macizo Ibérico (relictos de la cual han quedado preservados en la Zona Pulo do Lobo), y culminó con la colisión de los mismos, durante la cual produjo la obducción de la Zona Ossa-Morena sobre la placa inferior (Zona Surportuguesa), así como la deformación penetrativa de ambos bloques.

Las diferentes unidades estructurales que conforma la ZSP corresponden actualmente a mantos de corrimiento (Oliveira, 1990; Silva, 1990), caracterizados por una estratigrafía particular. La FPI corresponde al manto más alto, más interno y más antiguo de la secuencia y su rasgo volcánico-sedimentario de edad Carbonífero inferior, al que se asocian las notables mineralizaciones de sulfuros masivos que dan nombre a la unidad.

Desde el punto de vista estructural, tales mantos aparecen internamente imbricados, especialmente la FPI, que es el más interno y en el que el despegue basal se ubica en la secuencia estratigráfica del Devónico superior, razón por la cual no afloran rocas más antiguas.

## **LITOESTRATIGRAFÍA**

Con carácter regional se reconocen tres secuencias estratigráficas diferentes que representan tres estadios sucesivos en la evolución del margen continental del Bloque Surportugués (Quesada, 1991).

- 1.- Una secuencia de plataforma, que representa una fase de margen pasivo de dicho margen continental, previa a su colisión con el borde del Bloque Ibérico. El grupo PQ sería el representante de esta secuencia en la FPI.
- 2.- Una secuencia de colapso de la plataforma, registrada únicamente en la FPI por el desarrollo del CVS, producida durante los estadios iniciales de la colisión de la ZSP con el Bloque Ibérico.

- 3.- Una secuencia "flyschoide" (grupo "culm"), sinorogénica, que rellenó la cuenca de antepaís en que se transformó la plataforma preexistente, como consecuencia de la obducción de las unidades meridionales del Bloque Ibérico sobre la misma. Esta secuencia comienza con unos depósitos condensados, muy fosilíferos, formados durante el hundimiento elástico de la plataforma, previo a la llegada de los depósitos turbidíticos.

Estas tres secuencias tectono-estratigráficas son fuertemente diacrónicas, como lo fueron los procesos tectónicos que dieron lugar a ellas (Quesada, 1991). Así, las facies de plataforma son de edad Devónico medio-superior en la FPI (Van den Boogaard 1967, Van den Boogaard et al. 1980 y 1981, Lake et al. 1986), pero persistieron hasta el Namuriense en las unidades más meridionales (Dominio del Sur de Portugal; Oliveira, 1983, 1990). El CVS varía en edad entre Devónico superior y Viseense medio, y la base del "culm" varía desde Viseense superior en la FPI hasta Westfaliense inferior en el dominio del Sur de Portugal, el manto más externo de ZSP (Oliveira, 1990).

Actualmente la estratigrafía del sector español de la Faja Pirítica está en proceso de revisión. Si bien, la subdivisión clásica de Schermerhorn (1971) en tres conjuntos continúa teniendo validez, se cuestionan las correlaciones establecidas, sobre todo en el C.V.S. (Fig.4).

#### Grupo PQ, Devónico Superior

Aparece en los núcleos de los anticlinales, está formado por pizarras y cuarcitas interestratificadas y escasos conglomerados. Las cuarcitas predominan hacia el techo de la serie.

En el techo aparecen niveles calcáreos (calizas bioclásticas), con fauna que se utilizó para su datación.

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

Los niveles calizos se presentan en afloramientos discontinuos, pero llegan a alcanzar 4 km de corrida, aparecen interestratificados en un nivel pizarroso de gran continuidad.

#### Devónico-Carbonífero

En Portugal, esta unidad corresponde a los mantos de Galé-Celá y Mértola, pertenecientes a los conjuntos alóctonos (rama Norte).

Representan la sedimentación, dentro de la Zona Surportuguesa, en aquellas cuencas relativamente alejadas de los focos volcánicos y por tanto con escasa presencia de

materiales volcánicos. Equivale a un cambio lateral de facies del CVS.

Como ya hemos dicho, la sedimentación es continua desde el Devónico hasta el Visense superior.

La litología, esencialmente detrítica, está constituida por pizarras, grauvacas, cuarcitas, lentejones aislados de calizas, jaspes y rocas volcánicas (lavas y tobas ácidas y alguna básica).

Son característicos los nódulos de manganeso.

### Complejo Volcanico Sedimentario

También llamado volcánico silicioso por Schermerhorn. Comprende rocas volcánicas ácidas y básicas (algunas intermedias) interestratificadas con materiales sedimentarios.

Datado paleontológicamente (Boogard, Schermerhorn, Oliveira), se extiende desde Fameniense superior a Visense superior.

En la antiforma de Puebla de Guzmán (sector central de la FP) se han distinguido tres episodios volcánicos (Strauss y Madel, 1974). Posteriormente este modelo se ha querido extender a otras zonas, pero las correlaciones son muy inciertas (Fig.5).

Siguiendo este modelo podemos decir que:

El volcanismo 1º o V<sub>1</sub> está constituido por rocas piroclásticas gruesas y finas y lavas riolíticas, el V<sub>2</sub> por piroclastos y lavas riolíticas y riodacíticas y el V<sub>3</sub> por tobas redepositadas y pizarras silíceas.

Las lavas básicas aparecen interestratificadas entre V<sub>1</sub> y V<sub>2</sub>.

Bajo el V<sub>3</sub> se observa un horizonte de pizarras moradas, que en la antiforma de Puebla de Guzmán se ha utilizado como nivel guía, pero que en otras áreas puede aparecer más de una vez en la columna estratigráfica.

Entre V<sub>1</sub> y V<sub>3</sub>, los materiales volcánicos aparecen interestratificados con materiales sedimentarios variados: pizarras negras, siltitas, areniscas, jaspes, calizas, nódulos de Mn, etc.

Los "sills" y diques de diabasas intruyen en la primera mitad de la secuencia volcánica.

Las mineralizaciones de sulfuros aparecen asociadas al V<sub>1</sub> (a techo), pero en otras áreas, al no distinguirse los tres episodios volcánicos, esta afirmación es cuestionable.

Las mineralizaciones de manganeso suelen aparecer en el V<sub>2</sub>, denominado por algunos autores Formación Manganesífera.

El V<sub>3</sub> es estéril desde el punto de vista metalogenético.



## **MODELO EVOLUTIVO** (según Quesada 1996).

La subdivisión en unidades estructurales de escala regional que se propone para la Faja Pirítica, se basa en dos argumentos principales: por una parte, en la presencia de discontinuidades estructurales (fallas, s.l.) entre ellas y, por otra, en la existencia de cambios más o menos importantes en las características geológicas (estratigráficas, petrológicas, estructurales, metalogénicas) a través de sus límites.

Así como la subdivisión transversal, en bloques (Occidental, Central y Oriental), se fundamenta principalmente en los cambios en las características estructurales, la subdivisión a favor de fracturas longitudinales se basa fundamentalmente en cambios notables en las características estratigráficas, petrológicas y metalogénicas, además de las estructurales., En función de la importancia relativa de dichos cambios, las diversas unidades longitudinales, en que se divide cada uno de los bloques, han sido jerarquizadas en dominios, mantos y escamas.

Las unidades que constituyen el Dominio Septentrional, en cada uno de los bloques, se caracterizan por presentar un Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS; Schermerhom, 1971), formado mayoritariamente por rocas volcánicas, predominantemente lávicas y submarinas, intercaladas con sedimentos (en parte epiclásticos) muy finos, sin presencia de rocas sedimentarias (cuarcitas) de fuente claramente continental. En el Dominio intermedio, por su parte, el CVS consiste en rocas ácidas, predominantemente piroclásticas y epiclásticas, entre las que abundan las ignimbritas, hecho que implica la presencia de procesos eruptivos explosivos y subaéreos. Finalmente, el CVS del Dominio Meridional está constituido principalmente por rocas epiclásticas submarinas (vulcanismo masivo sólo local) en las que se intercalan, muy significativamente, rocas sedimentarias (cuarcitas y cuarzowackas) que indican una conexión con el margen continental emergido.

Estos hechos sugieren que, al menos durante el período de formación del CVS, la cuenca sedimentaria preorogénica de la Faja Pirítica, debía estar compartimentada en subcuencas con características y condiciones de depósito diferentes, probablemente limitadas por accidentes tectónicos (fallas sinsedimentarias). Se interpreta que la reactivación durante la orogenia hercínica de dichos accidentes ha permitido la individualización como dominios, mantos o escamas de lo que en origen eran probablemente cuencas, "horsts", subcuencas o simplemente cambios de facies. Estamos pues en presencia de un caso típico de inversión tectónica, cuya constatación permite hacer una estimación de las condiciones previas a la deformación, al menos en aquellos casos en que las diferencias son más notables. Así, en la Fig.6 se interpreta cual debió ser la situación paleogeográfica/paleotectónica en tiempos del CVS de los Dominios Septentrional, Intermedio y Meridional, en el caso particular del Bloque Central. Este tipo de reconstrucción puede intentarse a todas las escalas, siempre que se disponga de los datos necesarios (estratigráficos, estructurales, metalogénicos, petrológicos, etc.)

Un hecho de observación de especial relevancia reside en la localización de la mayor parte de los yacimientos y muy probablemente de todos ellos en origen, en entornos con deformación especialmente intensa, en relación con la que presentan otras partes de las unidades en que se ubican. En muchos casos, además, la zona mineralizada forma parte de la zona de falla que constituye uno de los límites de su unidad correspondiente. Interpretamos este hecho en relación con las características especiales que presentaban las zonas mineralizadas, anteriormente a la deformación hercínica, y que favorecieron la localización preferencial de niveles de despegue en su entorno durante la inversión tectónica de la cuenca.

## METALOGENIA

### TIPOLOGÍAS

#### SULFUROS MASIVOS

Los depósitos de sulfuros masivos o masas de sulfuros, son concentraciones de morfología estratiforme o lentejónar, con pirita predominante, además de otros sulfuros.

En general se sitúan a techo o próximos al techo de los materiales felsíticos que constituyen el final de un ciclo volcánico (etapa de enfriamiento). Después veremos que hay variaciones. Observando las columnas litoestratigráficas de varios yacimientos, se encuentran a veces diferencias notables de posición en cuanto al episodio portador de la mineralización. En otros casos es más fácil establecer una correlación.

A escala regional, se constata que las mayores concentraciones de yacimientos se producen en el entorno de las zonas de deformación más intensa. C.Quesada (1996) lo interpreta por las características que tendrían las zonas mineralizadas antes de la deformación; características que posibilitarían la localización de niveles de despegue durante el proceso de inversión tectónica.

Los yacimientos suelen localizarse en flancos muy pendientes de estructuras, otras veces en fondos de sinclinales y algunos en estructuras más tendidas (v.g.Neves). Es muy importante tener en cuenta esto en el momento de hacer una modelización gravimétrica.

Según la proximidad a los centros volcánicos (Fig.7), Carvalho (1979) y Barriga (1983), posteriormente, establecieron la siguiente clasificación:

- Autóctonos (enraizados en un "stockwerk")
- Transicionales.
- Alóctonos (redepositados, sin "stockwerk").

En el primer tipo el depósito aparece próximo a un centro volcánico, sobre rocas volcánicas y con el muro en "stockwerk" (o "stockwork"), intensamente cloritizado y silicificado. A techo la alteración suele ser cuarzo-sericitica. Son ejemplos: Río Tinto, La Zarza, Feitais, Corvo.

En el segundo tipo el depósito se sitúa en rocas volcánicas no tan intensamente alteradas. Ejemplos: Sotiel, Moinho.

El tercer tipo no tiene una relación directa con rocas volcánicas, e incluso puede estar estratificado con rocas sedimentarias. Estos depósitos no tienen "stockwerks", no tienen alteraciones hidrotermales y pueden mostrar estructuras sedimentarias.

En cuanto al tamaño, G.Fernández (1974), estableció la siguiente clasificación:  
Tabla 2.

Strauss (1977) definió tres tipos fundamentales de mineralización:

1. Pirita masiva polimetálica, singenética sedimentaria, con un 35-51% de S.
2. Pirita diseminada polimetálica, singenética sedimentaria, "azufrones", con menos del 35% S.
3. "Stockwerk" pirítico apigenético. Esencialmente en rocas de muro intensamente cloritizadas. Con contenidos en azufre del 5 al 25%.

Posteriormente (G.Ruiz de Almodóvar, 1990) se han propuesto clasificaciones más complejas. Tabla 3.

Los contenidos medios son: Tabla 4.

Asimismo aparecen trazas (decenas a centenas de p.p.m.) de otros metales, como Sn, Cd, Co, Hg, Bi, Sb etc..

Evidentemente hay excepciones, como Neves-Corvo, con altos contenidos en Cu y Sn. Las leyes altas en Cu aparecen en depósitos pequeños. La alineación más al N de la Faja, en España, es un ejemplo.

Las estructuras más frecuentes: masiva, bandeada, en "stockwerk", diseminada o azufrón. En una misma masa pueden aparecer varias, si es, por ejemplo, autóctona, tendrá "stockwork", masiva, bandeada, etc..

En algunas masas se pueden observar, a escala mesoscópica, estructuras sedimentarias (concretamente estructuras turbidíticas en Tharsis) que se explican por desplazamientos de los sedimentos en etapas precoces.

A escala microscópica, los minerales masivos pueden presentar diversas texturas: masiva de grano fino, bandeada con laminación, detrítica, coloforme, framboidal...

Aunque frecuentemente, por efecto del metamorfismo, aparecen recristalizaciones totales o parciales, removilizaciones.... En las zonas de deformación más intensa muestran texturas miloníticas.

También es frecuente que minerales masivos de grano fino, después de una oxidación epitáxica de una sección pulida, presenten texturas granoblásticas.

La estructura en "stockwerk" (o "stockwork"), que como hemos visto puede aparecer en masas enraizadas o como el resto del muro de una masa, generalmente está constituida por un entramado de venillas de Py+Cp+Qz+clorita.

Usualmente se ha considerado a los "stockwerks" como vías de aporte de soluciones mineralizadoras ligadas a un foco volcánico.

Las masas distales no presentan "stockwerks".

Las rocas encajantes de los "stockwerks" muestran intensas alteraciones hidrotermales: cloritización, silicificación, sericitización....

Los "stockwerks" muestran morfologías muy variadas, desde una red de tenues venillas milimétricas, hasta vetas de potencia centimétrica y contornos netos.

Las venas son predominantemente paralelas al plano paleo-horizontal y también se ven orientaciones controladas por el campo de esfuerzos existentes en el momento del emplazamiento.

Igualmente, hay que tener en cuenta la presencia de falsos "stockwerks", es decir, zonas con una red de fracturas rellenas por sulfuros, que se han producido en etapas posteriores de deformación y con removilización de sulfuros (circulación de fluidos).

Esfuerzos de tipo "pull-apart" y apertura de fracturas.

## JASPES MANGANESIFEROS

En estrecha relación con los sulfuros aparecen lentejones de jaspes (chert) con óxidos y peróxidos secundarios de Mn (por alteración de rodonita y rodocrosita). Se dejaron de explotar hace unos 20 años y no alcanzaron unas producciones relevantes.

Aparecen interestratificados en tobas, tufitas, pizarras silíceas (en general facies finas), pero no parecen constituir un nivel guía, como se pensaba hace algún tiempo. Aunque sí pueden ser indicadores (Fe, Mn) de la proximidad de sulfuros.

Probablemente (Carvalho, 1979) las rocas más características de la Faja Pirítica son los jaspes. Afloran en lentejones que, a veces, son consecuencia de las deformaciones (son "boudines").

Para Barriga y Oliveira (1986) estas rocas son precipitados hidrotermales en el fondo marino; acumulaciones de geles de sílice con Fe y Mn.

Las mineralizaciones aparecen irregularmente distribuidas, en bolsadas y pequeños lentejones (de 1 a 15 m de potencia) y también en nódulos aislados, rellendo huecos, fracturas, etc....

## GOSSANS

Alcanzan un desarrollo considerable y durante siglos fueron el objetivo de la minería.

Son la manifestación externa más patente de un depósito de sulfuros masivos. Formados por meteorización y lixiviación de los depósitos primarios, pueden alcanzar espesores superiores a los 70 m.

En general, hay una pérdida de los elementos más solubles, como el Cu y la Ag, aunque esta última se deposita en la zona de enriquecimiento secundario. Por el contrario, se produce un enriquecimiento residual de los elementos menos solubles, como Au, Ba, Pb y Sn.

Contienen As y Sb que en tiempos históricos entorpecían la metalurgia de la plata.

Existe un "gossan" transportado (finales del Mioceno) en Río Tinto.

Contenidos en Au de 1,8 a 2,5 gr/T. Hoy día constituyen un objetivo para el aprovechamiento del Au.

## INDICIOS FILONIANOS

Son abundantes, de pequeño tamaño, sin interés económico. Hay indicios de Cu, de Pb-Zn y de Sb.

Sin embargo, su estudio puede proporcionar una información valiosa para investigar posibles yacimientos ocultos, que experimentaron procesos de removilización en etapas de fracturación tardías.

## **HIPÓTESIS GENÉTICAS**

La génesis de los depósitos está hoy en día admitida unánimemente como singenética volcanogénica exhalativa. Podemos denominarlos como Sulfuros Masivos Volcanogénicos (SMV), (J.W.Lydon, 1984).

El término masivo significa un contenido superior al 70% de sulfuros, lo que los distingue de otras tipologías como la de los sulfuros diagenéticos.

La relativa abundancia de calcopirita implica temperaturas por encima de 300°C.

La presencia de abundantes rocas volcánicas sugiere un ámbito geológico diferente de otros tipos como los SEDEX, que aparecen en terrenos demarcados por la presencia de rocas sedimentarias con centros esporádicos de volcanismo.

Corresponden al tipo polimetálico, asociado a volcanismo bimodal, de R.W. Hutchinson (1973) y R.W. Hutchinson et al. (1980); ver tablas 5 y 6.

En la génesis de los depósitos juega un papel fundamental la actividad hidrotermal asociada al volcanismo, que se traduce tanto en el depósito de los propios sulfuros, como de los sedimentos silíceos y metálicos y de la alteración de las rocas encajantes (Figs. 8 y 9).

Barriga y Carvalho (1983), concluyen que es aplicable a la Faja Pirítica la hipótesis de génesis a partir de soluciones hidrotermales producidas por circulación convectiva de aguas marinas, a través de rocas permeables con intervención o no de fluidos magmáticos (Figs. 8, 9 y 10).

Los metales podrían ser lixiviados de las rocas encajantes (volcánicas y sedimentarias) y el azufre probablemente procede del agua marina por reducción.

Lydon (1996) establece una interesante comparación entre las dos teorías de posible origen: circulación convectiva de aguas marinas y sistemas magmáticos hidrotermales.

Los procesos de deposición de los sulfuros, sobre los que existe abundante literatura, aparecen reflejados en las figuras (Lydon, 1996).

Figura 11:

Los fluidos hidrotermales con concentraciones significativas de Fe, Cu, Zn, Pb en forma de cloruros complejos, se descargan en un fondo oceánico, donde la precipitación de los sulfuros metálicos es ocasionada fundamentalmente por el enfriamiento que produce la mezcla de los fluidos hidrotermales con el agua marina.

Figura 12:

La anhidrita precipita en la zona de contacto del agua marina con la inyección hidrotermal, formando una corona de material poroso en torno a la chimenea. En esta estructura permeable las soluciones hidrotermales van precipitando los sulfuros.

El gradiente térmico produce una zonación: sulfuros de Cu en el interior y hacia el exterior Zn y Fe.

A medida que disminuye la porosidad de la chimenea los sulfuros son arrastrados en la fumarola hacia el exterior, oxidados o dispersados.

Figura 13:

El colapso de sucesivas chimeneas incrementa la extensión de la zona de alteración hidrotermal en la base del depósito.

El arrastre de agua fría en la pipa de alteración hidrotermal origina la precipitación de sulfuros en el "stockwerk" (Fig.14).

En resumen la secuencia sería: acumulación por un proceso de formación de chimeneas, colapso de chimeneas y cimentación del talud.

Este modelo de depósitos de sulfuros masivos actuales parece aplicable a los depósitos antiguos, al menos en lo que concierne al proceso de deposición.

### **Celdas de convección. Sistemas hidrotermales**

El modelo de las celdas con circulación convectiva está hoy día ampliamente aceptado (Figs.8, 9 y 10), a partir de las observaciones de las dorsales pacíficas (Franchetau, 1979).

La aplicación del modelo requiere algunas restricciones:

- Únicamente las intrusiones someras pueden producir corrientes de convección de los fluidos.
- Alta permeabilidad, es decir zonas de deformación frágil.
- Las celdas de convección forman parte integral de un edificio volcánico submarino.
- Las salmueras hipersalinas son el resultado de la alta temperatura.



- Zona de reacción. El volumen de roca en el que existe interacción por el fluido hidrotermal.

### **Sistemas Magmáticos Hidrotermales**

Teoría que actualmente tiene pocos partidarios. La primera razón es que no se han encontrado firmas magmáticas convincentes en los SMV (Lydon, 1996), (Fig.15).

El argumento básico a favor de la teoría magmática, es que hay un gran número de depósitos de SMV, especialmente los de mayor tamaño que están asociados a centros volcánicos félsicos, que en la mayor parte de los casos constituyen una pequeña fracción del volumen total del cinturón volcánico. Es decir, un tipo petroquímico minoritario alberga la mayoría de los cuerpos minerales.

Pero es difícil probar la filiación magmática de estos yacimientos, porque cualquier firma magmática hidrotermal estará camuflada por la firma de las celdas de circulación convectivas, que se producen en cualquiera de los dos modelos.

Sin embargo, hay características de los sulfuros masivos que se explican mejor por este modelo magmático:

- Asociación de SMV con rocas volcánicas brechoideas
- Alteración aluminosa
- Preservación de los sulfuros.
- Horizontes favorables.
- Ausencia de fauna en el entorno de las chimeneas.

Como conclusiones de las dos teorías:

- Los distritos más productivos aparecen en series bimodales volcánicas en situaciones de arco-isla o cuenca tras-arco (Fig.16).
- Cualquier actividad volcánica submarina produce celdas de convección.
- La descarga de fluidos hidrotermales, en un punto, requiere la presencia de un magma húmedo a poca profundidad, en una zona de deformación frágil.
- Algunas características de los SMV se explican mejor por un sistema magmático hidrotermal que por un sistema que únicamente suponga una circulación convectiva de agua marina.
- Sea cual sea el origen, la importancia en la estrategia de una exploración, sobre todo a escala local, es nula.

## **ISÓTOPOS**

Los estudios de isótopos de azufre en muestras de "stockwerk" revelan un origen marino.

Los valores fuertemente negativos que se obtienen con muestras de pirita diseminada en cherts, se explicarían por una reducción bacteriana del agua marina. Para Arnold (1977), el azufre de los depósitos autóctonos procedería de la lixiviación de las rocas, mientras que en los alóctonos predominaría la componente de agua marina.

Posteriormente, en estudios con muestras de varios yacimientos (Mitsuno et al., 1988, y Kase et al., 1990) se obtuvieron valores positivos y negativos. El predominio de valores negativos se explica por una incorporación gradual del azufre biogénico.

Para Lydon (1996) la signatura isotópica del S no se explicaría bien por ninguno de los dos modelos de génesis propuestos.

Los isótopos de O e H han proporcionado datos más clarificadores: la mayor parte de los fluidos mineralizadores proceden de agua marina, con un pequeño porcentaje de fluidos de origen magmático.

Por otra parte, como ya se ha indicado, los yacimientos son pretectónicos y han experimentado, al igual que las rocas encajantes, una tectónica de cabalgamientos. Estas deformaciones probablemente han provocado una circulación de fluidos, un hidrotermalismo tardío en definitiva, que ha jugado un papel esencial en la configuración actual de los depósitos.

## **ALTERACIONES HIDROTERMALES**

La alteración hidrotermal que acompaña a los depósitos de sulfuros, fue considerada con gran atención hasta los años 60, por las implicaciones que tenía, no solo en las hipótesis genéticas, sino en la exploración. Posteriormente, con el auge de la teoría exhalativa sedimentaria, el hidrotermalismo pasó a un segundo plano.

Actualmente se considera que, si bien los aspectos sedimentológicos son muy importantes en la exploración, la clave para comprender la génesis está en la alteración hidrotermal.

Quién primero hizo estas observaciones fue D.Carvalho utilizando, en el sector Cercal-Odemira, una sistemática parecida a la del estudio de zonación de alteraciones en los depósitos tipo pórfido cuprífero.

La alteración hidrotermal se analiza como una combinación de tres factores: Fluidos mineralizadores, roca encajante y agua marina. El efecto es una paragénesis de

minerales de alteración y una morfología zonal.

Así, las estructuras en "stockwerk" se presentan en las rocas de muro intensamente alteradas hidrotermalmente, la textura original puede desaparecer y la roca se transforma en un agregado de minerales de alteración: cuarzo, clorita, sulfuros, sericita, carbonatos.....

Por supuesto, la alteración puede extenderse a techo y lateralmente.

Barriga y Carvalho (1983) distinguen una alteración de carácter regional y para ellos la presencia en el "stockwerk" de Feitais (Aljustrel) de relictos de cuarzoqueratófido, se explicaría por una alteración regional hidrotermal anterior al depósito de sulfuros.

Esta alteración regional que también se denomina metamorfismo hidrotermal (ya se ha indicado), sería responsable de la génesis de un litotipo: la roca de "stockwerk".

## **DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS**

### **RÍO TINTO**

Se puede considerar, por su historia minera y por el volumen de sus reservas, como el distrito minero más importante de toda la Faja Pirítica Ibérica.

Han aparecido indicios de una minería rudimentaria de época pre-tartésica; correspondiendo al período romano el desarrollo de una intensa actividad minera y metalúrgica.

Después de siglos de inactividad, a mediados del XVIII, la Corona comenzó a interesarse por el aprovechamiento de los minerales cupríferos de Río Tinto y se alcanza el pleno desarrollo en el siglo XIX.

Se crea la Compañía inglesa Río Tinto Company y, como en otras minas de la región, se comienzan a explotar las zonas enriquecidas en Cu, para pasar posteriormente a explotar minerales más pobres y pirita cruda, en una época en que la naciente industria europea se muestra ávida de ácido sulfúrico.

Tras diversos cambios de propietarios, en 1970 se inicia la explotación de los "gossans" para beneficiar el Au y la Ag.

Actualmente, la mina es propiedad de una sociedad anónima laboral (Río Tinto S.A.L.) que continúa la explotación del "gossan" de Cerro Colorado y ha reanudado las actividades en la línea del cobre (concentrados y cáscaras).

Las diversas masas de sulfuros de la zona se sitúan en relación con un anticlinal, de rocas volcánicas, que emerge en el denominado Sinclinal de Río Tinto (pizarras y grauvacas del Culm).

El anticlinal está constituido por un complejo de lavas básicas, en el núcleo, a cuyo techo se sitúan lavas cuarzoqueratofídicas y/o riolíticas y rocas prioclásticas, que pasan a sedimentos de polvos volcánicos hematíticos y pizarras carbonosas del Viseense superior.

Los depósitos de sulfuros masivos aparecen en la mitad oriental del anticlinal, en cuyos flancos se sitúan las explotaciones de San Dionisio, Filón Sur, Planes-San Antonio y Filón Norte (Dehesa, Lago y Salomón) y de Cerro Colorado (Fig.17).

Por los datos de que se dispone hoy día, parece que Río Tinto es el área de la cuenca dónde los procesos mineralizadores tuvieron mayor extensión e intensidad.

Bastan unas cifras:

Zona mineralizada	4 km <sup>2</sup>
Extensión vertical	400 a 500 m
Sulfuros masivos	500 a 600 Mt
	Leyes medias: S 50%; Cu 1%; Zn 2%; Pb 1%; Ag 30 ppm; Au 0,3 ppm;
"Stockwork"	1900 a 2000 Mt
	Leyes medias: S 6 %; Cu 0,15%; Zn 0,15%; Pb 0,6%; Ag 7 ppm; Au 0,07 ppm.

De esta hipotética mineralización, se supone que unos 400 Mt de sulfuros masivos y 400 Mt de "stockwork" fueron alterados y erosionados, de los que quedaron en forma de óxidos unos 100 Mt (F.García Palomero).

Tabla 5

La masa San Dionisio, explotada mediante la Corta Atalaya y Pozo Alfredo, está constituida por dos tipos de mineralizaciones muy diferentes, una del tipo "stockwork" y otra estratiforme masiva.

El "stockwork" de San Dionisio tiene una corrida de 600-700 m en dirección E-O, 200 m de potencia, y 600 m de profundidad. Está formado por vetas irregulares de pirita, calcopirita, blenda, galena, magnetita, cuarzo, clorita, calcita y barita, atravesando las rocas volcánicas. De este "stockwork" se explotan las rocas cloríticas ácidas con alto contenido en cobre, "cloritas", a través del Pozo Alfredo.

En el "stockwork" se define una zonación que comprende tres unidades:

- Chimenea pirítica o núcleo. Mineralización intensa de pirita y algo de calcopirita, con desaparición total de la litología original.
- "Stockwork". Rodeando a la primera zona. Red de venas con sulfuros y contacto claro con el cuerpo masivo suprayacente.
- Envolvente sericitica. Mineralización dispersa, restringida a la rocas volcánicas ácidas, que están intensamente sericitizadas.

A su techo se sitúa la mineralización masiva, con 1.200 m de corrida y 50-60 m de potencia, que está coronada por rocas volcánicas y las pizarras del Culm; su explotación se efectúa por la corta Atalaya.

Esta tiene forma de elipse, con un eje mayor de 1.200 m y menor de 906 m. y una profundidad de 300 m en su parte norte y de 225 m al sur; la cota más baja de la corta se encuentra a unos 170 m sobre el nivel de mar, punto donde se inicia el túnel de conexión a la rampa de acceso a la explotación subterránea de Pozo Alfredo.

La mineralización de Cerro Colorado\_Filón Norte\_Filón Sur (Fig.19), se localiza sobre la charnela, con desplazamiento hacia el flanco sur. Está formada por fragmentos de un lentejón de sulfuros masivos, localizados en dos fondos de pequeños sinclinales, y el flanco sur de la estructura mayor anticlinal y unidos entre sí por masas de "gossan", que demuestra la conexión existente entre los diferentes núcleos de sulfuros antes de producirse la oxidación. Este gossan es el más desarrollado de las tres zonas mineralizadas.

Debajo de este lentejón se presenta un extenso "stockwork", con una zona mineralizada en cobre de 2 200 m de longitud por 1 000 de anchura y 450 m de profundidad (los llamados "pórfidos").

Tiene este "stockwork" algunas particularidades que merecen la pena destacarse:

- En el núcleo se localiza un posible domo riolítico.
- Mineralización de Cu diseminada muy amplia.
- Extensa removilización de esta mineralización favorecida por su posición (cresta de un anticlinal).
- Desarrollo muy fuerte de la alteración supergénica.

La corta, de forma arriñonada, tiene una longitud de 2 500 m, una anchura de 850 m y profundidad de 230 m.

La masa mineral de Planes-San Antonio se sitúa en la terminación oriental de Cerro Salomón (Fig.20). El área de Planes fue explotada intermitentemente desde tiempos romanos hasta 1950, en que el acuñaamiento de la mineralización hizo antieconómica su explotación. En 1962, una detallada investigación geofísica con sondeos mecánicos de reconocimiento puso de manifiesto la prolongación de la mineralización en unos 600 m hacia la parte Este de Planes, que fue denominada San Antonio.

La alteración hidrotermal de las rocas de muro es menos pronunciada que en las otras masas de Río Tinto, que tienen el "stockwork" de la pipa o chimenea volcánica inmediatamente debajo; parece que se precipitó a considerable distancia de la chimenea.

La pirita masiva es compleja, con 1,7% Cu y 3,2% de Pb+Zn, en tanto que el "stockwork" es estéril.

## **THARSIS**

Es otro de los grandes distritos mineros de la FPI.

En conjunto se conocen en el área 16 diferentes depósitos, con tamaños que oscilan de 50.000 t a 55 Mt. Los más importantes: Filón Norte-San Guillermo, Filón Sur, Cantareras-Vulcano, Vieja Almagrera, Nueva Almagrera, y Lagunazo (Fig.21, Tabla 6 y Tabla7).

Hay abundantes restos, como en otros yacimientos de la zona, de épocas pre-romana y romana. Hasta el siglo XIX la zona permanece casi sin actividad minera y es entonces cuando se forma la primera compañía dedicada a explotar los minerales cobrizos. Al agotarse la reserva de minerales enriquecidos, se inicia la explotación de la pirita como mena de azufre, para la fabricación del ácido sulfúrico.

Los yacimientos de Tharsis se habían considerado hasta no hace mucho tiempo como un claro ejemplo de masas distales, por su posición en contacto con rocas volcánicas distales, por la ausencia de un "stockwork" y por la presencia de abundantes estructuras sedimentarias en los sulfuros.

Sin embargo, trabajos posteriores han demostrado lo contrario.

Strauss y Madel (1974) establecieron una secuencia para el Complejo Volcánico Sedimentario de la zona que, hasta la actualidad, no ha sido modificado sensiblemente (Fig.22).

La potencia máxima es de unos 400 m y está constituido por pizarras grises y negras, con intercalaciones de limolitas, tufitas y tobas, entre las que se disponen las rocas volcánicas de carácter ácido con dos intercalaciones básicas.

Esta secuencia se tomó como modelo y se trató de extender al resto de la Faja Pirítica, forzando en no pocos casos las interpretaciones.

El volcanismo inicial V1, de carácter submarino, formado por piroclastos que pasan gradualmente a pizarras grises y negras. Lavas en menor proporción y jaspes en los tramos superiores.

Los sulfuros masivos se encuentran cerca de V1 y bajo el vulcanismo básico, pero encajados en las pizarras negras.

A techo del V1 está el primer volcanismo básico (espilitas y diques de diabasas albitizadas).

Encima aparecen areniscas y cuarcitas, con niveles discontinuos de óxidos de Fe y Mn.

El vulcanismo V2 es bastante parecido al primero (lavas, brechas, aglomerados,...) y sobre él aparece un nivel característico y continuo de pizarras púrpuras y rocas volcanosedimentarias finas y un segundo nivel volcánico básico.

El vulcanismo V3 o "gatos" es también ácido y de carácter subaéreo.

Desde el punto de vista estructural y ciñéndonos al caso concreto de Filón Norte-San Guillermo, en los últimos trabajos realizados por el ITGE, se ha visto que la deformación, en general, tiene las características de los dominios meridionales (Quesada 1996), es decir, apilamiento de mantos, pero con una deformación menos intensa y menos penetrativa que la de los dominios septentrionales, lo que se traduce en la presencia de pliegues y en la preservación de estructuras sedimentarias, limitándose la deformación intensa a los planos de despegue.

En conjunto se considera un apilamiento de tres mantos (Fig.23), apareciendo los sulfuros en la unidad inferior (F.Tornos y E.González, 1996).

Esta interpretación difiere bastante de la que se daba hasta ahora (Strauss y Madel 1974): grandes pliegues isoclinales volcados, con vergencia SSO. La masa de Filón Norte estaría en la charnela de un sinclinal apretado, situado entre un anticlinorio (Devónico al S) y otro al N donde aflora el "stockwork". En el flanco N estaría la masa San Guillermo (Fig.24).

El "stockwork" está desarrollado sobre pizarras y no sobre rocas volcánicas, la alteración hidrotermal no se diferencia claramente. El primer punto donde ha aflorado ha sido en el fondo O de la corta. Geoquímicamente aparece enriquecido en Bi, Te, Co, y Au y empobrecido en Cu y Pb (Marcoux et al.1996). Aún no se conoce su potencialidad minera.



## AZNALCÓLLAR

La zona mineralizada, de unos 1 750 m de longitud, en dirección E-O, está formada por las antiguas minas Santiago, Pañoleta, Cuchichón, Masa Nueva, Silillos e Higuera, que constituyen un solo yacimiento (Fig.25).

Se explota en una corta de 1 500 m x 700 m x 400 m.

La serie estratigráfica, de muro a techo, es la siguiente (Fig.26):

- 1) Riolitas
- 2) Pizarras carbonosas y jaspes
- 3) Tobas dacíticas
- 4) Sulfuros masivos (Filón Sur)
- 5) Alternancia de tobas y pizarras
- 6) Segundo cuerpo mineralizado (Filón Centro)
- 7) Piroclastos
- 8) Tercer cuerpo mineralizado (Filón Silillos)
- 9) Cloritas y cineritas con calcopirita (Piroclasto cuprífero)

Este último horizonte mineralizado ha suscitado la controversia sobre si se trataba o no de un "stockwork". Los argumentos en contra eran la anómala posición a techo de una de las masas minerales y la ausencia de una alteración zonada. Recientes estudios, realizados en este yacimiento, explican la situación actual del "stockwork" como el efecto de una tectónica de cabalgamientos y en cuanto a las alteraciones se ha demostrado su presencia.

El conjunto de los tres cuerpos de mineral masivo tiene una corrida de 1.400 m, potencia real de 40 m y buzamiento 40 a 50 E N.

El paquete de piroclastos cupríferos tiene una corrida de unos 1.000 m y potencia de 40 m.

Las reservas están prácticamente agotadas y la actividad se ha desplazado hacia el nuevo yacimiento denominado Los Frailes.

Tabla 8.

## **LOS FRAILES**

Yacimiento oculto, situado a 1,5 km al E de Aznalcóllar, descubierto en 1974 (Fig.27).

El número total de metros sondeados ha sido de 30.000 y ya ha comenzado la explotación a cielo abierto, que utilizará el hueco dejado por la explotación de Aznalcóllar como vacie. Tabla 9.

El cuerpo mineralizado se extiende E-O con un buzamiento de 30 a 50 ° hacia el N, en un flanco normal de una estructura antiformal, modificada por fallas inversas cabalgantes (Fig.28).

La mineralización se presenta en dos facies: masiva y "stockwork". El segundo tipo presenta muchas analogías con el piroclasto de Aznalcóllar, aunque está poco estudiado por su carácter marginal, es fundamentalmente pirítico.

El rasgo más importante, en el control de la distribución de leyes del yacimiento, es la disposición en bandas (Fig.29) de la esfalerita, galena y tetraedrita, con continuidad lateral de varios metros (Pons et al., 1996).

La disposición de estas bandas, aparece modificada por fallas N-S normales y otras inversas E-O.

## LA ZARZA

La mina La Zarza está ubicada en el centro del sector español de la Faja Pirítica.

Se puede considerar como otro de los yacimientos gigantes de la Faja Pirítica. La longitud del depósito alcanza, en sentido E-O, los 2.900 m, sobrepasa los 100 m de potencia y se extiende en profundidad hasta los 500 m. Representa una acumulación de sulfuros superior a los 100 Mt de los que se han extraídos unos 35 Mt (Fig.30 y tabla 10).

Hasta ahora se ha considerado que ocupaba un sinclinal tumbado, de dirección E-O, buzando 70°E al N.

Cielo abierto y trabajos subterráneos.

La Zarza se considera un ejemplo clásico de yacimiento proximal, con un "stockwork" bien desarrollado.

Por sus contenidos en metales básicos no se puede clasificar como sulfuro complejo.

Leyes medias: 0,70% Cu, 0,5% Pb, 1,5% Zn, 1 gr/t Au y 24 gr/t Ag. Tabla nº 11.

Sus leyes en Au, superiores a las de otros yacimientos de la región han suscitado el interés de varias compañías durante los últimos años.

El yacimiento se sitúa en una estrecha banda, orientada E-O, de materiales volcanosedimentarias enclavados en el Culm. Para Strauss et al. (1990) se trata de una estructura sinclinal volcada con vergencia Sur (Fig.31).

Trabajos recientes, realizadas por el ITGE, han identificado, a escala del yacimiento, el estilo estructural definido a escala regional. La mayor parte de los contactos entre unidades son tectónicos, sobre todo los que se refieren a la unidad mineral (Fig.32).

Se trata de láminas cabalgantes, (con geometría de rampas y mesetas) que han engrosado su potencia en un proceso de deformación continua (en ocasiones hasta 5 láminas). Los cabalgamientos son de naturaleza dúctil o dúctil-frágil, asociados a rocas miloníticas.

En conjunto se produce un apilamiento antiformal, limitado al N por un cabalgamiento plegado y al S por un cabalgamiento fuera de secuencia.

La deformación no es espacialmente homogénea, sino que se acentúa en determinadas bandas métricas a decamétricas, y algunos tipos de minerales están asociados a dichas bandas y presentan enriquecimientos en metales básicos y Au.

De N a S se distinguen las siguientes facies de mineralización:

### **Stockwork.**

Aparece en las rocas de muro volcanoclásticas alteradas hidrotermalmente y en otras facies de mineral. La fuerte deformación experimentada en algunas zonas ha producido una transposición de las venas, a favor de la esquistosidad, que aparecen paralelas. La paragénesis es parecida a la de los masivos, con algunas diferencias (menos esfalerita y galena, más pirrotina y cobaltina).

Se caracteriza su signatura geoquímica por un contenido bastante elevado de Co (mas de 500 ppm) y ratios Co/Ni de 10 a 25. Los contenidos de Bi y Ag son inferiores a los de Tharsis, así como el de Au que tiene una ley muy baja.

### **Mineral silicatado.**

Asociación de cuarzo y sulfuros con un amplio rango de composición. La pirita y, en menor proporción, la calcopirita ocupan huecos entre los granos de cuarzo y los reemplazan. En algunas zonas la mena silicatada ha sido deformada y adquiere una estructura bandeada, con alternancia irregular de cuarzo y sulfuros.

### **Mineral masivo y mineral complejo bandeado.**

El mineral masivo constituye el 90% del yacimiento. Con textura homogénea de grano fino habitualmente, pero puede adquirir cierta orientación en zonas muy deformadas; también puede presentar zonas con recristalización.

El mineral complejo bandeado incluye a los denominados por otros autores "mineral polimetálico bandeado" y "pirita bandeada".

La estructura que presenta es consecuencia de una deformación extrema (Locutura et al. 1995). Está constituido por banda milimétricas, con textura fluidal, de blenda, galena, calcopirita, y carbonatos, alternando con otras bandas más piríticas.

Estas bandas están desarrolladas en los contactos del mineral masivo o incluso dentro de él.

La paragénesis del mineral masivo es Py/Cp/SI/Gn/Tetr, además de Apy-Bourn-Stan-Casit-Bi-Cobalt-Electrum, asociación que no cambia en el mineral complejo bandeado, en el que únicamente se observa un incremento en el contenido de metales básicos.

### **Alternancias de estéril y pirita.**

Corresponde al mineral "resedimentado" de Strauss et al.(1990). Está formado por intercalaciones irregulares y discontinuas, centimétricas a decimétricas, de sulfuros en milonitas o en rocas volcánicas ácidas, intensamente deformadas, de la unida de techo.

Aparecen próximas al contacto con el mineral masivo o incluso en la masa hacia techo.

Las intercalaciones de sulfuros normalmente definen superficies de cabalgamiento. Están

ligeramente enriquecidas en metales básicos y muestran altos contenidos en Au (por encima de 5 gr).

### **Rocas encajantes.**

*Unidad de muro.-* Está compuesta por rocas volcánicas de diversas facies y composición riodacítica a dacítica, correspondientes al volcanismo inicial. Estas rocas están probablemente conectadas con un foco volcánico hacia el E de la Mina; muestran una alteración hidrotermal que se intensifica hacia el centro del yacimiento.

*Unidad de techo.-* Esencialmente son rocas epiclásticas ácidas, de grano fino a medio, ligeramente bandeadas. Con intercalaciones de cherts hematíticos. Corresponden al techo del volcanismo 1.

### **Geoquímica de la mineralización y encajantes.**

Se ha realizado un estudio geoquímico del yacimiento del que se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La masa mineral está centrada sobre un "stockwork" pirítico espacialmente independiente de una pipa cloritizada.

Las rocas encajantes se caracterizan por su enriquecimiento en Mg y su empobrecimiento en Na.

En la masa mineral la distribución de los elementos difiere algo de la considerada como normal en el modelo SMV:

- Pb y Zn se concentran en la parte inferior.
- Cu se distribuye mas regularmente, salvo en la mena silicatada enriquecida.
- La pipa cloritizada no está mineralizada y el mineral situado por encima tiene un contenido bajo en metales, salvo en Fe, Co y Mn.
- Tanto el mineral como la roca presentan valores altos en Co y un ratio alto Co/Ni.

## **SOTIEL - MIGOLLAS**

El Complejo Sotiel-Migollas, está formado por tres yacimientos de sulfuros complejos: Sotiel, Zona E de Sotiel y Migollas. El conjunto se extiende a lo largo de unos 3.000 m (Fig.33 y tablas 12 y 13).

De forma esquemática, el marco geológico (Fig.34) en el que se ubican estos depósitos es:

- Unidad alóctona cabalgante, constituida por materiales del PQ (Devónico) y algunos niveles volcánicos precursores.
- Unidad autóctona, en la que aparece el anticlinal de Sotiel, formada por una secuencia bien desarrollada del CVS y por encima las series "flysch" del Culm (A.Santos 1996).

Los yacimientos encajan a techo del volcanismo inicial, en un nivel de pizarras o nivel portador. En este nivel se distinguen pizarras negras carbonosas, con nivelillos de sulfuros y tufitas, y pizarras con carbonatos. Por encima del nivel portador e inmediatamente bajo el cabalgamiento aparece un nivel complejo de pizarras, tobas finas y cuarcitas, fuertemente milonitizadas y con alteración hidrotermal.

Los cuerpos mineralizados forman parte de un "caballo" bajo el manto y sobre el autóctono (Fig.35), sobre éste, aparece otro con el "stock" (en Migollas) en materiales del PQ (A.Santos et al. 1996).

En Sotiel se diferencian tres masas: Norte, Centro y Sur. La potencia total es de unos 70 m, la corrida de Masa Centro alcanza 1.500 m (Fig.36).

En zona Este de Sotiel se distinguen seis niveles mineralizados, la potencia total es de 50 m y la corrida 350 m (Fig.37).

En Migollas se distinguen dos cuerpos, con morfologías y estructuras mucho más irregulares que las de los otros dos yacimientos (Fig.38). El cuerpo inferior alcanza 1 km de corrida y 50 m de potencia media. El cuerpo superior 200 m de corrida, potencia inferior a 40 m y, como se ve en la tabla, tiene mejores leyes en Cu.

El "stockwork" aparece cabalgante sobre la mineralización.

Los yacimientos de Sotiel y Zona Este se consideran distales transicionales, mientras que Migollas sería proximal.

El yacimiento de Migollas se explota a través de Sotiel, al estar situado a menos de 800

m de la infraestructura minera del segundo.

El Descubrimiento de Migollas ha tenido una importancia significativa, ya que se trata de un yacimiento oculto, sin manifestaciones superficiales y recubierto por una unidad más antigua que el CVS. En esa época ya había empezado a reconsiderarse la cartografía tradicional en cuanto a la posible existencia de mantos de cabalgamiento, y por lo tanto se ampliaban las posibilidades de la Reserva de Huelva.

La gravimetría, auxiliada por otros métodos geofísicos, y la cartografía fueron las herramientas esenciales para el éxito de la prospección.

## **AGUAS TEÑIDAS ESTE**

Es uno de los hallazgos más importantes de los últimos años.

En 1985 se detectó el yacimiento durante la campaña sistemática emprendida por la Asociación PRN-Billiton España, S.A. en un bloque de la Reserva del Estado.

El método electromagnético EM37 detectó un conductor que fue intersectado en el tercer sondeo (17 m de sulfuros masivos).

Los trabajos prosiguieron. Se modificó la asociación, Billiton cedió sus derechos a Placer Dome, y el actual propietario Navan ha definido un yacimiento de 41 Mt (Rodríguez et al., 1996).

El depósito se localiza en el CVS del antifirma San Telmo - Confesionarios - Cueva de la Mora (Fig.39).

Encaja la mineralización entre riolitas felsíticas a muro y lavas ácidas hematíticas a techo. Se considera un depósito proximal.

El cuerpo mineral se alarga en dirección E-O en una corrida de 1.600 m y potencia variable de 10 a 90 m. La profundidad varia desde 350 m en el E a 500 m en el O (Fig.40).

Se distinguen dos tipos de mineral: polimetálico y cobrizo (Tabla 14).



## **MASA VALVERDE**

El hallazgo de Masa Valverde es otro ejemplo de las posibilidades de encontrar objetivos interesantes en el CVS no aflorante.

El área está ocupada en un 90% por materiales del Grupo Culm y el 10% restante por CVS.

La herramienta fundamental fue la gravimetría en una malla de 100x100, las anomalías obtenidas se verificaron por métodos magnéticos y electromagnéticos.

El objetivo final fue una anomalía residual de 0,8 mgal que fue sondeada y se atravesaron 96 m de sulfuros masivos a los 434 m de profundidad (Figs.41 y 42).

En total se perforaron 20.000 m.

Los datos son:

- Reservas totales                      4 Mt

La zona de más interés:

11 Mt mineral complejo, ley equivalente Cu 2,5%.

1,2 Mt mineral cobrizo, ley equivalente de Cu 1,8%.

El conjunto                      2,44% Cu

## **LAS CRUCES**

El yacimiento de Las Cruces es un reciente éxito de la prospección minera en la Faja Pirítica. En este caso se trata de un yacimiento recubierto por los sedimentos Terciarios de la cuenca del Guadalquivir.

El yacimiento está al Este de Aznalcollar y a sólo 15 km de Sevilla.

El método esencial de investigación en este área fue la gravimetría. Con una malla de 200x50m; el resultado fue una notable anomalía con una longitud de 2 Km, 1,6 mgal y otras anomalías satélites más pequeñas. La compañía operadora (RTZ), con experiencia en trabajos similares en la Cuenca del Sado (Portugal), interpretó que las anomalías, después de varios sondeos Schlumberger, no podían ser explicadas únicamente por la presencia de un paleorelieve.

El primer sondeo intersectó una mineralización en un paleonivel de erosión entre el Paleozoico y el Terciario.

Los sulfuros masivos aparecen en el contacto entre un muro de tobas ácidas y un techo de pizarras con algunas tobas y riolitas. También se cortó un "stockwork" a muro (Doyle, 1996).

El yacimiento, según los últimos datos, tiene un buzamiento de 30 a 60E al N.

Las zonas de enriquecimiento supergénicos están muy desarrolladas y en este momento se habla de 15 Mt con el 5% de Cu.

## **NEVES-CORVO**

Está constituido por un grupo de cinco cuerpos mineralizados asociados a centros volcánicos felsíticos (Leca, 1990).

Se distinguen (Fig.43):

Unidades alóctonas: Grupo Flysch y complejo volcánico silicioso (pizarras negras, pizarras silíceas, pizarras púrpuras, tufitas y exalitas).

Unidades autóctonas: Grupo Flysch, discordancia. complejo volcánico silicioso, sulfuros masivos polimetálicos, zonas de "stockwork" y alteración clorítica en el muro y piroclastos ácidos, con alteraciones fuertes cloríticas y cuarzo- sericíticas. Finalmente el grupo pizarras-cuarcitas (P. Carvalho, 1986).

Características de las masas (Richards et al. 1991):

Se distinguen cuatro tipos de mineralización:

- Sulfuros masivos. 60-100% de sulfuros
- Mineral "rubané". Mineral bandeado, alternancia de tobas, pizarras, chert y sulfuros.
- Fisural. En pizarras y tobas ácidas, a muro, con aspecto de "stockwork".
- Brechado. Brecha epiclástica, con sulfuros cementando los fragmentos.

## DEPOSITOS DE NEVES-CORVO

<b>Corvo</b>	Dirección NE-SW, 1.200 m x 700 m, pot. max. 90 m. buzamientos 25ENE. 60% Py, Cu+Sn> Pb-Zn
<b>Graça</b>	Dirección E-W, 600 m x 500 m, pot. máx. 80 m, buzamiento 50ES, en profundidad subhorizontal. 70% Py, Cu> Sn, Zn-Pb
<b>Neves</b>	Dirección NNW-SSE, 1.500 m x 700 m, pot. max. 50 m. buzamiento subhorizontal 20-25ENE en el sector N. 30% Py, se separan dos zonas: N.Neves Cu> Zn-Pb y S.Neves Zn-Pb> Cu-Sn.
<b>Zambujal</b>	Dirección E-W, 600 m x 500 m, pot. máx. 50 m. buzamiento subhorizontal a 20EN. 60% Py, Zn-Pb> Cu.
<b>Lombador</b>	Dirección NW-SE, 700 x 500 m, pot. máx. 50 m. buzamiento 25ENE. 85% Py, Zn-Pb> Cu.

Ver tabla 15.

## **DEPOSITOS DE MANGANESO**

En la literatura tradicional de la Faja Pirítica, se consideraba como metalotecto estratigráfico de esta sustancia el "volcanismo segundo" (V2) y por ello, ha sido también denominado Formación Manganesífera.

La mena de estos depósitos está constituida por silicatos (rodonita) y carbonatos (rodocrosita) como minerales primarios, produciéndose en la montera óxidos y peróxidos secundarios (pirolusita, psilomelano, wad).

La mineralización irregularmente distribuida con potencias de 1 a 30 m, se presenta en forma de bolsadas, nódulos, pequeños lentejones y también rellenando huecos, diaclasas y fracturas.

Los indicios son, en general, de pequeño tamaño y actualmente no existe actividad en ninguno de ellos.

Los depósitos e indicios más importantes son: Soloviejo, Cobullos, Oriente, Pepito, El Cuervo, Palanco, La Calañesa, El Morante, Romerita-Pimpollar, Aurora y otros. Se han llegado a contabilizar cerca de 300 en toda la zona Sudportuguesa.

El mayor es Soloviejo, que presenta unas reservas estimadas en 500.000 t, con ley media de 32% Mn.

AZNALCÓLLAR RESERVAS					
Mineral	Cu	Pb	Zn	Ag	Estéril
	%	%	%	g/t	
6.307.000 t	0.45	2.01	4.06	77	17.161.000 t
estéril: mineral 2.72 : 1					

**Tabla 8**

LOS FRAILES RESERVAS					
GEOLÓGICAS					
Mineral	Cu	Pb	Zn	Ag	estéril
	%	%	%	g/t	
70.000.000 t	0.34	2.25	3.92	62	
EXPLOTABLES					
Mineral	Cu	Pb	Zn	Ag	estéril
	%	%	%	g/t	
36.700.000 t	0.36	2.33	3.97	65	248.280.000 t
estéril: mineral 6.76 : 1					

**Tabla 9**

RÍO TINTO						
Depósitos	Mt	% Cu	%Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au
Río Tinto total	334,50	0,39	0,12	0,34	22	0,36
Cerro Colorado (stockwork)	180	0,43				
Gossan	100,00				56	1,00
San Antonio	9,50	1,60	1,00	2,00	60	0,60
San Dionisio	45,00	0,83	0,65	2,14	24	0,30

**Tabla 5**

NEVES CORVO							
Depósitos	Mt	% Cu	% Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au	g/t Sn
Total sin pirita	80,81	3,12	0,74	4,11	37		0,22
Cupríferos masivos	20,10	7,59		1,38			0,39
Cupríferos bandeados	3,40	7,14		0,35			0,25
Cupríferos fisural	4,8	3,54		0,90			0,21
Sn-Cu masivos	2,23	14,41		2,15			1,61
Estann. Masivos	0,123	6,99		1,03			12,31
Estann. Fisural	0,016	3,34		0,18			10,99
Estann.bandeados	0,515	1,23		0,06			6,01
Zn-Pb masivos	49,63	0,50	1,21	5,93	60		
Pirita	138,00	0,51		0,23			

**Tabla 15**

THARSIS						
Depósitos	Mt	% Cu	% Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au
Total	110,06	0,50	0,60	2,70	22	0,70
Filón Centro	2,5	0,92	0,8	1,6	38	1,2
Filón Norte San Guillermo	75,00	0,7	0,85	1,9	35	0,9
Filón Sur	4,5	1,5	0,7	1,2	40	1,2
Filón Sur gossan	8				26,84	1,39
Prado Vicioso	0,06	0,65				
Sierra Bullones	13,00	1,1	0,87	1,8	35	0,7

**Tabla 6**

LA ZARZA						
Depósitos	Mt	% Cu	% Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au
Total	164,00	1,24	1,09	2,49	47	1,79
Complejos	47,00	1,10	0,50	2,40	29	0,92
Masivos	48,00	0,70	0,60	1,50	22	0,60
Silíceos	28,00	2,10	0,80	1,80	35	1,17
Bandeados	30,00	0,58	2,42	2,80	102	5,11
Stockwork	11,00	0,37	1,20	0,40	23	0,28

**Tabla 10**



MIGOLLAS						
Depósitos	Mt	% Cu	% Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au
Total	57,6	0,88	1,12	2,23		
Zona 1	38,5	0,61	1,34	2,66		
Zona 2	19,1	1,43	0,69	1,35		

**Tabla 13**

SOTIEL						
Depósitos	Mt	% Cu	% Pb	% Zn	g/t Ag	g/t Au
Total	75,20	0,56	1,34	3,16	24	0,21
Pirita	13,25	0,36	0,47	0,96		
Complejos	59,14	0,61	1,60	3,80	30	0,27
Cupríferos	2,81	0,49				

**Tabla 12**

# EXPLORACIÓN

## INTRODUCCIÓN

La investigación minera, para W. Chazan (1981), es: *"el conjunto de actividades que tienden a crear o a aumentar un tonelaje de reservas de mineral"*.

Fases de la investigación: cuadro de Harking (Tabla 16). En un mismo distrito minero se puede repetir, a lo largo del tiempo, este ciclo de fases y acciones (Locutura, 1986).

En lo que se refiere al riesgo de la búsqueda de yacimientos, según Azcárate (1982), se puede resumir:

- Riesgo de inexistencia
- Riesgo de indetectabilidad
- Riesgo de inexplotabilidad

Este último, según Azcárate, se sitúa en España cercano al 95%.

Por otra parte, al ir disminuyendo, hasta agotarse, las posibilidades de nuevos descubrimientos "fáciles" o de alta detectabilidad, la localización de los yacimientos que pueden permanecer ocultos, exige el empleo de un método de trabajo más afinado; es decir, un conocimiento más profundo de la geología y la metalogenia de la zona y una mejora en los métodos de exploración (Fig.44, de Derry 1969).

## HISTORIA

Se puede considerar que se inician las actividades de exploración (o prospección) sobre la F.P., en el sentido actual del término, desde mediados del S.XIX.

En esa época se registraron todas las labores antiguas y todas las monteras ferruginosas. A medida que avanzaban los trabajos mineros, se ampliaba el conocimiento de las reservas o se fracasaba estrepitosamente.

Las grandes minas son descubiertas, o redescubiertas en aquellos días: Tharsis, Río Tinto, La Zarza, San Domingos, Aljustrel....

Durante el período 1945-1950, en España, se lanzan campañas sistemáticas de sondeos en el entorno de los yacimientos conocidos. Los trabajos se encomiendan a la empresa estatal Piritas Españolas y el resultado fue negativo, en parte por el pobre conocimiento geológico de los yacimientos.

En Portugal se comienza a usar el método E.M.

En la segunda mitad de los 50, se inicia la prospección geofísica aeroportada, generalmente se empleó tecnología norteamericana y de nuevo se cosecharon fracasos.

A partir de 1960 cambiaron los conceptos sobre la génesis de los sulfuros, adquirió relevancia la teoría del origen volcánogénico sintectónico.

Se da mucha más importancia a la cartografía geológica y se ejecutan numerosas campañas geofísicas, en tierra, sobre amplias áreas, especialmente gravimetría y resistividad.

En este período todas las grandes minas amplían sus reservas con nuevos descubrimientos. El conocimiento geológico ha avanzado mucho, sobre todo en Portugal, donde el Servicio de Fomento Mineiro, en Beja, crea un magnífico equipo de investigadores, con la colaboración de L.J.G.Schermerhorn.

Los trabajos geológicos no se limitan a cartografiar, se realizan estudios estructurales, sedimentológicos, etc.

Los métodos eléctricos y EM se han perfeccionado y se emplean con profusión, sobre todo por parte de compañías foráneas. Por otra parte, ya no sólo se explora en el entorno de los yacimientos conocidos, sino que los trabajos se extienden por áreas en las que no ha existido actividad minera alguna.

En esta década, los objetivos de la prospección se centran en los sulfuros complejos que pueden beneficiarse por flotación, pasando los minerales piríticos a un segundo plano.

Se inician los proyectos de **Cerro Colorado, Aznalcóllar, Planes - San Antonio, Lousal, Alfredo, Romanera, Gaviao...**

El acontecimiento crucial, para la F.P., fue en 1977 el descubrimiento de Neves-Corvo.

Fue el fruto de un programa desarrollado, a veces en condiciones difíciles, por un equipo muy completo de expertos (X.Leca, 1990; D.Carvalho, 1991).

Se utilizaron diversos métodos de prospección, pero se reveló como fundamental la gravimetría, aunque obviamente sin el contraste con otros métodos habría servido de poco.

Este descubrimiento ha abierto nuevas perspectivas sobre el potencial de la F.P.: puede haber más yacimientos ocultos con altos contenidos metálicos, ya no se considera antieconómico

explorar un yacimiento a más de 300 m de profundidad.

Ante las nuevas posibilidades de descubrir yacimientos económicamente rentables, la Administración Española promovió, en los años 80, la actividad prospectora en la zona por parte de las compañías mineras.

La Reserva "Zona de Huelva", establecida en 1945, sufrió diversas modificaciones y en 1981 se dividió en bloques que fueron adjudicados, por concurso público, a las compañías interesadas.

Posteriormente, en 1991, se creó una nueva Reserva, denominada "Faja de Minerales Piríticos del S.O. de España", que ocupaba el resto de la superficie, de la Faja Pirítica Española, no incluida en la anterior reserva. Igualmente, fue dividida en bloques, en 1993, y se procedió a la adjudicación por concurso público (Fig.45).

Frutos de esta actividad fueron: **Masa Valverde, Los Frailes, Migollas, Aguas Teñidas, Concepción....**

## **EXPLORACIÓN GEOLÓGICA Y METALOGÉNICA**

Las nuevas perspectivas abiertas en la F.P., que suponen la búsqueda de objetivos ocultos y más profundos, han ido acompañadas de un replanteamiento de las hipótesis estratigráficas y estructurales, un análisis más cuidadoso de las hipótesis metalogénicas...., así como del establecimiento de un nuevo modelo geológico evolutivo.

Con estas premisas, la fase de exploración geológica y metalogénica ha superado, desde los años 70, el escalón de las tareas limitadas a las cartografías geológicas, a diversas escalas, y al reconocimiento y desmuestre de indicios. Ejemplos: cartografías de afloramientos, no interpretativas.

De forma esquemática el planteamiento debería ser:

## ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y METALOGÉNICOS APLICADOS A LA EXPLORACIÓN.

REGIONALES	Paleogeográficos Estratigráficos Estructurales Volcanológicos
LOCALES	Facies volcánicas Formación manganesífera Alteraciones hidrotermales Control estructural "Gossans" Rasgos geoquímicos Isótopos

Se comentan algunos de estos puntos:

- **Guías paleogeográficas.**- Hoy día todavía muy especulativas, dan lugar a controversias. Ej. los trabajos de Routhier y de Lecolle, se habla de una distribución regional de los yacimientos según bandas alternantes, oblicuas NE-SO, de sulfuros y manganeso.
- **Guías estructurales.**- Ya se han mencionado. Posibilidad de enriquecimiento por removilización, de determinados elementos, en las zonas de cabalgamientos. Las mayores concentraciones de yacimientos se producen en el entorno de las zonas de deformación más intensa.
- **Alteraciones hidrotermales.**- Este tipo de estudios ya es habitual incluirlo en campañas de exploración, a partir de los trabajos de D.Carvalho (1976).

Las alteraciones de los "stockwork" se pueden detectar a más de 1 km de los sulfuros.

Se pueden producir enriquecimientos en mayores y trazas (Pb, Zn, Cu, Co, Bi, Sb,..) y lixiviación de Na y Ca (Fig. 46).

- **Control estructural.**- También se programa habitualmente en las campañas de exploración.

Cabalgamientos del Devónico sobre el VS. No deben olvidarse los últimos yacimientos descubiertos con considerables complicaciones tectónicas.

- **"Gossans".**- El estudio de los "gossans" no sólo es importante como objetivo, en si mismo, por su contenido en metales preciosos, sino que su caracterización geoquímica nos puede indicar si pertenece a un sulfuro masivo o no.

- **Rasgos geoquímicos.**- Permiten caracterizar si una secuencia volcánica es fértil o no, en función de sus contenidos en REE (por Ej.: anomalía negativa en Eu).

Los contenidos en Bi-Co de un entramado de venillas, permiten dilucidar si se trata o no de un "stockwork".

Además de la presencia de minerales de Bi-Co, un buen criterio de la proximidad de un enriquecimiento cuprífero es la presencia de la llamada "enfermedad" de la Cp (Fig.46).

- **Isótopos.**-Independientemente de su aplicación en los estudios genéticos, la signatura isotópica del Pb en los depósitos y sus "stocks" es homogénea, lo que puede permitir tomar decisiones sobre indicios, anomalías de suelos o "gossans".



## **EXPLORACIÓN GEOFÍSICA**

En la Tabla 17 se relacionan los distintos métodos aplicables a la exploración de la FP, tanto en su vertiente infraestructural como táctica.

Con respecto 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.

Las resistividades eléctricas de los sulfuros y de las diversas litologías de la zona se incluyen en la Figura nº47. Como puede observarse, el contraste entre pirita 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 piritas y aún más frente a blenda + pirita + galena, sobre todo cuando predomina el primero de estos metales, circunstancia sólo excepcional dentro de la Faja Pirítica.

La siguiente figura (Fig.48) muestra los histogramas y valores medios de las densidades de pizarras y grauwacas de Culm, por un lado; pizarras + tufitas + tobas + lavas del Complejo Volcánico Sedimentario por el otro; y finalmente sulfuros masivos. Estos gráficos ponen de manifiesto el acusado contraste entre las densidades de los sulfuros y las de las restantes litologías de la región.

Las mineralizaciones diseminadas tipo "stockwork" son eléctricamente conductoras cuando la metalización 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.

Los sistemas electromagnéticos en el dominio de frecuencias ven limitada su profundidad de investigación por el efecto "skin". En el ábaco (Fig.49) pueden observarse las limitaciones que este efecto supone en las distintas litologías de la Faja Pirítica para las frecuencias de trabajo de los métodos aplicados, señalando dichos límites para las pizarras y grauwacas del Culm. Puede procederse de manera similar, para otras litologías, 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 (p. ej., Culm sobre volcanitas).

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 (Fig.50), 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 "litoestructural"). En consecuencia, son aplicables en la investigación de la Faja Pirítica, los métodos eléctricos y electromagnéticos "s.l." y el método gravimétrico.

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 tamaño 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 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 Pirítica.

El método magnético, sin embargo, es muy adecuado para cartografiar horizontes del volcanitas básicas, y, en principio, puede ser una excelente herramienta para averiguar la presencia del C.V.S. oculto por sedimentos del Culm o del Terciario, y evaluar su profundidad.

Los avances que se han producido en la aplicación de las técnicas geofísicas, en la F.P.E., se deben sobre todo a una mejora de los equipos de medida y de los programas de cálculo, que han reducido el tiempo de procesado de los datos y aumentado la fiabilidad de los resultados; estos progresos son fundamentales a la hora de tomar decisiones en un programa de exploración (A.Granda, 1996).

Salvo algún caso concreto, no se han diseñado nuevas técnicas, sólo mejoras de las ya existentes y se siguen midiendo los mismos parámetros.

La tomografía o método de investigación por radio ondas (IRO) del TSNIGRI (Rusia) analiza el campo E.M. inducido por un emisor de ondas de radio.

El resultado es una serie de cortes de resistividades (Fig.51).

Dispositivos utilizados:

Sondeo -Sondeo: alcance 1 000 . 1 500 m, profundidad máx.2 500 m

Sondeo -Superficie: radio de investigación de 700 a 800 m

Sondeo aislado: prof.máxima 2 000m, radio de investigación 100 . 150m

Exploración geotermal.- Es una metodología de costes reducidos, en fase experimental sobre un yacimiento conocido.

El efecto térmico, causado por la alta conductividad térmica de un depósito de sulfuros, podría detectarse mediante medidas de perfiles térmicos en sondeos someros (Figs.52 y 53).

No tiene problemas en cuanto a la discriminación de anomalías significativas o no (Ej.: cuerpos densos no mineralizados). Se emplean termistores de alta resolución (0,001EC) (R.Castroviejo, 1996).

## ANÁLISIS CRÍTICO. CONCLUSIONES PRÁCTICAS

A partir de 1960, el método gravimétrico ha desempeñado un papel primordial en la localización de todas las masas de sulfuros en la Faja Pirítica. En el período que ahora se analiza se ha confirmado, una vez más, su eficacia, principalmente en el hallazgo de las nuevas masas de sulfuros de Valverde, Aguas Teñidas - Este, Cabezo Migollas, y Las Cruces.

El método magnético, tanto aéreo como terrestre, ha mostrado su ineficacia para localizar, en general, depósitos de sulfuros, aún cuando su concurso es positivo para determinar el techo del C.V.S. oculto por sedimentos del Culm. En este sentido, un sondeo mecánico puede ser particularmente instructivo para futuros programas de investigación de la Faja Pirítica y así

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 aerelectromagnéticos 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 diagráfia de sondeos mecánicos, aún cuando frecuentemente se tropieza con problemas de realización, por estrangulamiento del orificio del pozo.

Los métodos de P.I., en ambos dominios, tienen bastantes limitaciones en su uso en la Faja Pirítica:

- No resuelven el problema de las pizarras grafitosas. Se obtienen las mismas anomalías que con los métodos eléctricos.
- Menos alcance en profundidad que con los métodos eléctricos.
- Más lentos y por lo tanto más costosos.

Sin embargo, el método de P.I. se manifiesta, como no podía menos de suceder, muy sensible a las mineralizaciones diseminadas e igualmente resulta útil en el estudio de áreas cubiertas parcial o totalmente por sedimentos del Mioceno.

Por su parte, 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 atravesado por labores mecánicas de investigación.

EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA:

- SEDIMENTOS EN REDES DE DRENAJE
- SUELOS
- ROCAS
- GASES:  
EN SUELOS (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Hg, Rn, He)  
COMPUESTOS VOLÁTILES DE S (COS, CS<sub>2</sub>, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> S<sub>2</sub>).
- OTROS

**Tabla 18**

## **EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA**

La exploración geoquímica, en la Faja Pirítica (Tabla 18), ha sido, durante bastante tiempo, considerada como una herramienta poco operativa por el alto grado de contaminación que presentan suelos y redes de drenaje, como consecuencia de las actividades mineras y metalúrgicas prolongadas durante siglos.

En los años 70, el ITGE y el Fomento Mineiro de Portugal realizaron varias campañas, en sus respectivos territorios, con muestras de suelos y de sedimentos y los resultados fueron bastante desalentadores.

La geoquímica de rocas daba mejores respuestas, aunque se utilizó poco como técnica de prospección.

Sin embargo, en esa misma época se hicieron los primeros ensayos con un nuevo modelo de mercuriómetro y se obtuvieron resultados interesantes, aunque muchas de las anomalías encontradas correspondían a fallas y no a mineralizaciones.

Actualmente, con el desarrollo experimentado por las técnicas de análisis multielemental (plasma ICP, plasma DCP, activación neutrónica) se está comenzando a sacar partido de la geoquímica, de suelos y rocas, en esta región.

Una táctica muy empleada por las compañías operadoras, en los bloques de la Reserva del Estado, es la de realizar conjuntamente campañas de geoquímica de suelos y gravimetría; es decir, en cada estación de medida se recoge la muestra, lo que supone un considerable ahorro.

La geoquímica de rocas también está comenzando a ser mas utilizada, pese a su elevado coste. El ITGE ha realizado varias campañas piloto.

En Portugal se han hecho varios ensayos de hidrogeoquímica y fito geoquímica.

Por otra parte, han comenzado a desarrollarse nuevas técnicas de geoquímica de gases, con resultados por el momento esperanzadores.

Las pruebas se han llevado a cabo por el ITGE y por el BRGM.

El procedimiento empleado por el ITGE (Fig.54) se basa en la medida directa, sobre el terreno, de las emanaciones de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y Hg y en la determinación, en laboratorio y sobre muestras de suelos, de los contenidos en compuestos volátiles (CAV<sub>s</sub>).

Los ensayos se realizaron en un yacimiento con recubrimiento terciario (Los Frailes) y en

otro aflorante, rico en Zn (La Romanera).

Los resultados obtenidos (Figs.55,56,57, y 58), por el momento, indican una buena respuesta con un recubrimiento poroso o en el caso de mineralizaciones ligadas a discontinuidades (planos de cabalgamiento, falla, etc..)

El método del BRGM analiza  $\text{CO}_2$ , He y Rn recogidos en un captador, aún en fase experimental en cuanto a diseño y material.

Los resultados indican que: el  $\text{CO}_2$  es un buen "marcador" de oxidación de sulfuros y de fallas, el Rn también marca las fallas cuando aparece asociado a las anomalías de  $\text{CO}_2$ , el He se considera un buen indicador de fallas profundas.



## **EXPLORACIÓN MULTICRITERIOS**

Como ya se ha mencionado en la introducción de este capítulo, los objetivos que se están buscando actualmente en la F.P. son más difíciles, más esquivos, pero por otra parte con un fuerte valor económico. Su detección se va a ver complicada por las condiciones en las que puede encontrarse el hipotético yacimiento, como podrían ser: profundidad, complejidades tectónicas, coberteras pantalla etc...

El arquetipo que pretende encontrar cualquier equipo de exploración, que opere en esta Provincia Metalogénica, es otro Neves-Corvo, es decir un yacimiento rico en metales básicos y con reservas superiores a los 30Mt.

La prospección en condiciones de dificultad creciente ha llevado a una mejora de los métodos tradicionales, a la utilización de otros de los que hasta entonces se esperaba poca respuesta o a los que se ha dado otra modalidad de utilización, e inclusive a la creación de nuevas técnicas.

Los conocimientos geológico y metalogénico son más amplios y precisos y las mejoras en la instrumentación de medida y análisis son considerables. La exploración también se ha beneficiado del avance experimentado por las herramientas informáticas.

Para un programa de exploración orientado a la búsqueda de un depósito con las características que hemos referido, evidentemente no existe un método o técnica decisivos, sino que se van a obtener múltiples datos y diversos criterios con los que tomar decisiones.

Esto es: estamos requiriendo una herramienta de prospección multicriterios, que realice una interpretación integrada de los resultados de los diversos métodos y técnicas cuya utilización se consideró apropiada para el objetivo en cuestión, y que , por otra parte, es el sistema de trabajo, hoy día, no sólo en la F.P., sino en otras muchas provincias metalogénicas.

Siguiendo esta tendencia, el ITGE ha creado una Base Regional de Datos de la Faja Pirítica Española, que ha capturado toda la información existente sobre la zona, hasta ese momento, y que continuará recopilando la que se vaya generando por los diversos proyectos (Fig.59).

Esta B.D. tiene un doble uso: como simple banco de información al que se acude para adquirir datos o como herramienta de prospección multicriterios. Su utilidad ya se ha puesto de manifiesto tanto por entidades públicas como privadas interesadas en desarrollar proyectos de exploración en la zona.

La estructura de la información (G.Ortiz et al.,1993) sigue el modelo geo-relacional de datos (entidad-atributo-relación) acrecentado con las capacidades funcionales de un SIG (Fig.60).

Esta configuración permite almacenar, recuperar, manipular y mostrar gráficamente datos espaciales, y analizar las relaciones entre los diferentes estratos de información, así como interrogar a la Base mediante criterios de búsqueda definidos por el usuario (G.Ortiz et al., 1993).

En resumen, facilita el tratamiento integrado de datos geo-referenciados de naturaleza diversa: geológicos, geofísicos, geoquímicos, metalogénicos, teledetección etc., mediante la superposición y combinación de capas, usando esquemas basados en conceptos metalogénicos.

#### APOYO DE LA ADMINISTRACIÓN.

Desde 1973 el ITGE ha venido desarrollando en la FPE diversos proyectos, individualmente o estableciendo convenios con otros organismos de la Administración Central y de la Autonómica, e igualmente con diversas compañías mineras y organizaciones estatales europeas, con la finalidad de crear una infraestructura geológica y minera que fomentara el desarrollo de proyectos de exploración por parte de las compañías mineras.

Frutos de estos trabajos durante los últimos cinco años han sido:

El Mapa Gravimétrico de la FPE, como resultado del Proyecto de Exploración de la Faja de Minerales Piríticos del SO de España, desarrollado conjuntamente con la DGM y la Junta de Andalucía. La Base Regional de Datos, dentro de un proyecto de la UE. Y, finalmente, con el desarrollo de un Proyecto Integrado, entre otros resultados, se ha establecido un modelo geológico evolutivo.

## **BENEFICIO DE LOS MINERALES PIRÍTICOS**

### **CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS MINERALES PIRÍTICOS**

(Ver Tabla 19)

**Pirita de hierro**, utilizada en la fabricación de ácido sulfúrico, en cuyo proceso se producen cenizas con contenidos en Fe, Zn y metales preciosos que pueden aprovecharse. A su vez, se distingue entre:

- \* Pirita cruda, que procede directamente de la mina, sin otro tratamiento que trituración y clasificación granulométrica.
- \* Pirita flotada, que es la obtenida como subproducto de la flotación de piritas cobrizas y de los sulfuros complejos.
- \* Pirita lavada, que es la obtenida por lavado en medios densimétricos de azufrones y menas simples de Pb y Zn.

**Pirita cobriza**, mena principalmente de cobre, con leyes mínimas del orden de 0,6% Cu y algo de Pb y Zn.

**Pirita compleja** (o sulfuros complejos o polimetálicos), con un contenido en Cu + Zn  $\approx$  4-5%. Generalmente se encuentra a techo y muro de las masas de pirita, en el interior de éstas como capas o lentejones, o bien formando masas aisladas. Los complicados intercrecimientos de sus componentes minerales y el pequeñísimo tamaño de grano de éstos hacen sumamente difícil su liberación y obtención por flotación de concentrados de Cu, Pb y Zn.

**Azufrones**, son "stockwork" y disseminaciones de sulfuros que se aprovechan cuando tienen leyes altas en cobre, como en el caso de las "cloritas" de Alfredo y del mineral silicatado de La Zarza. El "stockwork" de Tharsis por su contenido en Au.

**Mineral cuprífero**, las menas de baja ley en Cu, están representadas por el mineral de Cerro Colorado, en Río Tinto, y el denominado "piroclasto" de Aznalcollar. Estas menas, aunque mineralógicamente muy diferentes de las piritas masivas, están, geológica y espacialmente, relacionadas con ellas. Los sulfuros de cobre y, usualmente, de zinc junto con pirita están finamente diseminados en pizarras y rocas volcánicas hidrotermalmente alteradas; los contenidos de cobre y zinc suelen ser del 0,4-0,7% y del 10% en azufre.

Asociados con los minerales piríticos propiamente dichos, aparecen también en la Faja:

**Mineral estannífero**: constituido por casiterita y estannina mezcladas con pirita y calcopirita, muy abundante en Neves-Corvo, donde se explota tanto aisladamente (mineral "rubané" con Sn) como conjuntamente con el cobre (mineral MS). En la masa Valverde se han localizado puntos aislados con contenidos hasta 1,1 kg/t Sn.

**Mineral manganésífero**: se compone de silicatos (rodonita) y carbonatos (rodocrosita), con óxidos secundarios en montera (pirolusita, psilomelana, wad), asociados a los jaspes y cherts.

**Mineral aurífero**: se trata de minerales secundarios enriquecidos en Au y Ag por lixiviación meteórica de las monteras o afloramientos de las masas piríticas (gossans).

## TRATAMIENTO DE LAS PIRITAS CRUDAS Y FLOTADAS

El tratamiento mineralúrgico de la pirita como mena de azufre es muy simple y se reduce a su trituración y clasificación granulométrica, operación que se realiza en dos etapas: trituración primaria hasta tamaños # 70 mm y otra secundaria hasta # 6mm. Actualmente sólo se explota en el depósito Filón Norte-San Guillermo de Tharsis.

El beneficio de la pirita, tanto cruda como flotada, no ha presentado hasta ahora mayores problemas como mena de azufre, salvo su diferente granulometría (muy fina en la segunda), que obliga a su consumo en plantas de sulfúrico especialmente adecuadas a cada una de ellas, no siendo intercambiables entre sí (Tabla 20).

En la Figura nº61 aparece reflejada la evolución de las producciones de pirita, en España, durante el quinquenio 90-95.

Sin embargo, el progresivo endurecimiento de las reglamentaciones de preservación medioambiental puede plantear problemas en aquellos casos en los que un excesivo contenido en elementos indeseables pueda transmitirse al ácido sulfúrico resultante y, subsiguientemente, al fertilizante producido con éste. De hecho, este caso se ha presentado ya a Minas de Almagrera, cuyo mineral de Sotiel tiene un alto contenido en mercurio que en su mayor parte se distribuye entre los concentrados de cinc y la pirita flotada obtenidos. Debido a ello, la compañía se ha visto obligada a implantar un proceso de deshidrargirización, a fin de rebajar el contenido en mercurio del sulfúrico producido a los límites tolerados por las normas de la UE.

Las medidas anticontaminantes que han hecho disminuir, en la UE, el consumo de productos fosforados, en los sectores de fertilizantes y detergentes, también han tenido un efecto negativo sobre el mercado del ácido sulfúrico.

Por otra parte, las mismas reglamentaciones medioambientales han colocado en el mercado unos volúmenes considerables de ácido sulfúrico fatal, como subproducto de diversos sectores industriales, que incide negativamente en el mercado de la pirita cruda.

Otro problema grave es el de las cenizas de tostación, subproducto de difícil venta. En los años 80 existían tres plantas en actividad que recuperaban los metales de las cenizas de la FPI, pero a partir del cierre de la DKH se redujo considerablemente este mercado. Las siderúrgicas hace tiempo que no emplean el mineral púrpura por las impurezas contenidas y la industria cementera consume un porcentaje muy bajo del total de cenizas producidas. Todo ello obliga al almacenamiento de la mayor parte de las cenizas producidas.

MINERALES COMPLEJOS (J.L.Alvarez,1996).

Los minerales complejos de la FPI presentan la relación Cu:Pb:Zn de 1:2:6 como valor medio, con todo tipo de variaciones entre yacimientos y dentro de un mismo depósito.

Los procedimientos de concentración por flotación pueden ser: global (Cu+Pb+Zn), semidiferencial (Cu+Pb,Zn) y diferencial secuencial (Cu,Pb,Zn); siendo esta última vía la única utilizada industrialmente.

No obstante, presenta un gran número de problemas derivados del grado de molienda (fina a ultrafina) al que hay que llegar (Tabla 21).

Los consumos energéticos son elevados, se emplea un considerable volumen de reactivos y la velocidad del proceso es baja, y a pesar de todo ello los concentrados son impuros y las recuperaciones bajas.

Concentrado de Cu : Rec. 50% al 70%; Cu 20%, Pb 3,5%, Zn 4%, además Ag,Sb,Bi,Hg.

Concentrado de Pb : Rec. 50% al 70%; Pb #50%, Zn 7%, Cu 1,7%, además Bi,Ag.

Concentrado de Zn : Rec. 70% al 90%; Zn 48%, Pb 2%, Cu#1%, además Hg,Cd.

Los concentrados de Cobre y Plomo contienen el mayor porcentaje de las impurezas metálicas y de Ag (Au muy bajo).

El concentrado de Zn retiene la mayor parte del Hg.

La mayor parte del Au presente en la mineralización se queda en el rechazo pirítico.

Estos concentrados, salvo el de Zn, son de difícil tratamiento en las plantas metalúrgicas españolas.

La flotación global, que únicamente trata de separar la pirita, obtiene un concentrado de los tres metales no féreos, se reducen costes de molienda y se alcanzan mejores rendimientos (Tabla 22).

Con la flotación semiglobal se obtienen concentrados de Pb-Zn separados de los de Cu, o bien concentrados de Cu-Pb y de Zn. Los costes y recuperaciones son intermedios entre los de las dos otras vías (Tabla 23).

A pesar de sus ventajas los concentrados globales tienen el inconveniente de no ser aún aceptados prácticamente en ninguna fundición, y los semiglobales se pueden vender en algunas plantas metalúrgicas, pero en condiciones económicas insuficientemente remuneradas para el minero vendedor.

A causa de todos estos problemas, durante una serie de años se han dirigido no pocos esfuerzos a la investigación y desarrollo de nuevos procesos, piro e hidrometalúrgicos, tendientes a poder utilizar concentrados globales o semiglobales. Aunque, en general, todos ellos presentan inconvenientes:

Los pirometalúrgicos por la dificultad de conseguir unos productos que cumplan las especificaciones de impurezas y por normativas medioambientales.

Los procesos que utilicen la tostación sulfatante van a generar ácido sulfúrico, con todos los problemas que esto implica.

Los procesos por vía hidrometalúrgica, para concentrados globales, tienen más posibilidades de ser factibles.

Los procesos de biolixiviación con minerales de la FP están aun en fase experimental.

En forma resumida los procesos más comunes son (ver también Tablas 24 y 25):

### **Para concentrados piríticos**

Los procesos tratan de recuperar los metales básicos y preciosos y además tienen que aprovechar el ácido y la energía de la pirita

Procesos por oxidación, para eliminar el S, como compuesto sulfuroso, y separar de los metales básicos el Fe.

- Tostación desarsenicante + Tostación Clorurante, DKH.
- " " + Volatilización de Cloruros, KOWA-SEIKO
- Descomposición Flash Outokumpu + Tostación Sulfatante

Procesos que separan inicialmente los metales básicos, generando un rechazo de pirita y féreos.

Son los biohidrometalúrgicos.

- BIOX de acción directa
- IBES de acción indirecta
- BRISA de acción indirecta

### **Para concentrados globales**

#### Procesos Pirometalúrgicos

Implican dos o más etapas de fusión, una oxidante y otra reductora.

- HORNO KIVCET
- HORNO HOBOKEN
- AUSMELT



## Procesos hidrometalúrgicos

Tostación previa del concentrado:

RPC (Newbrunswick Research & Productivity Council)

SAPEC (Portugal)

BOLIDEN

Lixiviación a presión con oxígeno

COMPREX

SHERRIT GORDON

Actividad bacteriana

BIOX

IBES

BRISA

Los procesos en vía sulfato no permiten solubilizar los metales preciosos ni el Pb.

Los procesos en vía cloruros operan a presión atmosférica, algunos incluyen un tratamiento inicial pirometalúrgico.

Los productos intermedios son soluciones de los metales y hay que separarlos.

Procesos:

CANMET

USBM

CUZCLOR

ELKEN

MINEMET

CENIM-LNETI

## OTROS MINERALES

Minerales de cementación.- Menas de Cu marginales (0,20%), y minerales de Cu de alteración supergénica. Se lixivian con aguas cupríferas de mina y se hace precipitar el Cu sobre chatarras de hierro.

"Gossans" con metales preciosos.- Se tratan en plantas de cianuración convencionales y de los precipitados, por calcinación y fusión, se obtiene un "bullion".

**APROVECHAMIENTO DE SULFUROS POLIMETÁLICOS. PROYECTOS NACIONALES**

DENOMINACIÓN	PROCESO	PROMOTOR
COMPREX	Lixiviación a presión de concentrados globales, en medio sulfato.	TÉCNICAS REUNIDAS, S.A.
IBES	Tratamiento de concentrados semiglobales de Cu/Zn, en medio sulfato Beneficio de concentrados diferenciales de Cu/Zn/Pb y minerales auríferos. En medio sulfato.	RÍO TINTO MINERA
BIOLIXIVIACIÓN CONT. IND.	Tratamiento de concentrados globales de Cu/Pb/Zn, en medio cloruro.	ALMAGRERA, S.A.
CUZCLOR (Cuprex+Ledclor+ Cinclor)	Beneficio integral de sulfuros complejos. En medio cloruro.	TÉCNICAS REUNIDAS, S.A.
PIRROTITA	Desarrollo de la celda electrolítica del proceso cuzclor.	A U X I N I
CELDA CINCLOR	Beneficio metalúrgico de concentrados globales. En medio amoniacal.	CONFEDEM
CENIM-LNETI	Biohidrometalurgia de minerales refractarios de Au. Microorganismos termófilos.	CENIM (Esp.) y LNETI (Portg.)
BIOLIXIVIACIÓN DIR.		I. T. G. E.

**Tabla 24**

APROVECHAMIENTO DE SULFUROS POLIMETÁLICOS. PROYECTOS EXTERIORES

DENOMINACIÓN	PROCESO	PROMOTOR
R L E	Lixiviación, en medio sulfato, de concentrados globales	LNETI-QUIMIGAL (Portg)
F C L	Tratamiento de concentrados globales de Cu/Pb/Zn/Ag, en medio cloruro.	CANMET (Can)
B H A S	Tratamiento de concentrados globales de Cu/Pb/Zn, en medio cloruro-sulfato.	BROKEN HILL ASS. SMELTERS (Aus).
A U S M E L T	Tratamiento pirometalúrgico de concentrados globales de Cu/Pb/Zn.	AUSMELT (Aus).

Tabla 25

## **LABOREO**

Los métodos de explotación empleados en la Faja Pirítica son los habituales en los yacimientos de sulfuros masivos y, al igual que en otros distritos mineros, la evolución y mejora de estos métodos ha estado condicionada por el incremento de la seguridad en las operaciones y la reducción de costes que imponen los bajos precios de los minerales extraídos, y, más recientemente, por las exigencias medioambientales.

Las primeras explotaciones a cielo abierto, en el sentido actual del término, datan de mediados del S.XIX (Esperanza hacia 1850, por ejemplo). En la minería subterránea usualmente se empleaban sistemas de cámaras con pilares y mampostas de grandes dimensiones, cuya recuperación ocasionaba frecuentes hundimientos. Posteriormente las técnicas del relleno permitieron mejores recuperaciones.

Actualmente, en el sector español de la Faja Pirítica, únicamente están activas 3 explotaciones a cielo abierto: Filón Norte-San Guillermo, en Tharsis, que es la última mina de pirita en actividad, Aznalcóllar y Los Frailes. El yacimiento de Aznalcóllar, como ya se ha referido, está prácticamente agotado y la actividad de la compañía Boliden-Apirsa se ha desplazado a Los Frailes.

En las explotaciones de Aznalcóllar se han aplicado las últimas tendencias en minería a cielo abierto (A.Ruiz Castell, 1996), tratando de abaratar costes con la introducción del mayor número posible de innovaciones tecnológicas en las tareas de arranque, carga y transporte. Entre otras, se pueden reseñar:

- Perforadoras eléctricas rotativas de grandes diámetros con sistema de control programado de la perforación, que han permitido duplicar los rendimientos.
- Excavadoras de cable de grandes dimensiones (cazos de más de 40m<sup>3</sup>), capaces de cargar camiones de gran tonelaje en 3 pasadas, y, posteriormente, excavadoras hidráulicas con capacidad de carga superior a 20m<sup>3</sup> y más movilidad que las primeras. En conjunto se ha conseguido una reducción notable de los costes de carga.
- Camiones de gran tonelaje (220 t) provistos de sistemas automáticos de control. Con ellos se optimizan los tiempos de espera, la utilización de los equipos de carga, los ciclos de trabajo y la disponibilidad y localización de los propios camiones.

Con minería subterránea actualmente sólo se explota el yacimiento de Sotiel y sus ampliaciones a Sotiel Este y Migollas (J.A.Ros, A.Menéndez y C.Álvarez, 1994).

En la mina de Sotiel inicialmente se eligió el método de **corte ascendente con relleno** (Fig.62), pero la necesidad de reducir costes ha llevado a su sustitución por otros que consiguen huecos de mayores dimensiones, con el consiguiente aumento de productividad, además de lograr que el sostenimiento tenga una menor incidencia en el coste por tonelada extraída.

No obstante, existía el problema de los cielos y techos con grandes vanos, generados por estos métodos, que requieren sostenimiento artificial, pero la compañía titular de la explotación, Minas de Almagrera S.A., cuenta con una amplia experiencia en el sostenimiento de cielos y techos con el sistema de **cables largos**. Finalmente se optó por el método de **banqueo entre subniveles** (Fig.63), por corte y relleno de una zona comprendida entre los dos bloques de explotación.

Se realizan voladuras de gran capacidad que arrancan más de 20 000 t de mineral con 2 000 kg de explosivos. Se dan disparos secuenciales (max.95 kg) para reducir los efectos de las vibraciones.

Para el desarrollo de las masas de Sotiel Este y, más recientemente, de Migollas, al tratarse de cuerpos subhorizontales con coincidencia de cielo y techo, se optó por un sistema de **cámaras y pilares corridos** (Figs.64, 65 y 66), con sostenimiento de los cielos mediante cables de anclaje (A.Menéndez et al., 1996).

Al haber accedido a estas nuevas masas mediante una galería (Galería General Este) trazada desde la explotación inicial Sotiel, el mineral situado entre las galerías ya desarrolladas se arranca por **realces**, mientras que en el mineral situado al S de la Galería General Este la operación se hace por **banqueo**.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Álvarez Marcos J.L., (1996). Revisión crítica de los procesos de beneficio de los sulfuros complejos. Bol. Geol. y Minero, Vol 107-3 y 4: 359-372.

Arnold M., Bernard A.J., Soler E. (1977). Premier apport de la géochimie des isotopes du soufre à la compréhension de la genèse des minéralisations pyriteuses de la province de Huelva (Espagne). Mineral. Dep. 12:197-218.

Azcárate J.E. (1982). Introducción a la Metodología de la Investigación Minera. Edit.IGME.

Barriga F.J.A.S. (1990). Metallogenesis in The Iberian Pyrite Belt. En: Pre-Mesozoic Geology of Iberia. Dallmeyer,R.D., Martínez García,E. (edit.). Springer Verlag, pp.369-379.

Barriga F.J.A.S., Carvalho D. (1983). Carboniferous volcanogenic sulphide mineralizations in South Portugal (Iberian Pyrite Belt). In Carboniferous of Portugal, Mem. Serv. Geol. Port. 29:99-113.

Barriga F.J.A.S., Oliveira J.T. (1986). Geochemical study of cherts, jaspers and manganese ores from the Iberian Pyrite Belt. Maleo Soc. Geol. Port.2(13):11.

Carvalho D. (1976). Considerações sobre o vulcanismo da região de Cercal-Odemira. Sus relações com a Faixa Piritosa. Com. Serv. Geol. Portugal 60:215-238.

Carvalho D. (1979). Geologia, metalogenia e metodologia da investigação de sulfuretos polimetálicos do sul de Portugal. Com. Serv. Geol. Port. 65:169-191.

Carvalho D. (1991). A case history of the Neves-Corvo massive sulfide deposit, Portugal, and implications for future discoveries. Econ. Geol. Monograph. 8:314-334.

Carvalho P. (1986). An introduction to the Neves-Corvo copper mine, Portugal. Guide Book for the Iberian Field Conference, 11-22 April. Soc. Geology Applied Mineral Deposits: Inst. Sup. Técnico (Lisboa). Unpub. doc., pp 83-99.

Castroviejo R., Gable R., Cueto R., Foucher J.C., Soler M., Gounot J., Batsale J.C., López A., Joubert M. (1996). Ensayo de una metodología innovadora para la detección de masas polimetálicas profundas: Modelo geológico y exploración geotérmica preliminar de la Masa Valverde (Huelva). Bol. Geol. y Minero, Vol. 107, 5 y 6: 485-509.

Chazan W. (1981). La recherche minière française de 1968 à 1970: analyse des investissements. Chronique de la Rech. Minière, n1463.

Doyle M. (1996). Las Cruces Copper Project, Pyrite Belt, Spain. Bol. Geol. y Minero, Vol. 107, 5 y 6: 681-683.

Franchetau J., Choukroune P., Juteau T., Seguret M., Ballard R.D., Fox P.J., Normark W., Carranza A., Córdoba D., Guerrero J., Rangin C., Bougault H., Cambon P., Hékinian R. (1979). Massive deep sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. Nature 277:523-528.

García Palomero F. (1992). Mineralizaciones de Riotinto (Huelva): Geología, génesis y modelos geológicos para su explotación y evaluación de reservas minerales. Recursos minerales de España, eds. García Guinea J. y Martínez Frías J. C.S.I.C. col. Textos Universitarios nº 15 : 1325-1352.

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, pp:379-395.

Fernández Alvarez G. (1974). Los yacimientos de sulfuros polimetálicos del Suroeste Ibérico y sus métodos de prospección. Stud. Geol. IX, 65-102, Salamanca.

Granda A. (1996). Avances en la tecnología de la exploración geofísica aplicables a los yacimientos de sulfuros de la FPI. Bol. Geol. y Minero. Vol. 107-3 y 4: 370-315.

Hutchinson R.W. (1973). Volcanogenic sulphide deposits and their metallogenic significance. Economic Geol. Vol. 68, n18, pp: 1223-1246.

Hutchinson R.W., Fyfe W.S., Kerrich R. (1980). Deep fluid penetration and ore deposition. Minerals Science and Engineering. National Institute for Metallurgy, Randburg, South Africa. Vol.12, n13, pp: 107-120.



Kase K., Yamamoto M., Nakamura T., Mitsuno C., (1990). Ore mineralogy and sulfur isotope study of the massive sulfide deposit of Filón Norte, Tharsis Mine, Spain. *Miner. Deposita*, 25:289-296.

Lake P.A., Oswin W., Marshall J.E.A. 1986. A preliminary approach to terrane analysis in the South Portuguese Zone. *Int. Conference on Iberia Terranes and their regional correlation*. IGCP project 233. Oviedo, abstract p.52.

Leca X. (1990). Discovery of concealed massive-sulphide bodies at Neves-Corvo, Southern Portugal - a case history. *Trans. Inst. Min. Metall., sect.B*, vol.99, pp: B139-B152.

Locutura J. (1986). La investigación minera en España. Primeras jornadas de reflexión y estudio sobre la minería española. *Federación Estatal de Minería*, UGT.

Locutura J., Soler M. (1995). Incluido en "Sub-task 6-2" de "Innovative Analytical and Geophysical Technologies for Detecting Blind Polymetallic Orebodies in Southern Spain". *The BRITE/EURAM Programme*. Unión Europea.

Lotze F. (1945). Zur Gliederung der Varisciden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch* 4: 78-92.

Lydon J.W. (1984). Ore deposit models #14: Volcanogenic massive sulphide deposits. Part.1: a descriptive model. *Geoscience Canada*. Vol.11, pp 195-202.

Lydon J.W. (1988). Ore deposit models #14: Volcanogenic massive sulphide deposits. Part.2: genetic models. *Geoscience Canada*. Vol.15, pp 43-65.

Lydon J.W. (1996). Characteristics of Volcanogenic Massive Sulphide Deposits: Interpretations in terms of Hydrothermal Convection Systems and Magmatic Hydrothermal Systems. *Bol. Geol. y Minero*. Vol. 107-3 y 4: 215-264.

Marcoux E., Moëlo Y., Leistel J.M. (1996). Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringer zones to massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita* 31:1-26.

Menéndez Díaz A.L. y Ros Hernández J.A. (1996). Explotación de masas tumbadas. Bol. Geol. y Minero. Vol. 107-3 y 4: 327-338.

Mitsuno C., Nakamura C., Yamamoto M., Kase K., Oho M., Suzuki S., Thadeu D., Carvalho D., Arribas A. (1988). Geological studies of the Iberian Pyrite Belt with special reference to its genetical correlation of the Yanahara ore deposit and others in the inner zone of the southwest Japan. Report. Univ. Okayama, Japan.

Munhá J., Oliveira J.T., Ribeiro A., Oliveira V., Quesada C., Kerrick R. 1986. Beja-Acebuches Ophiolite: characterization and geodynamic significance. *Maleo* (abstr.) 2(13): 31.

Oliveira J.T. (1983). The marine Carboniferous of South Portugal: a stratigraphic and sedimentological approach. *Mem. Serv. Geol. Portugal.* 29: 3-37.

Oliveira J.T. (1990). Stratigraphic and syn-sedimentary tectonism in the South Portuguese Zone. En: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Dallmeyer, R.D., Martínez García, E. (edit.). Springer Verlag, pp. 334-347.

Ortíz G., Almarza J., Ortega E. (1993). Diseño y construcción de una base de datos geológico-minera de la Faja Pirítica Española: Un modelo georrelacional. *Symposium on the Polymetallic Sulphides of the Iberian Pyrite Belt*. APIMINERAL. Evora. Portugal.

Pons J.M., Agmalm G., Maestre A.J. (1996). Modelo de zonación de Cu, Pb, Zn y Ag en el yacimiento de sulfuros polimetálicos "Los Frailes". Su aplicación a la realización de un modelo de bloques zonado. *Bol. Geol. y Minero*, Vol. 107, 5 y 6: 663-672.

Quesada C. (1991). Geological constraints on the Paleozoic tectonic evolution of tectonostratigraphic terranes in the Iberian Massif. *Tectonophysics* 185:225-245.

Quesada C. (1996). Estructura del sector español de la Faja Pirítica: implicaciones para la exploración de yacimientos. *Bol. Geol. y Minero*. Vol. 107-3 y 4: 265-278.

Rodríguez P., Anderson K., Hidalgo R. (1996). El yacimiento de sulfuros polimetálicos de Aguas Teñidas. *Bol. Geol. y Minero*, Vol. 107, 5 y 6: 673-680.

Ros J.A., Menéndez A., Alvarez C. (1994). Combinación de sostenimiento y voladuras controladas en la mina Sotiel. Informe de divulgación interno de la compañía Minas de Almagrera S.A.

Ruiz de Almodovar G., Sáez R. (1992). Los yacimientos de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Sur Ibérica. Recursos minerales de España, eds. García Guinea J. y Martínez

Frías J. C.S.I.C. col. Textos Universitarios nº 15 : 1309-1324.

Ruiz Castell A. (1996). Tendencias en minería a cielo abierto. Bol. Geol. y Minero, Vol. 107, 5 y 6: 587-590.

Santos A., Caballero B., Prada J.M. (1996). Descripción geológica de los yacimientos de Sotiel Coronada. Bol. Geol. y Minero. Vol. 107-5 y 6: 511-518.

Schermerhorn L.J.G. (1971). An outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. Bol. Geol. y Minero. Vol. 82:239-268.

Silva J.B., Oliveira J.T., Ribeiro A. (1990). Structural outline of the South Portuguese Zone. En: Pre-Mesozoic Geology of Iberia. Dallmeyer, R.D., Martínez García, E. (edit.). Springer Verlag, pp. 348-362.

Strauss G., Madel J. (1974). Geology of massive sulfide deposits in the Spanish-Portuguese Pyrite Belt. Geol. Rund. 63:191-211.

Strauss G., Madel J., Fdez. Alonso F. (1977). Exploration practice for strata-bound volcanogenic sulphide deposits in the Spanish-Portuguese Pyrite-Belt. In Klemm D.D., Schneider H. (edit.), Time and strata-bound ore deposits. Springer-Verlag. pp 55-93.

Strauss G., Beck J. (1990). Gold mineralizations in the SW-Iberian Pyrite Belt. Mineral. Deposita. 25: 237-245.

Strauss G., Madel J., Fdez. Alonso F. (1974). La Faja Pirítica hispano-portuguesa y el papel de la Geofísica en su investigación minera. Industria Minera, 150:1-15.

Tornos F., González Clavijo E. (1995). Modelización del yacimiento Filón Norte-San Guillermo, en Tharsis. Incluido en "Sub-task 6-2" de "Innovative Analytical and Geophysical Technologies for Detecting Blind Polymetallic Orebodies in Southern Spain". The BRITE/EURAM Programme.

Van der Boogaard M. (1967). Geology of the Pomarao region (Southern Portugal). Ph. D. Thesis, Graf. Deltro, Rotterdam, 113p.

Van der Boogaard M., Schermerhorn L.J.G. (1980). Conodont faunas from Portugal and Southwestern Spain. Part. 4: A Famennian conodont fauna near Nerva (Río Tinto). *Scripta Geol.*, 56: 1-14.

Van der Boogaard M., Schermerhorn L.J.G. (1981). Conodont faunas from Portugal and Southwestern Spain. Part. 6: A lower Famennian conodont fauna at Monte Forno da Cal (South Portugal). *Scripta Geol.*, 63: 1-16.