

# *Ensayos geofísicos sobre el yacimiento de sulfuros polimetálicos de Las Herrerías. Puebla de la Reina. Badajoz*

José Luis GARCÍA LOBÓN (\*) y Luis BAEZA ROJANO (\*\*)

(\*) Area de Geofísica del Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE)

(\*) Dirección de Recursos Minerales del ITGE

## **RESUMEN**

Se describen en este artículo los resultados más significativos de las campañas geofísicas realizadas como apoyo a la investigación del yacimiento de sulfuros polimetálicos de Las Herrerías. Sobre el mismo se han aplicado sucesivamente, durante unos diez años de exploración intermitente, una gran diversidad de métodos: eléctricos de corriente continua, polarización inducida, métodos de campo potencial, electromagnéticos y aeroportados, todos con una amplia gama de dispositivos y espaciados. La respuesta del yacimiento es variada, permitiendo algunas recomendaciones generales en su contexto geológico.

**Palabras clave:** Puebla de la Reina, métodos geofísicos, sulfuros.

## **ABSTRACT**

This paper describes the most significant results of the geophysical surveys carried out over Las Herrerías polymetallic sulphide deposit. During a decade of exploration, a great variety of geophysical methods have been applied on the site: direct current electrical methods, induced polarization, potential field, ground electromagnetic and airborne methods, everyone with several arrays and spacings. The response from Las Herrerías body is analyzed, and some suggestions are derived for its geological setting.

**Key words:** Puebla de la Reina, geophysical methods, sulphides.

<

## **1. INTRODUCCIÓN**

Durante la realización de un trabajo de investigación geológico-minera de la División de Geología del Instituto Tecnológico Geominero de España deno-

minado «Estudio geológico de los materiales anteordovícicos, paleozoicos y rocas ígneas del anticlinorio de Oliva de Mérida (Badajoz)» (ITGE, 1981) se establecieron la serie estratigráfica y estructura del área, y se detectaron formaciones volcano-sedimentarias con gossanizaciones asociadas en diversas partes de las hojas del MTN 1:50.000 n.ºs 804 y 830 (figura 1). Asimismo, el reconocimiento y sistematización de los indicios mineros existentes, junto con los resultados obtenidos de los análisis practicados sobre muestras recogidas en ellos, permitieron seleccionar dos áreas de interés enclavadas en las proximidades de Puebla de la Reina y Oliva de Mérida.

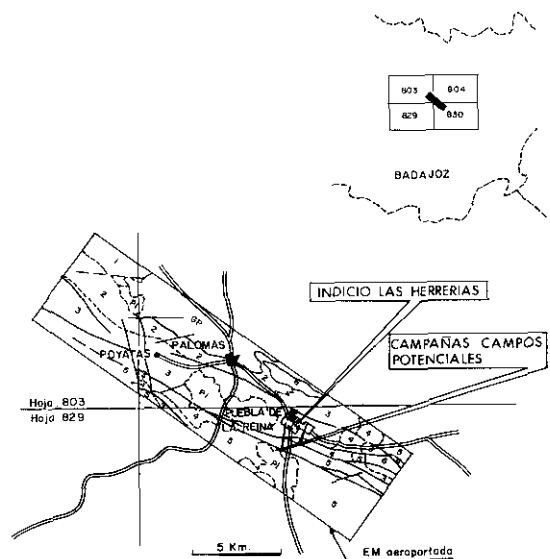


Fig. 1. Esquema geológico regional y situación de los trabajos. A/ UNIDAD PUEBLA DE LA REINA. a) Precámbrico. RIFEENSE: 1.- Pizarras, cuarcitas e intercalaciones de metavolcanitas ácidas. 2.- Pizarras y grauwacas. VENDIENSE: 3.- Metavolcanitas básicas e intermedias con intercalaciones de tobas y volcanitas ácidas. b) Ordovícico. ARENIG: 4.- Cuarcitas y pizarras (Cuarcita Armoricana). c) Devónico: 5.- Pizarras y limos con cuarcitas intercaladas. B/ UNIDAD DEL VALLE. Ordovícico. TREMADOC: 6.- Arcosas. PL: pliocuaternario. GP: granito con diferenciados gábricos.

En Puebla de la Reina, el indicio de Las Herreras (figura 1) constituyó el objetivo fundamental de las investigaciones, dadas las características especialmente atractivas del gossan, compuesto por abundantes óxidos de Fe y Cu con concentraciones locales de malaquita, azurita y cerusita, confirmadas por los elevados resultados en Zn, Cu y Pb obtenidos de sus análisis.

En la primera fase de investigación minera del indicio (Baeza Rojano 1984, 1985), se realizaron estudios geológico-mineros con cartografía de detalle, geoquímica de red de drenaje y suelos, geofísica (calicatas eléctricas, básicamente), y calicatas y sondeos mecánicos. Al final de esta etapa puede considerarse el indicio ya reconocido, y sus reservas estimadas. Hasta aquí la aplica-

ción de métodos geofísicos es escasa (el yacimiento casi «está en la calle»). Cuando se planea la extensión de la investigación según toda la banda de rocas volcánicas que enmarca el indicio (figura 1: metavolcanitas 3 en unidad A), el uso de campañas geofísicas se intensifica: primero con métodos de campo potencial y polarización inducida (PI); luego con electromagnéticos aeroportados y en tierra.

## 2. EL YACIMIENTO DE LAS HERRERÍAS

El indicio de Las Herrerías se ubica (figura 1) en materiales volcano-sedimentarios del Precámbrico superior de la denominada Unidad de Puebla de la Reina, perteneciente al Dominio Abejo-Valsequillo-Puebla de la Reina (Apalategui Isasa *et al.*, 1988), dentro de la zona de cizalla Badajoz-Córdoba que separa los terrenos de Ossa Morena y Centro Ibérico del Macizo Hespérico (Abalos y Eguiluz, 1992).

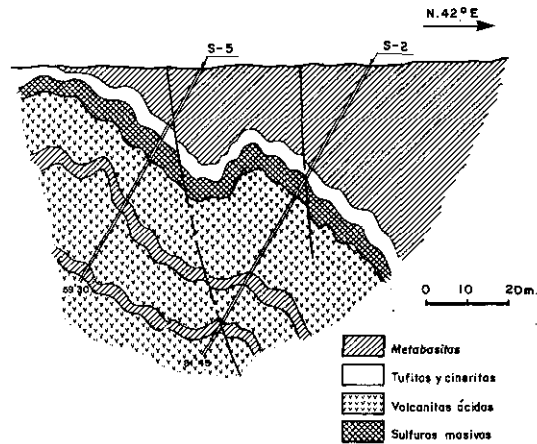


Fig. 2. Corte del indicio de Las Herrerías según los sondeos 2 y 5.

La mineralización, con carácter masivo a semimasivo, se localiza a techo de una secuencia volcánica félsica (figuras 2, 3 y 7), compuesta por tobas y lavas ácidas e intermedias con silificaciones y albitizaciones locales y en la que se intercalan niveles métricos de tobas y lavas básicas. Sobre el nivel mineralizado, que alcanza una potencia media de 6-7 metros, se sitúa una capa cinerítica muy rica, según las zonas, en clorita y gel de sílice. La sucesión volcánica culmina con un paquete de tobas básicas de granulometría variable de fino a gruesa.

La paragénesis mineral está formada por pirita y esfalerita como predominantes, calcopirita y galena en menor proporción y arsenopirita y tetraedrita como accesorios. La mineralización masiva presenta frecuentes estructuras

bandeadas de acuerdo con las diferentes concentraciones relativas de uno u otros sulfuros.

El nivel mineralizado reconocido con sondeos se sitúa en el flanco NE de una estructura anticlinal de dirección hercínica (N120-130E), con eje suavemente buzante al NO y buzamientos comprendidos entre 20 y 50°. Incluso en el borde SE de las antiguas labores que constituyen el indicio, se puede apreciar un nivel de mineralización fuertemente gosanzada, que presenta una disposición horizontal. De acuerdo con los resultados de los sondeos (figura 3), se estiman unas reservas aproximadas de 300.000 Tm, con leyes del 11% en Zn, 1.6% en Cu, 1.2% en Pb, 32 g/Tm en Ag y 0.1 g/Tm en Au.

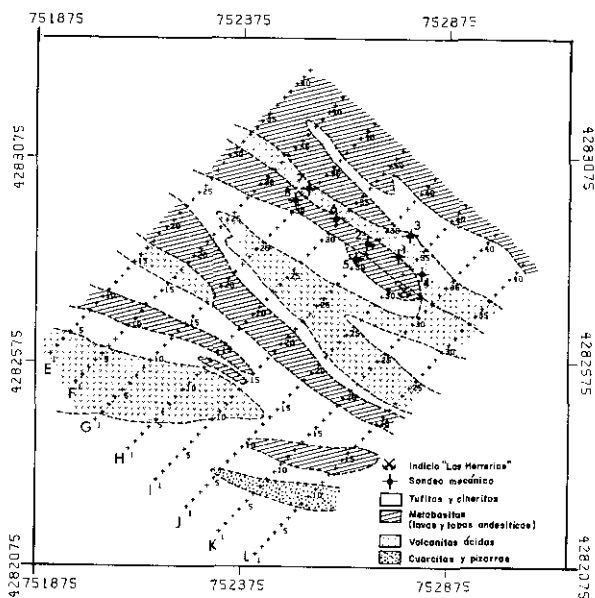


Fig. 3. Esquema geológico de detalle y perfiles medidos en la primera fase.

### 3. LA GEOFÍSICA EN LA PRIMERA FASE

En la figura 3 se representa la malla de trabajo de 25x100 m y dirección N42E sobre la que se efectuaron las mediciones geofísicas. Se indica la posición de las estaciones y la de los 8 sondeos mecánicos de esta etapa. El indicio minero (pequeña zanja de una veintena de metros) se ubica en las proximidades de la estación 30 del perfil J.

Durante la 1.ª campaña geofísica (Baeza Rojano, 1984) se midieron 4 km de calicatas eléctricas y de P.I.: perfiles I, J, K, estaciones 22 a 36 con espaciado de 12.5 m, y dispositivos dipolo-dipolo, polo-dipolo doble y de gra-

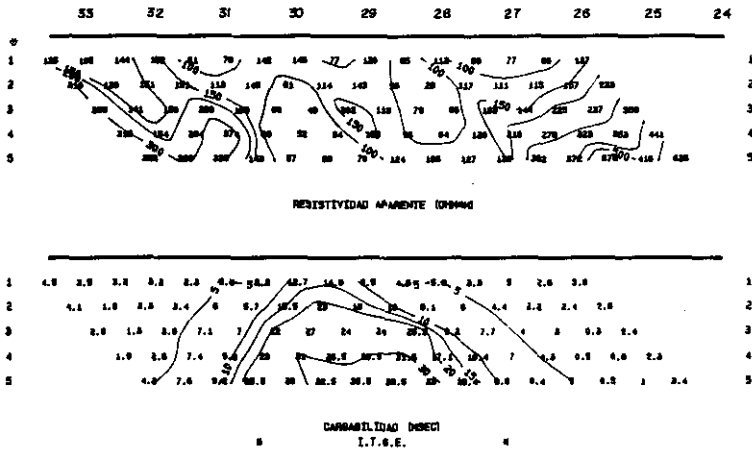


Fig. 4. Perfil J dipolo-dipolo.

dientes. Como ejemplo, en la figura 4 aparece la anomalía registrada en el perfil J. La mineralización provoca anomalías positivas de cargabilidad con valores sensiblemente más elevados que los correspondientes a la roca de caja. Aunque también es clara la respuesta de resistividades, globalmente estos perfiles resultan más complejos que los de P.I., por ser más sensibles a los cambios litológicos y de estructura. Del conjunto de datos obtenido se deduce una disposición del cuerpo subaflorente y subvertical, con mejor respuesta hacia el Oeste. Es por ello que en la 2.ª campaña geofísica (Baeza Rojano, 1985), los trabajos se prolongaron en esa dirección hasta el perfil E (la denominación de perfiles corresponde a la malla de campos potenciales, más amplia que la inicial).

En resumen, los reconocimientos geofísicos en esta etapa tuvieron un alcance limitado, tanto desde el punto de vista metodológico, pues sólo se emplearon calicatas eléctricas, como por el área cubierta: se trató simplemente de investigar la continuidad lateral del yacimiento desde el indicio existente. A este respecto, en las conclusiones de la 2.ª campaña se afirmaba literalmente: «La geofísica no detecta con nitidez la posible continuidad del indicio de Las Herrerías, solamente cuando la mineralización está prácticamente aflorante se obtienen resultados significativos... con el equipo y dispositivo empleados.»

#### 4. CAMPAÑAS GRAVIMÉTRICAS Y MAGNÉTICAS

Finalizada la primera etapa de estudio del indicio de Las Herrerías, se pretendía desde el punto de vista geofísico resolver dos cuestiones:



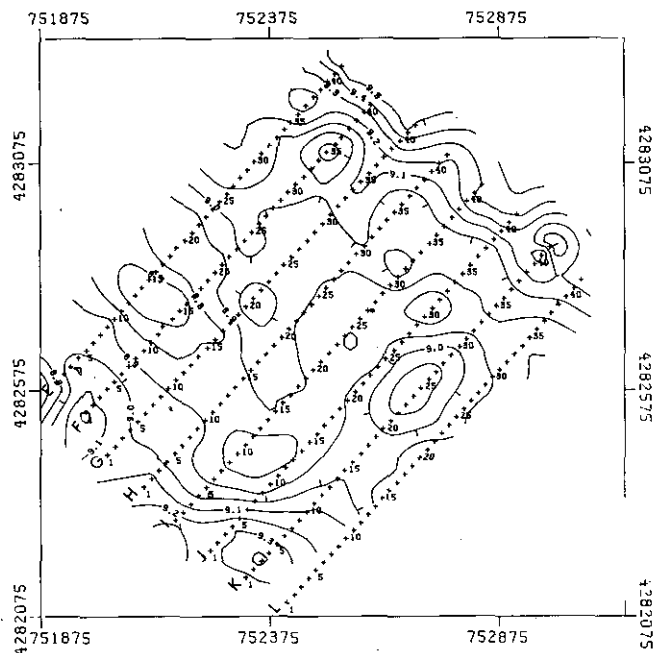


Fig. 6. Anomalía de Bouguer ( $d=2.4$  g/cc). Isocintas cada 0.1 mGal.

Las campañas (García Lobón 1986, 1987) supusieron la medición de un total de 1.472 estaciones distribuidas en 33 perfiles. En la figura 5 se representa el campo magnético total, y en la 6 el mapa de Bouguer, de los perfiles centrales E a L. Comparando las anomalías magnéticas con la cartografía geológica (figura 3), se observa que las mismas no se corresponden con las alineaciones de rocas de quimismo intermedio (metabasitas), si bien a *grosso modo* el gradiente general de las isoanómalas es perpendicular a dichas alineaciones. La anomalía magnética principal, en perfiles F y G, rompe el gradiente general y no parece estar en relación ni con el indicio minero ni con las bandas de metabasitas. Debe concluirse, por tanto, que las variaciones de susceptibilidad no son explicadas por la cartografía de superficie, pudiendo tener un origen más profundo. La mineralización de Las Herrerías no tiene respuesta magnética, ni existe marcador u horizonte magnético en relación con la misma.

En el mapa de Bouguer de la figura 6 el yacimiento es difícilmente apreciable, salvo el débil máximo en las proximidades de la estación 30 del perfil I. La anomalía positiva más relevante es la del perfil K, aproximadamente entre las estaciones 20 y 30. Esta anomalía rompe el gradiente general NS, similar al del plano magnético, de las isocintas del mapa de Bouguer, pero es difícilmente atribuible a la mineralización, pues se sitúa a unos 200 m. al S del indicio. Ténga-

se en cuenta que la dirección de los perfiles es aproximadamente perpendicular a la del yacimiento, y que éste buza al NE. Resulta significativo señalar en este punto que la anomalía teórica máxima producida por un filón de 10 m. de potencia, a 2 m. de la superficie y con una longitud según buzamiento de 100 m. (aproximación teórica por exceso a la situación real con la que se trabaja) es de 0.44 mGal para un contraste de densidades de  $1.0 \text{ g/cm}^3$ : manteniendo constantes los parámetros geométricos, la anomalía es directamente proporcional a dicho contraste (es decir, para un contraste de  $0.5 \text{ g/cm}^3$ , el máximo será de 0.22 mGal). Tan significativo como su máximo es la semianchura de anomalía o longitud en la que la anomalía es superior a la mitad del máximo, que resulta inferior a los 10 m. (compárese este dato con los 25 m. de paso de malla de la campaña). Esta anomalía teórica corresponde a un modelo muy sencillo cual es el de una lámina delgada situada en medio homogéneo con el que presenta un contraste de densidades dado. En la práctica el medio no es homogéneo, con contrastes según un espectro variable, lo que produce el efecto de obscurecer la anomalía, de añadirle ruido. Todo ello puede explicar que un cuerpo de las dimensiones del estudiado y que, según los sondeos mecánicos realizados, aparece como masivo próximo a la superficie pero que se va diseminando en profundidad (con las consecuencias que esto tiene sobre el contraste de densidades en un ambiente geológico «ruidoso» como es el caso de las series volcano-sedimentarias), tenga una respuestas al método gravimétrico tan débil que pase casi desa-

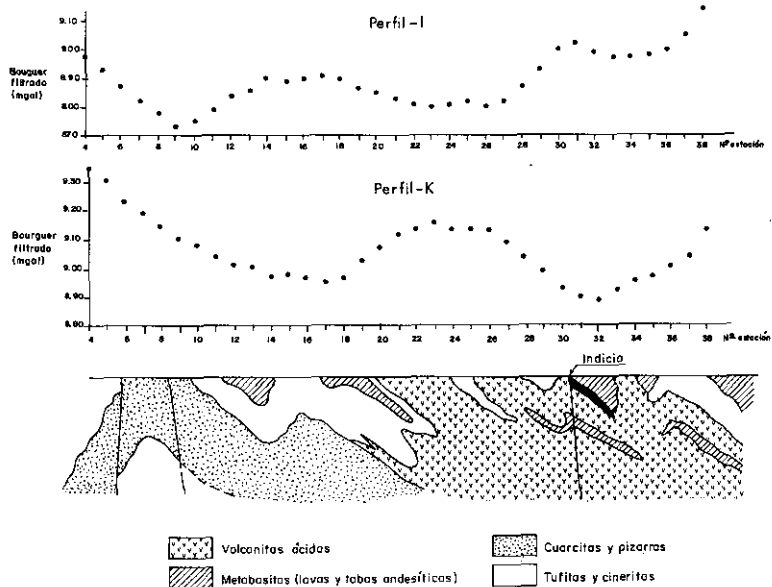


Fig. 7. Perfiles gravimétricos I y K y corte geológico supuesto.



percibido ante el mismo como parece ocurrir en el mapa de Bouguer. Sobre perfil, figura 7, se registra una anomalía muy débil entre las estaciones 29 y 32 en el I, pero que ha desaparecido en el K, 200 m. al Este del anterior. Obsérvese en los perfiles que podría trazarse una regional tipo cubeta señalada en el mapa de Bouguer por los gradientes más arriba citados, sobre la que se superpondrían dos anomalías residuales: una importante, la del perfil K, que sigue perfectamente hacia el NW en los perfiles J e I, y otra menos relevante, que se encuentra enmascarada por los gradientes regionales, debida a la mineralización.

En resumen, y volviendo a los objetivos citados al principio de este epígrafe, respecto a la obtención de estimaciones cuantitativas (límites, volumen, etc.) del yacimiento de Las Herrerías, los datos de campo magnético tienen escasa o nula significación, mientras que entre las anomalías de Bouguer apenas si destaca la correspondiente al mismo. Respecto a la detección de masas ocultas, en los mapas globales de toda la zona cubierta por la malla de trabajo (figura 1) aparecieron una serie de anomalías, algunas de las cuales se sondearon con resultado negativo.

## **5. LOS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS**

### **5.1. Métodos aeroportados**

Dado que el ensayo con métodos de campo potencial no ofreció los resultados esperados, hacia finales de 1987 se programó una campaña electromagnética heliportada (Baeza Rojano, 1988) con el objetivo, no sólo de incidir nuevamente en el estudio cuantitativo del yacimiento de Las Herrerías, sino de cubrir una amplia zona de trabajo dentro de la banda volcanosedimentaria (figura 1) donde detectar anomalías de posible interés minero, que serían posteriormente investigadas en detalle con métodos electromagnéticos terrestres.

Las características del vuelo eran:

- Altura: 60 m. (sensor a 30 m.).
- Líneas: 69 (410 km. en total). Espaciado: 300 m. Dirección: N35E.
- Sistema de posicionamiento: radionavegación con Motorola Mini-Ranger (MRSIV).
- Mediciones: campo electromagnético en el dominio de la frecuencia (900-35.000 Hz, 2 bobinas coplanares CP y 2 coaxiales CX), campo magnético total y V.L.F. Lecturas cada: 0.1 s (EM), 0.2 s (magnético), 0.5 s (VLF y altimetría) y 1 s (navegación).
- Especificaciones técnicas: toma de datos ( $V_m=90$  Km/h., altura media sistema EM=30 m., no más de 50 m. sobre distancias superiores a 250 m., desviación máxima de 50 m. sobre no más de 750 m.); material utilizado:

- \* Magnetómetro de alta sensibilidad (0,01 gamma) de vapor de Cesio en el helicóptero y magnetómetro al suelo con registro analógico y numérico.
- \* Un sistema electromagnético operando con las frecuencias CX 935 Hz y CX 4600 Hz, CP 4175 Hz y CP 32 KHz.
- \* Un altímetro radar y/o laser.
- \* Un sistema para la navegación y la restitución de los perfiles volados, ésta última con margen de error inferior a los 5 m.

Una vez procesados los datos, se obtuvieron: perfiles electromagnéticos correspondientes a cada una de las modalidades de operación, mapas de campo magnético total, mapas de resistividad y mapas de síntesis con indicación de anomalías conductoras.

En la figura 8 se observa la síntesis de anomalías del vuelo en la zona de Puebla de la Reina. El indicio se sitúa, aproximadamente, en la intersección del perfil J y la línea de vuelo 1210. En esta figura se representan anomalías

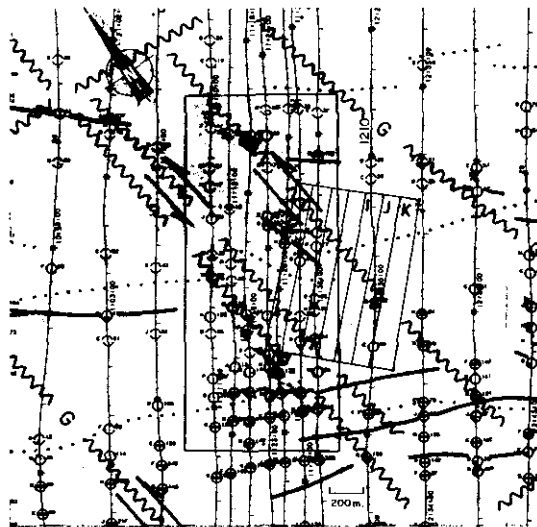


Fig. 8. Síntesis de anomalías de la geofísica heliportada. Zona Puebla de la Reina.

EM (círculos), ejes conductores derivados de éstas (líneas gruesas), ejes magnéticos (puntos) y fallas interpretadas a partir del campo magnético total y del gradiente magnético vertical. La figura 9 consta de varios perfiles EM de forma seriada: se indican para la línea 1210 las componentes secundarias co-axiales a 4600 Hz Cxf (en fase) y Cxq (en cuadratura) ambas a 4 ppm/mm., y las coplanares a 4175 Hz Cpf y Cpq a 16 ppm/mm. Los círculos representan

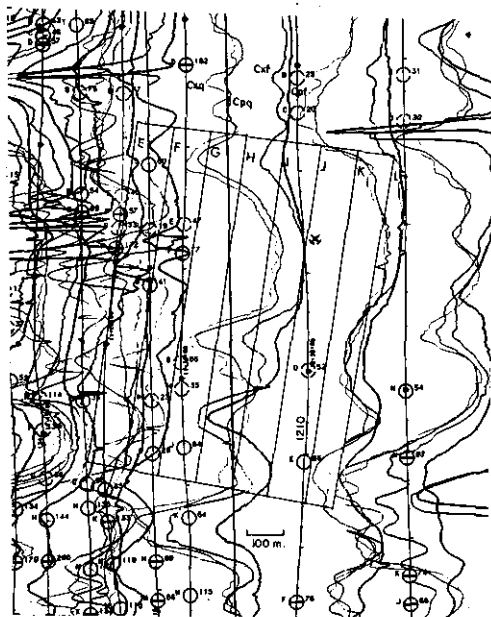


Fig. 9. Líneas de vuelo seriadas sobre el indicio de Las Herrerías: perfiles coaxiales (Cxf, Cxq), coplanares (Cpf, Cpq) y anomalías EM.

anomalías EM tipo lámina vertical (máximos de las componentes coaxiales coincidentes con pasos próximos a cero de las coplanares, v.g., las anomalías B y C de la línea 1210 previa a la marca de las 19:29:30). La calidad del conductor viene dada por la relación entre las componentes en fase y cuadratura, y se simboliza por un código de conductancia (círculos a trazos, 0-1 mhos; continuos, 1-2 mhos; con un diámetro, 2-4 mhos; con un cuadrante relleno, 4-8 mhos; con dos, 8-16; etc.). Una conductancia elevada (mayor a 4) indica que una fracción significativa de la conducción eléctrica es de naturaleza electrónica en lugar de electrolítica, lo que en la práctica supone la presencia de sulfuros metálicos o niveles grafitosos. Sin embargo, un valor de conductancia bajo no descarta la posibilidad de una mineralización económica significativa. El problema de la interpretación de los perfiles EM es que normalmente presentan un nivel de actividad elevado, lo que obliga a comprobar primero la calidad del registro línea a línea para el control de todo tipo de ruidos (instrumentales, picos ocasionados por turbulencias, ruidos culturales debidos a vallas metálicas, líneas eléctricas, etc, ruidos geológicos superficiales, v.g., aluviales de la red de drenaje, etc.). Normalmente, las anomalías se obtienen sobre los perfiles coaxiales y se validan con los coplanares. Las selecciones hechas a mano se cruzan con las realizadas con programas de ordenador, que permiten el ajuste o rechazo por ruido. Cada conductor o grupo de ellos se valora también por correlación con anomalías en mapas de resistividad aparente (derivada para un modelo de una capa conductora sobre basamento resisti-

vo a partir de la altura del sensor y la amplitud coaxial a 4.600 Hz), VLF y magnéticos (campo total y gradiente vertical), y por supuesto, por su ubicación litológica y estructural. Todo ello, permite establecer categorías entre las anomalías según su posible interés minero.

En definitiva, aunque la interpretación de los datos del vuelo heliportado puede resultar compleja, lo que se desprende de las figuras 8 y 9 es la opacidad del indicio de las Herrerías. Sin duda, su alto contenido en blenda perjudica su respuesta como conductor electrónico. Comprobado sobre el terreno el grupo de anomalías del NO de los perfiles E, F y G, se estima que son debidas a vallas metálicas.

Respecto a otras zonas de anomalía en la banda volcánica de la figura 1, y aunque a partir de 1988 bajó el nivel de actividad exploratoria en todo el área, se realizaron algunas campañas de geofísica terrestre (P.I. García Lobón, 1989; 1993) previas a la ubicación de sondeos.

## **5.2. Métodos electromagnéticos de superficie**

Ante la respuesta del indicio de Las Herrerías a los métodos aéreos, quedaba por resolver la cuestión de evaluar las posibilidades de detección de cuerpos de sulfuros masivos mediante técnicas electromagnéticas tanto en el dominio de la frecuencia como del tiempo, y promover su uso a todo el área de investigación tal como se preveía en el proyecto aeroportado. Desgraciadamente, debido a la baja de actividad citada, no fue hasta 1992 cuando, al amparo del acuerdo de cooperación científico-técnica Hispano-Húngaro, un equipo geofísico ITGE-ELGI (Eotvos Lorrand Geophysical Institute) realizó varias pruebas en la zona, que vamos a describir brevemente.

El equipo de medida en el dominio de la frecuencia fue el Maxi-Probe EMR-16 (Geoprobe Ltd, Canada. Sinha 1979), que opera con 256 frecuencias en el rango de 1 a 60.000 Hz. La fuente es un dipolo magnético vertical que genera un campo primario, y en el receptor (2 bobinas perpendiculares) se leen la relación entre las componentes vertical y horizontal magnéticas del campo electromagnético resultante del acoplamiento entre la fuente y el terreno, y el desfase entre ellas. La separación entre transmisor y receptor puede variar entre unos 20 y 1500 m. En la modalidad de sondeos se emplean hasta 30 frecuencias, y se obtiene por proceso una curva profundidad-resistividad aparente. En la modalidad de calicatas o perfilaje se usan de 6 a 12 frecuencias, y se calcula el ángulo de inclinación del eje mayor de la elipse de polarización. Las configuraciones transmisorreceptor pueden variarse de acuerdo con la topografía, modelo geológico, profundidad de investigación, ruidos, resolución y eficiencia.

En el dominio del tiempo se empleó un receptor Protem en combinación con el transmisor EM47 (Geonics Ltd, Canada. McNeil 1980). En este dominio, por el bucle transmisor se hace circular una corriente bipolar que genera un campo magnético primario Hp (figura 10-a). Al interrumpirse bruscamente la

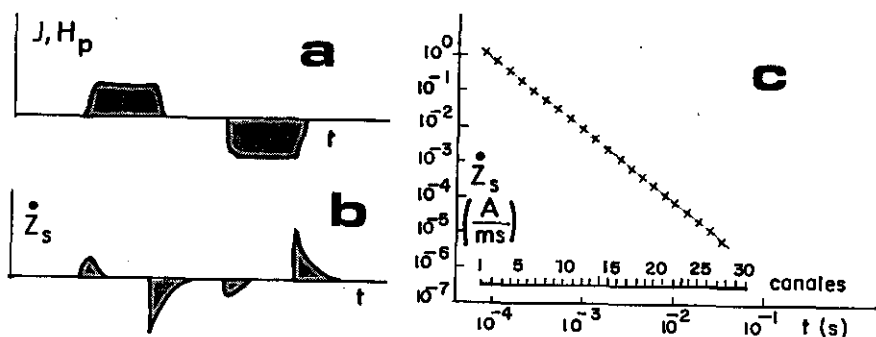


Fig. 10. Acoplamiento EMDT. a) Corriente en el transmisor. b) Campo secundario en la superficie. c) Señal en el receptor.

corriente, la variación del primario induce corrientes secundarias en el semi-espacio conductor que constituye el terreno, y un campo magnético asociado  $H_s$ . Una pequeña bobina receptora sirve para medir la variación en el tiempo (en ventanas logarítmicamente distribuidas, desde pocos  $\mu s$  a decenas de ms) de la componente vertical de éste  $s$  (figuras 10-b, 10-c). Se utilizaron dos configuraciones: coaxial (el receptor se ubica en el centro del transmisor, figura 11-a) y dipolo-dipolo (figura 11-b). El bucle transmisor era un cuadrado de 25 m. de lado, y se realizaron lecturas en perfiles también cada 25 m. Las lecturas se presentan como perfiles apilados según cada ventana o canal. Se midieron los perfiles G, I y K (figura 3).

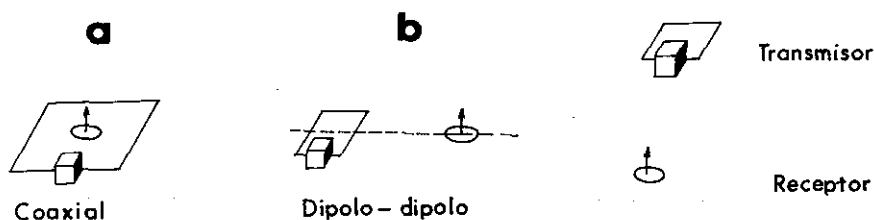


Fig. 11. Dispositivos EMDT. a) coaxial. b) dipolo-dipolo.

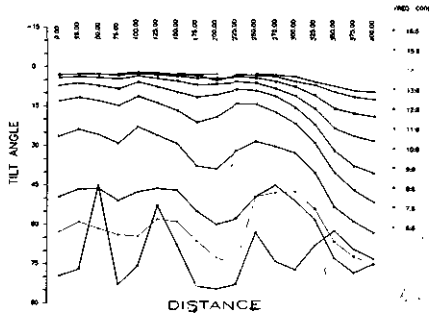


Fig. 12. EM dominio de la frecuencia. Transmisor fijo. Perfil I.

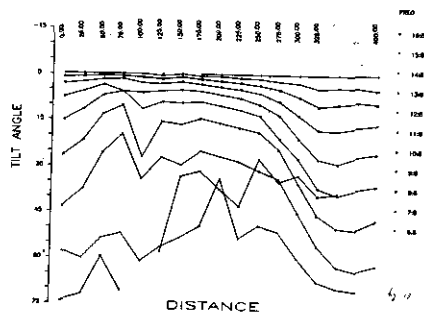


Fig. 13. EM dominio de la frecuencia. Transmisor fijo. Perfil K.

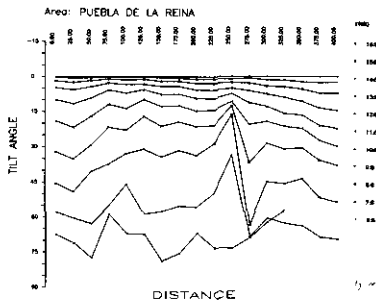


Fig. 14. EM dominio de la frecuencia. Transmisor fijo. Perfil G.

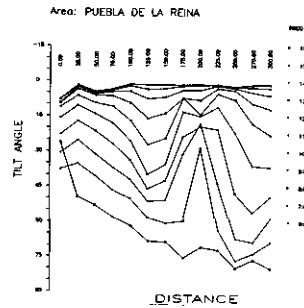


Fig. 15. EM dominio de la frecuencia. Dispositivo dipolo-dipolo en línea. Perfil I.

Los resultados en el dominio de la frecuencia se observan en las figuras 12 a 15 (en todas estas figuras los perfiles se inician en la estación 38, ó 0.00 m., prolongándose hasta la 22, ó 400 m.). La primera configuración usada fue un dispositivo de perfilaje, con el transmisor fijo (2 bobinas de 50 m. de diámetro situadas a 400 m. del comienzo de la línea en la estación 38) y el receptor móvil según el perfil. Se obtuvieron dos tipos de anomalía. En el perfil I (figura 12) la comprendida entre 125 y 250 m. debe interpretarse como la respuesta del yacimiento (una placa conductora en un semiespacio no horizontal resistivo). A 14:8 (14.6 KHz) el efecto máximo se produce en la estación 29 (225 m.), y a 7:8 (114.4 Hz) en la 30 (200 m.). Se detecta otro tipo de anomalía entre 250 y 400 m., en la que el aumento del ángulo de inclinación se produce en todo el rango de frecuencias utilizado. Esto significa una caída de resistividad, que puede interpretarse como una falla o una capa conductora entre 275 y 300 m. Efectos similares se registraron en los perfiles K y G, por lo que se trata de un contraste de rumbo paralelo al del yacimiento. Sin embargo, en estos perfiles, la respuesta del cuerpo de Las Herrerías es mucho más pobre (figuras 13 y 14).

La segunda configuración ensayada en el dominio de la frecuencia fue una dipolo-dipolo (fuente: bucle de 10 m. de diámetro) según el perfil, con una se-

paración de 150 m. En la figura 15 se observa una anomalía simétrica respecto a la estación 200 m. (situación aproximada del yacimiento), más acentuada que la de transmisor fijo (el efecto es máximo cuando el transmisor o el receptor están sobre el objetivo). Aún la anomalía es de mayor gradiente con un dipolo-dipolo perpendicular al perfil (figura 16). Estos últimos datos fueron transformados en curvas de resistividad aparente (figura 17): el yacimiento puede interpretarse directamente en las curvas de 175 y 200 m.

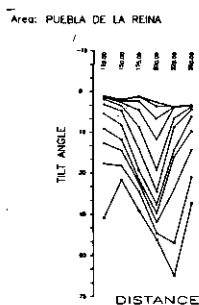


Fig. 16. EM dominio de la frecuencia. Dispositivo dipolo-dipolo normal al perfil. Perfil I.

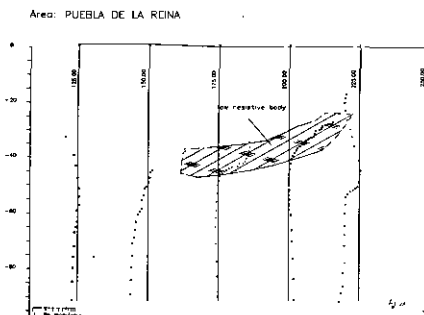


Fig. 17. EM dominio de la frecuencia. Dispositivo dipolo-dipolo normal al perfil. Curvas de resistividad aparente/profundidad. Perfil I.

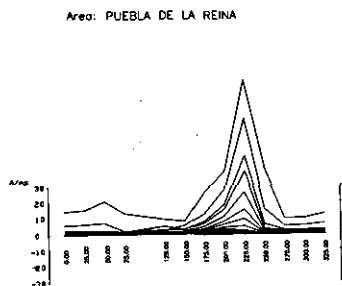


Fig. 18. EM dominio del tiempo. Dispositivo coaxial. Perfil I.

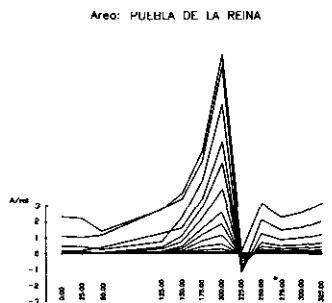


Fig. 19. EM dominio de tiempo. Dispositivo dipolo-dipolo. Perfil I.

En el dominio del tiempo se trabajó con 2 frecuencias: 315 y 70 Hz. Sólo se presentan los resultados de la primera, dada la mejor relación señal /ruido obtenida y la escasa profundidad del objetivo. La figura 18 corresponde al perfil I, dispositivo coaxial. Se registra una intensa anomalía positiva entre 150 y 250 m., con máximo a 225 m., que indica un cuerpo conductor con buzamiento N. Con dispositivo dipolo-dipolo, figura 19, se obtiene una anomalía que concuerda muy bien con la teórica producida por una lámina conductora próxima a los 225 m. (figura 20. Ogilvy 1986), con buzamiento pequeño (20-40°) dado el fuerte contraste entre los valores positivos y negativos y la asimetría (si la lámina fuese vertical, la anomalía sería simétrica).

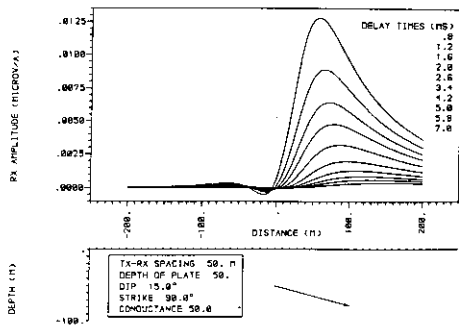


Fig. 20. Curvas de respuesta teórica de una placa conductora (Ogilvy 1986).

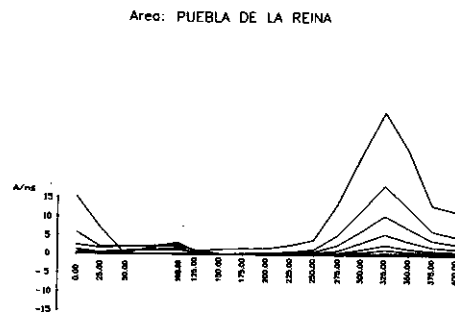


Fig. 21. EM dominio del tiempo. Dispositivo coaxial. Perfil K.

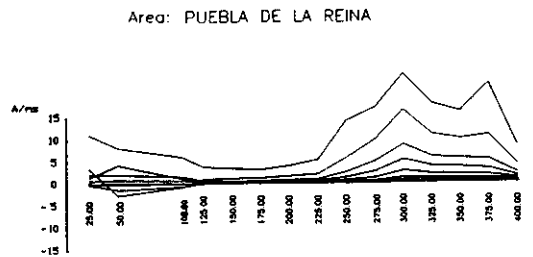


Fig. 22. EM dominio de tiempo. Dispositivo dipolo-dipolo. Perfil K.

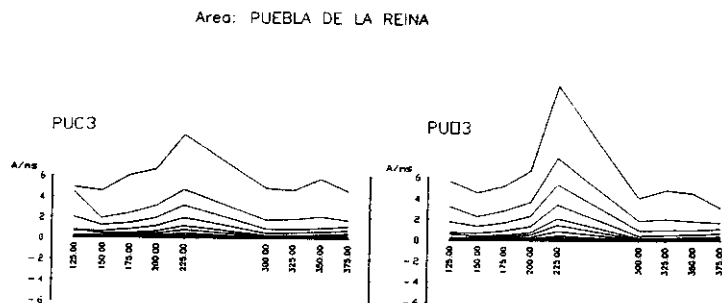


Fig. 23. EM dominio del tiempo. Perfil G: a) Coaxial b) Dipolo-dipolo.

En el caso del perfil K, figuras 21 y 22, no se registran valores negativos de  $Z_s$ , simplemente aparece un aumento de la conductividad a partir de los 225 m. Esto podría ser un contraste lateral formacional, o deberse a la presencia de diseminaciones en la secuencia. En el perfil G, figura 23, no se pudieron medir las estaciones 250 y 275 m. por la presencia de una valla



metálica, lo que produce ambigüedad en su interpretación. Existe un máximo a 225 m. En general, los resultados se parecen más a los del perfil K que a los del I.

En resumen, el ensayo electromagnético en tierra demuestra la detectabilidad del yacimiento de Las Herrerías, tanto en el dominio de tiempo como de la frecuencia y con una gran variedad de dispositivos. Entre éstos se recomiendan el de fuente fija en el dominio de frecuencia y el dipolo-dipolo en el del tiempo: en el primer caso la anomalía de una lámina conductora superficial se destaca a altas frecuencias, y va desapareciendo a bajas (en esta situación la profundidad puede ser estimada como inferior a  $l/4$ , siendo  $l$  la distancia fuente-receptor); en el segundo caso la respuesta se mantiene incluso a bajas frecuencias. El dispositivo dipolo-dipolo (tiempos) es superior al de fuente fija (frecuencias) si se pretende derivar información cuantitativa (profundidad, buzamiento) por comparación con curvas teóricas. En el caso del dominio de la frecuencia habría que recurrir al dispositivo dipolo-dipolo perpendicular al perfil para obtener estos datos.

En general, pues, ambos dominios son equivalentes, aunque desde el punto de vista práctico existen diferencias: las lecturas en el dominio del tiempo son más rápidas con cualquier geometría, pero en cambio, son más sensibles a ruidos.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha descrito la utilización de una amplia gama de métodos y dispositivos geofísicos en la investigación del indicio de sulfuros polimetálicos de Las Herrerías. Aunque la mejor respuesta se obtuvo con métodos electromagnéticos sobre terreno (las calicatas eléctricas y de PI a veces resultaron contradictorias, la gravimetría apenas si detectó el indicio por su escaso volumen, y su regular calidad como conductor lo hizo opaco frente a los métodos heliportados), la metodología aplicable en la prospección de este y otros tipo de yacimientos es comenzar con métodos aéreos por su amplia cobertura e inferior coste unitario. Las anomalías más interesantes pueden verificarse posteriormente en tierra mediante gravimetría (aunque el yacimiento de Las Herrerías se encuentra en el límite de detectabilidad frente a ésta, se trata de un método fiable para delinear masas densas en contextos volcanosedimentarios como lo prueban numerosos ejemplos en la Faja Pirítica Ibérica), o calicatas EMDT. Desde el punto de vista del ensayo y análisis geofísico, estas últimas han sido las más efectivas en el caso presentado en esta publicación.

## REFERENCIAS

- ABALOS, B., y EGUILUZ, L. (1992): *Evolución geodinámica de la zona de ci-zalla dúctil de Badajoz-Córdoba durante el Proterozoico Superior al Cámbrico Inferior*. J. G. Gutiérrez Marco, J. Saavedra & J. Rábano editores. Paleozoico Inferior de Ibero-América: 577-591.

- APALATEGUI ISASA, O.; CONTRERAS VÁZQUEZ, F.; ARRIOLA GARRIDO, A.; EGUILUZ ALARCÓN, L.; GARROTE RUIZ, A., e HIGUERAS HIGUERAS, P. (1988): *Hoja número 830 Hornachos*. Mapa Geológico de España 1:50.000. ITGE.
- BAEZA ROJANO, L. (1984): *Exploración minera en las zonas de Oliva de Mérida y Puebla de la Reina (Badajoz)*. Fondo documental ITGE. Doc. 10.958.
- BAEZA ROJANO, L. (1985): *Ampliación a la exploración de sulfuros polimetálicos en el sector de Puebla de la Reina (Badajoz)*. Fondo documental ITGE. Doc. 11.138.
- BAEZA ROJANO, L. (1988): *Informe sobre la exploración aérea combinada magnética, electromagnética y V.L.F. Areas de Puebla de la Reina, Sierra de la Grana y Cerro Muriano. Provincias de Badajoz y Córdoba*. Fondo documental ITGE. Doc. n° 40.436.
- FRASER, D. C. (1978): «Resistivity mapping with an airborne multicoil elec-tromagnetic system». *Geophysics* 43, 144-172.
- FRASER, D. C. (1979): «The multicoil airborne electromagnetic system». *Geophysics* 44, 1367-1394.
- GARCÍA LOBÓN, J. L. (1986): *Estudio gravimétrico y magnético en Puebla de la Reina (Badajoz)*. Fondo documental ITGE. Doc. n° 40.309.
- GARCÍA LOBÓN, J. L. (1987): *Ampliación de la prospección gravimétrica y magnética en Puebla de la Reina (Badajoz)*. Fondo documental ITGE. Doc. n° 40.333.
- GARCÍA LOBÓN, J. L. (1989): *Prospección mediante Polarización Inducida y magnético en Puebla de la Reina-Palomas*. Fondo documental ITGE. Doc. n° 40.359.
- GARCÍA LOBÓN, J. L. (1993): *Campaña de Polarización Inducida en la zona de las Poyatas (Badajoz)*. Fondo documental ITGE. Doc. 40.428.
- KARDEVAN, P. (1992): *Investigation of the application possibilities of time and frequency domain multiparametric electromagnetic methods in the case of ore prospecting models of Spain*. Fondo documental ITGE. Doc. n° 40.420.
- OGILVY, R. D. (1986): «Theoretical transient EM response curves over a thin dipping dyke in free space. Separated in line loop configuration». *Geophysical Prospecting* 34: 769-788.
- OGILVY, R. D. (1987): «Interpretation of transient EM common-loop anomalies by response characteristics». *Geophysical Prospecting* 35: 454-473.
- SINHA, A. K. (1979): *Maxiprobe EMR-16: a new wide-band multifrequency ground EM system*. Geol. Survey of Canada, paper 79-1B: 23-26.
- MCNEIL, D. J. (1980): «Applications of transient electromagnetic techniques». *Technical note TN-7*. Geonics Ltd.