

Caracterización electromagnética de depósitos de sulfuros masivos: modelización tridimensional, inversión bidimensional y test de sensibilidad

Deep electromagnetic imaging of massive sulphide deposits: 3-D forward modelling, 2-D inversion and sensitivity tests

P. Queralt⁽¹⁾, A. G. Jones⁽²⁾ y J. Ledo⁽²⁾

⁽¹⁾Dept. de Geodinàmica I Geofísica. Universitat de Barcelona, Martí i Franqués s/n 08028, Barcelona, pilar@geo.ub.es

⁽²⁾ Geological Survey of Canada, 615 Booth St.K1A OE9, Ottawa, Canada, jones@cg.Nrcan.gc.ca, ledo@cg.NRCan.gc.ca

SUMMARY

A detailed three-dimensional (3-D) numerical electrical resistivity model of the Bathurst No. 12 deposit (New Brunswick, Canada) has been constructed using available geological and geophysical information. This model facilitates studies of the capabilities of audio-magnetotellurics (AMT) at locating and defining mineral targets at depth, and of methods of optimising data acquisition. Different conditions were analysed: presence of overburden, dimensions and positions of the ore body, and varying data sampling. The behaviour of 3-D electromagnetic fields is compared with ones from a body of infinite length extent (a two-dimensional case). The 3-D and 2-D AMT responses are similar at high frequencies so 2-D modelling is sufficient. However, at low frequencies only those responses for current flow perpendicular to the body (the Transverse Magnetic mode in a 2-D case) are reasonably alike. The different 2-D inversions carried out in this study show that the position and the top of the 3-D ore body are well resolved in contrast to the bottom and the resistivity of the body.

1. INTRODUCCIÓN

El método audiomagnetoteléurico (AMT) se utiliza cada vez más en Canadá para detectar cuerpos minerales profundos. En el último año, se han realizado más de 15.000 sondeos principalmente en Voisey Bay, Sudbury Basin y Thompson Nickel Belt. En las campañas de Voisey Bay y Sudbury Basin se ha demostrado que el método AMT es eficiente para la exploración de mineralizaciones conductoras profundas que no pueden ser detectadas mediante los métodos EM convencionales. Sin embargo, además de detectar la presencia del cuerpo mineralizado, se pretende evaluar el posible potencial económico minero a partir de la estimación de su geometría y propiedades físicas internas.

El objetivo principal del presente estudio es demostrar que el método AMT es útil para **detectar** mineralizaciones conductoras, y también para **delinear** el cuerpo mineralizado. Debido a la complejidad de los cuerpos mineralizados, la modelización 3D es indispensable, pero los algoritmos de inversión tridimensionales no son todavía viables. Por ese motivo es habitual la inversión bidimensional de datos tridimensionales pero las limitaciones de este procedimiento no están suficientemente comprendidas y tenidas en cuenta. Existen distintos estudios sobre como conocer y evitar los efectos 3D en las interpretaciones 2D (e.g Wannamaker et al. 1984.; Garcia et al. 1999; Ledo et al. 2001) y en la actualidad, con el uso de la AMT para la búsqueda de cuerpos mineralizados profundos, estos estudios son de suma importancia y se plantean no ya en términos de como "evitar los efectos 3D", sino de como "delinear los cuerpos 3D" a partir de sus respuestas. Las principales cuestiones que se plantean son: ¿Puede el método AMT determinar la geometría de estos cuerpos?, ¿Cuáles son las dificultades principales? ¿Cómo pueden optimizarse tanto la adquisición de datos como la interpretación de los mismos?

Con el fin de abordar estas cuestiones, se ha construido un modelo 3D numérico de un cuerpo realista, complejo y que se conoce en detalle, y se ha estudiado la respuesta que se podría obtener de hipotéticos sondeos realizados sobre él.

2. DISEÑO DEL MODELO 3D

Para la elección del cuerpo mineralizado a modelar, se ha tenido en cuenta poder disponer de información suficiente y de carácter público. Recientemente, el Geological Survey of Canada, ha publicado una información geológica y geofísica muy completa del campo de minas Bathurst, en New Brunswick (Canadá) (Thomas et al. 2000). Se ha elegido el depósito Brunswick n. 12, que es uno de los mayores depósitos de sulfuros masivos de la zona.

El diseño del modelo numérico 3D del cuerpo se ha realizado teniendo en cuenta la información obtenida en Thomas et al. (2000)

y las referencias allí incluidas. Siguiendo Katsube et al. (1997) se han considerado diferentes zonas de resistividad correspondientes a las distintas rocas encajantes, sin embargo, a efectos de simplificar los resultados, presentamos aquí el caso más simple del cuerpo conductor en un medio encajante uniforme resistivo con un recubrimiento de 9 m de espesor. La forma irregular del cuerpo en profundidad se ha podido diseñar a partir de los cortes geológicos de Luff et al. (1992). En la figura 1 se presenta un esquema del cuerpo. A partir de este cuerpo, se han construido otros modelos 3D variando algún parámetro geométrico, en particular la influencia de la longitud del strike. En la tabla 1 se presenta un resumen de los modelos 3D estudiados.

Tabla 1. Modelos tridimensionales (Tridimensional models)

Modelo 3-D	Y:X (strike)	PARÁMETROS
Body	1:4	Cuerpo: 2Ω.m
Body-10	1:10	Profundidad máxima $z_{max} = 1375$ m
Body-2-D	1:∞	Rocas encajantes: 1000 Ω.m
Body-x	1:40	Recubrimiento de 100 Ω.m y de 9 m espesor
Body-x2	1:2	
Body-z	1:4	Como el primer modelo pero $z_{max} = 1125$ m
Body-z2	1:4	Como el primer modelo pero $z_{max} = 850$ m
Bth-1bis	1:4	Cuerpo: 2Ω.m Profundidad máxima $z_{max} = 1375$ m Rocas encajantes: 1000 Ω.m Sin recubrimiento
Body-over	1:4	Cuerpo: 2Ω.m Profundidad máxima $z_{max} = 1375$ m Rocas encajantes: 1000 Ω.m Recubrimiento de 100. Ω.m y de 75 m espesor

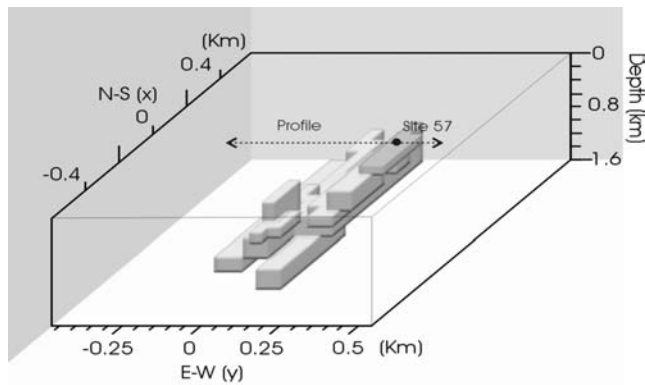


Figura 1 – Esquema del cuerpo mineralizado. (Sketch of the ore body)

3. RESPUESTA ELECTROMAGNETICA DEL MODELO

Los datos sintéticos se han calculado con el algoritmo de Mackie et al. (1994), con las modificaciones recientes de R. Mackie y J. Booker (comunicación personal, 1999). La malla de discretización utilizada es un compromiso entre los parámetros del modelo (tamaño del cuerpo y conductividad, localización de los sondeos, espesor del recubrimiento) y los límites computacionales. En todos los casos se ha asegurado la convergencia del modelo refinando la malla hasta alcanzar una solución estable. La malla final utilizada es de 86 (E-W) x 99 (N-S) x 50 (vertical) elementos con un espaciado horizontal de 12.5 metros en la zona cercana y sobre el cuerpo. La respuesta en superficie se ha calculado para 11 frecuencias entre 10,000 Hz y 0.04 Hz. La respuesta 3D se ha validado también comparando los resultados para un cuerpo 3D con strike infinito con la respuesta que se obtiene para el mismo modelo con el algoritmo de modelización 2D de Wannamaker et al. (1987). Todos los modelos resumidos en la tabla 1 se ha calculado con mallas del mismo tamaño.

La figura 2 muestra las pseudo secciones de resistividad aparente y fases obtenidas para el perfil central en dirección Y (E-W, ver figura 1) para el modelo llamado “Body” en la tabla 1. A pesar de que el cuerpo sea 3D, debido a su forma alargada, se puede considerar que tiene un strike dominante en dirección X (N-S). Las características más significativas del comportamiento de la resistividad aparente XY se presenta para bajas frecuencias (< 100 Hz): en la vecindad del cuerpo presenta unos valores bajos anómalos en comparación con la respuesta 2D, es decir para un cuerpo con strike infinito. Las fases para los sondeos situados sobre el cuerpo son muy altas (cerca de 78°) pero no se presenta valores fuera del cuadrante ($0^\circ - 90^\circ$).

Se han estudiado también el comportamiento de los campos electromagnéticos y un resultado significativo es que los campos magnéticos horizontales son prácticamente constantes, no se ven afectados por la presencia del cuerpo.

4. INVERSION BIDIMENSIONAL

Se han realizado diferentes ensayos de inversiones 2-D con distintos conjuntos de datos: inversión conjunta de los modos XY y YX, inversión sólo de XY o YX, inversión separada de fases y resistividades, distintos rangos de frecuencias, y separaciones entre los sondeos. Las inversiones 2D se han realizado con distintos algoritmos: 2-D RLM2DI de Rodi y Mackie (2001); 2-D Rapid Relaxation Inverse (RRI) de Smith y Booker (1991) y REBOCC de Siripunvaraporn y Egbert (2000) que permite además la inversión de las funciones de transferencia geomagnéticas (TZ).

En la tabla 2 se resumen las inversiones más significativas y todas ellas corresponden al perfil central (figura 1) para el modelo “Body” (tabla 1). Aunque la estrategia de inversión es distinta para cada algoritmo de inversión 2D, los resultados que se muestran en la tabla 2, referidos al RLM2DI, son muy similares a los ensayos

realizados con el RRI y el REBOCC. Además, los modelos finales obtenidos son también muy similares para cada caso. La posición y el techo del cuerpo están bien resueltos, mientras que la base y la resistividad del cuerpo no lo están. Más detalles sobre las inversiones 2D realizadas puede encontrarse en Queralt et al. 2001.

Tabla 2. Inversiones bidimensionales del perfil central (2-D inversion of the central profile)

RLM2DI	Datos invertidos	n. iter.	RMS	Caso
Body-001 (22 sondeos espaciados 50 m sobre el cuerpo). Todos las frecuencias	Todos	66	4.85	A
	Fases	28	1.2	B
	YX	62	1.43	C
	XY	19	9.56	D
Body-001 Rango de frecuencias: superiores a 10 Hz	Todos	49	3.98	E
	Todos	53	2.85	F
Body-11 (16 sondeos espaciados 100 m sobre el cuerpo) Todas las frecuencias	Todos	76	4.59	G
	Todos	86	3.76	H
Body-11-2 (14 sondeos) Todas las frecuencias	Fases	9	0.99	I
	XY	29	5.64	J
	YX	67	1.09	K

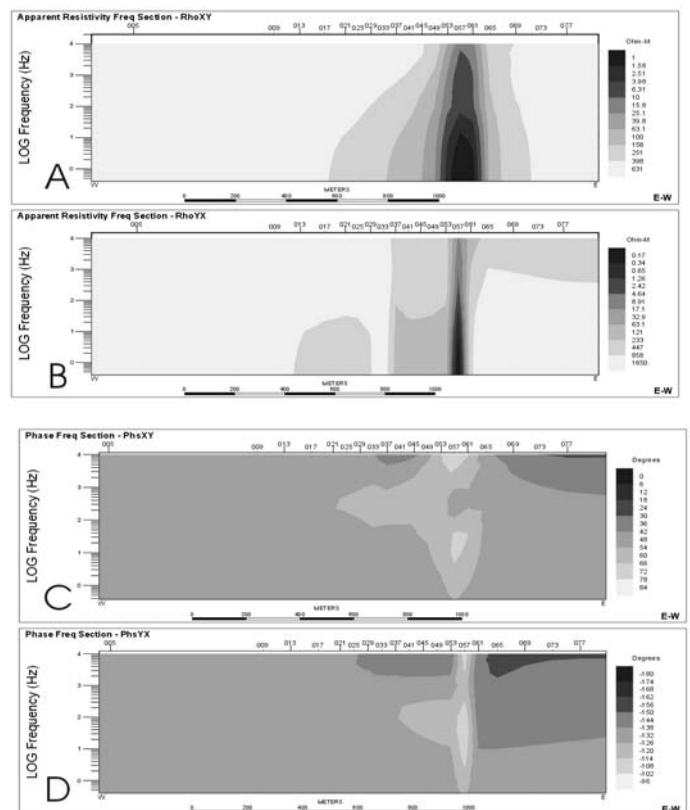


Figura 2 – Respuesta del modelo para el perfil central. A y B: resistividad aparentes XY e YX respectivamente, C y D: fases XY y YX. (Response of the model across central profile. A and B apparent resistivity XY and YX respectively, C and D: phases XY and YX respectively)

5. EFECTO DE LA FINITUD DEL STRIKE

Con el fin de comparar el comportamiento de las respuestas del modelo 3D con las correspondientes a un modelo 2D, se han calculado las curvas de resistividad aparente y fases correspondientes a 2 sondeos del perfil central: el sondeo 57 (ver figura 1) y el sondeo 53 situado 50 m al Este para cuerpos 3D con distinta longitud del strike (ver tabla 1). En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos. Para el sondeo 57 hay un contraste entre el comportamiento del modo XY e YX tanto para las resistividades como para las fases: el modo XY es sensible a la variación de la longitud del strike mientras que el modo YX no lo es. Para el sondeo 53 los dos modos son sensibles. Para altas frecuencias (mayores de 100 Hz) el comportamiento 2D y 3D es similar con unas fases que alcanzan los 78° a 10.000 Hz. Para bajas frecuencias, la respuesta 3D para el modo YX se comporta como un modelo 2D (alcanzando también los 78°) mientras que el modo XY se comporta de manera distinta en 3D que en 2D.

6. DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos en este estudio, pueden extraerse unas recomendaciones para el diseño de campañas de AMT para la detección y delineación de cuerpos mineralizados conductores y para la interpretación de los datos:

El efecto del cuerpo mineralizado en las componentes magnéticas horizontales es muy pequeño; la presencia del cuerpo mineralizado afecta fundamentalmente a los campos eléctricos. Este hecho sugiere que la adquisición de datos puede optimizarse si los sensores magnéticos se mantiene en una posición fija y se realizan medidas con multielectrodos.

Para la interpretación de los datos con algoritmos bidimensionales, debe tenerse siempre en mente que el campo eléctrico paralelo a la dirección del strike (XY en nuestro ejemplo) es más sensible a los efectos 3D que el modo opuesto. Las inversiones 2D pueden incluir todos los datos del modo YX pero sólo las altas frecuencias para el modo XY.

El presente estudio se mantiene en curso con el fin de investigar los efectos de las zonas alteradas del entorno de las mineralizaciones

que pueden distorsionar y enmascarar la respuesta del cuerpo mineralizado de interés.

7. REFERENCIAS

- García, X., Ledo, J. & Queralt, P., 1999. 2-D Inversion of 3-D magnetotelluric data: the Kayabe dataset, *Earth, Planets and Space*, 51, 1135-1143.
- Katsube, T. J., Scromeda, N., Best, M.E. and Goodfellow, W. D. 1997. Electrical characteristics of mineralized and non mineralized rocks at the Brunswick No. 12 deposit, Bathurst mining camp, New Brunswick. *Current Research*, 1997-E. P. 97-107.
- Ledo, J.J; Queralt, P., Martí, A. and A. G. Jones, 2001. Two Dimensional Interpretation of 3-D Magnetotelluric Data: Limitations and Resolution. *Geophysical Journal International*, revised version accepted
- Luff, W. M.; Goodfellow, W. D. and Juras, S. J. 1992. Evidence for a Feeder Pipe and Associated Alteration at the Brunswick No. 12 Massive-Sulfide Deposit. *Exploration and Mining Geology* 1, (2), 165-185.
- Mackie, R.L., Smith, T.J. & Madden, T.R., 1994. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite differences equations: the magnetotelluric example, *Radio Sci.*, 29, 923-935.
- Queralt, P, Jones, A. G. & Ledo, J. 2001. Deep electromagnetic imaging of the Bathurst No. 12 deposit: 3-D forward modelling, 2-D inversion and sensitivity tests. *Geol. Surv. Canada Current Research*, in press
- Rodi, W. & Mackie, R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 174-187.
- Smith, J. T. And Booker, J. R., 1991. Rapid inversion of two and three-dimensional magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.*, 96, 3905-3922.
- Siripunvaraporn, W. and G. Egbert, 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65, 791-803, 2000
- Thomas, M.D., Walker, J.A., Keating, P., Shives, R., Kiss, F., and Goodfellow, W.D. 2000. *Geophysical Atlas of Massive Sulphide Signatures*, Bathurst Mining Camp, New Brunswick - CD-ROM Version. Geological Survey of Canada Open File D3887, New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Minerals and Energy Division, Open File 2000-9, 105 p.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J. A. and Rijo, L. 1987. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling. *Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc.*, 88, 277-296.
- Wannamaker, P.E., Hohmann, G.W. & Ward, S.H., 1984. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths. *Geophysics*, 49, 1517-1533.

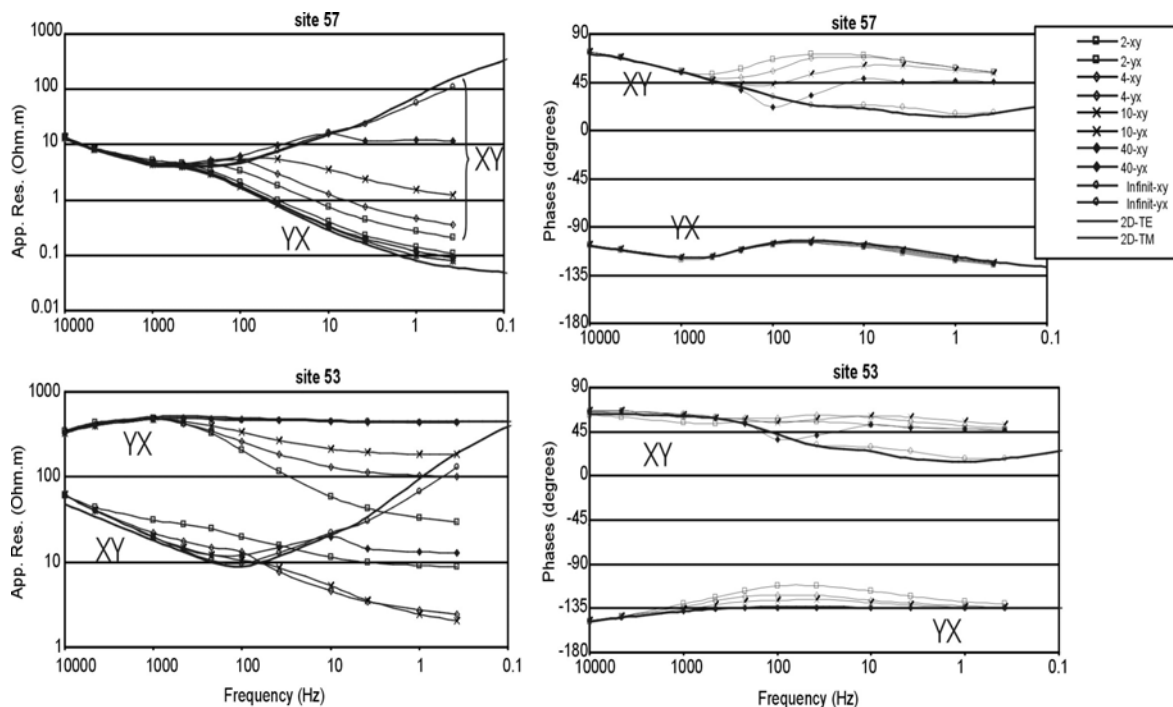


Figura 3 – Comparación de las respuestas de diferentes modelos 3D en dos sondeos. El sondeo 57 justo encima del cuerpo y el sondeo 53, separado 50 m. En la leyenda se indica la relación X:Y de las dimensiones horizontales del cuerpo. La etiqueta “2D” indica la respuesta calculada con el algoritmo de modelización bidimensional. (Comparison of the responses for different 3-D models at two sites. Site 57 just over the body and site 53, 50m away. The legend indicates the horizontal length ratio X:Y of the body. The label “2D” indicates the responses calculated by the 2D forward code)

