

Campaña de AMT en EL Maestrazgo
Proyecto HIPROMA

Informe preparado para el IGME por

A. Marcuello, J.Ledo, C. Arango y P. Queralt

Dept. Geodinàmica i Geofísica

Universitat de Barcelona

Febrero de 2006

Este trabajo se ha realizado mediante el contrato no. FBG303486 entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Fundación Bosch Gimpera de la Universidad de Barcelona (FBG)

Indice

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	1
3.	METODOLOGÍA	3
3.1	El Método Magnetotelúrico.....	3
3.2	Instrumentación. Toma de Datos.....	6
3.3	Tratamiento y Análisis de Datos.....	8
4.	TRABAJO REALIZADO	9
4.1	Cronología.....	12
4.2	Incidencias.....	14
4.3	Procesado y análisis de los datos obtenidos.....	15
5.	INTERPRETACIÓN.....	23
5.1	Modelo para el perfil 1.....	23
5.2	Modelo para el perfil 2.....	26
5.3	Modelo unidimensionales para las estaciones M17 y M08.....	29
6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	31
	Referencias.....	34
	APÉNDICE 1: Especificaciones técnicas de los equipos	35
	Sistemas de registro.....	35
	Sensores magnéticos.....	35
	APÉNDICE 2: Formato de los archivos de las series temporales (archivos	
	*.ATS).....	36

Índice de figuras

Figura 1: Situación de la zona de trabajo sobre el mapa geológico de la región extraído de Geología de España (J.A. Vera – editor, 2004).....	2
Figura 2: Partes del instrumento de AMT.....	7
Figura 3: Esquema de la colocación de los sensores para los registros magnetotelúricos.....	8
Figura 4 Situación de las estaciones de registro y de los pozos Bobalar-1 (b1), Bobalar-2 (b2), Salsadella (sa) y Maestrazgo-1 (m1). El mapa se ha construido a partir de las hojas 544, 545, 546, 569, 570 y 571 de la serie Magna del IGME.	11
Figura 5: Curvas de resistividad aparente de la M08 a la M01.....	16
Figura 6: Curvas de fase de la M08 a la M01.....	17
Figura 7: Curvas de resistividad aparente de la M09 a la M17.....	18
Figura 8: Curvas de fase de la M09 a la M17.....	19
Figura 9: Análisis de la dimensionalidad para cuatro intervalos de frecuencia.	21
Figura 10. Direcciones de los perfiles interpretados 1 y 2.....	22
Figura 11: Modelo geoelectrico para el perfil 1.....	23
Figura 12: Comparación entre las curvas de resistividad aparente medidas (puntos) y las del modelo (línea continua).....	24
Figura 13: Comparación entre las curvas de fase medidas (puntos) y las del modelo del perfil 1 (línea continua).....	25
Figura 14: modelo geoelectrico para el perfil 2.....	26
Figura 15: Comparación entre las curvas de resistividad aparente medidas (puntos) y las del modelo del perfil 2 (línea continua).	27
Figura 16: Comparación entre las curvas de fase medidas (puntos) y las del modelo del perfil 2 (línea continua).	28
Figura 17: Ajuste para la estación M17. La profundidad está en escala logarítmica.....	29
Figura 18: Ajuste para la estación M08. La profundidad está en escala logarítmica.....	30
Figura 19: Modelo geoelectrico para el perfil 1 (panel superior) y el perfil 2 (panel inferior).	33
Figura 20: Funciones de respuesta típica de los sensores magnéticos.	35

Índice de tablas

Tabla 1: Coordenadas UTM de las estaciones referidas al huso 31 (Datum Hayford 1909).....	10
Tabla 2: Características de las bandas utilizadas por el instrumento GMS06..	12
Tabla 3: Bandas registradas en cada estación (sombreadas en gris) y equipo utilizado	14
Tabla 4: Número de serie de las bobinas y longitud de los dipolos eléctricos de cada estación	15
Tabla 5: Cabecera del archivo ATS.....	36

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe recoge los resultados de la campaña de medidas geofísicas efectuadas con el método audiomagnetoteléurico (AMT) en las comarcas de Alt i Baix Maestrat i Ports de la provincia de Castellón. Dicha campaña se ha realizado durante el mes de septiembre de 2005 dentro del marco del proyecto HIPROMA del IGME.

Este trabajo tiene como objetivo la determinación de la potencia de las calizas mesozoicas y la topografía del basamento triásico. Esta información es relevante para la realización del modelo hidrogeológico de la zona.

Los métodos geoelectrónicos son una herramienta adecuada para la caracterización de estructuras de interés hidrogeológico. En general las formaciones acuíferas presentan un comportamiento eléctrico resistente, mientras que las acuitardas aparecen eléctricamente como conductoras. El método audiomagnetoteléurico es adecuado para el caso que nos ocupa, donde el resistente puede alcanzar algunos kilómetros de potencia.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada en la Cuenca del Maestrazgo, que forma parte del denominado Sistema Ibérico, que está asociado a las cordilleras Ibérica y Costera Catalana.

El Sistema Ibérico tiene una arquitectura compleja debido a que ha estado sometido a diferentes episodios extensivos y compresivos. Su origen está asociado a las etapas extensivas que se produjeron entre el Pérmico superior y el Cretácico inferior y dieron lugar a la apertura y propagación hacia el oeste del Thetys. Como consecuencia esta zona estuvo cubierta por el mar durante el Mesozoico y lo que dio lugar a una importante acumulación de sedimentos

marinos. A finales del Cretácico se produjo una etapa compresiva asociada a la orogenia alpina, con la inversión de las fallas extensivas mesozoicas, lo que provocó la elevación de estos sedimentos formando las cadenas Ibérica y Costera Catalana. Durante el Neógeno un nuevo episodio extensivo asociado a la formación del surco de Valencia provocó la aparición de *grabens* de dirección NE-SO en el Sistema Ibérico.

La Cuenca del Maestrazgo está situada en la denominada Zona de Enlace entre las cordilleras Ibérica y Costera Catalana (figura 1). En la parte norte aparece una zona deformada y fracturada, que corresponde al cinturón de cabalgamientos de Portalrubio-Valdellós. El nivel de despegue de estos cabalgamientos se localiza en los materiales triásicos, si bien hacia el sur este nivel se sitúa dentro del Paleozoico. Los materiales de esta cuenca son predominantemente del Jurásico superior y Cretácico (calizas) aunque aparecen sedimentos terciarios en los valles.

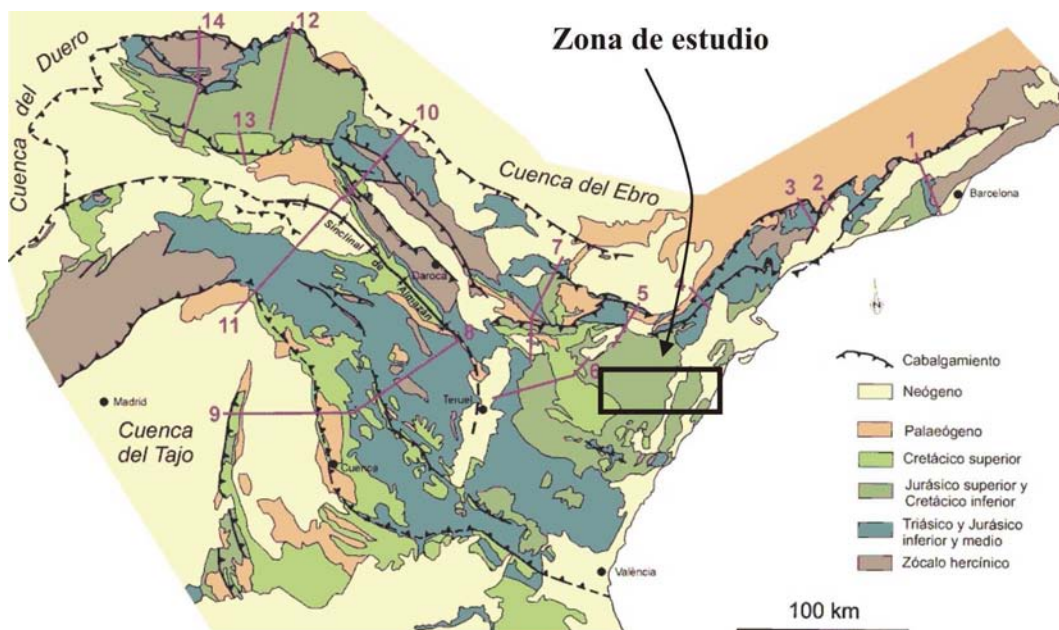


Figura 1: Situación de la zona de trabajo sobre el mapa geológico de la región extraído de Geología de España (J.A. Vera – editor, 2004).

Los materiales de interés desde el punto de vista hidrogeológico son las calizas y las dolomías cretácicas y jurásicas que constituyen el acuífero libre de esta zona, que descansan sobre materiales triásicos que corresponden al acuitardo. Los materiales triásicos son arcillas, margas y halitas del Muschelkalk y Keuper. La información de pozos y cortes geológicos realizados en las proximidades indica que la potencia de los materiales cretácicos y jurásicos es de algunos kilómetros.

3. METODOLOGÍA

Dadas las características geoelectricas de las formaciones involucradas con unos materiales mesozoicos (calizas y dolomías) eléctricamente resistentes de una potencia de algunos kilómetros que yacen sobre unos materiales triásicos (margas, arcillas y sales) más conductores eléctricamente, se consideró que la AMT era el método más adecuado, y que la tipología de las curvas de resistividad aparente mostrarían un mínimo asociado a los materiales triásicos. Una cuestión aparte merece el comportamiento de las sales triásicas que puede ser complicado, ya que su resistividad es alta si está seca, pero cuando se disuelven en agua, la disolución resultante será muy conductora.

A continuación se describen algunos de los aspectos más relevantes del método (audio)magnetotelúrico.

3.1 El Método Magnetotelúrico

Es una técnica de exploración geofísica de fuente natural basada en el fenómeno de la inducción electromagnética. La fuente externa corresponde a las perturbaciones electromagnéticas producidas en las tormentas y a las corrientes ionosféricas que inducen en el subsuelo unas densidades de carga y corrientes eléctricas cuya distribución depende de la resistividad eléctrica del suelo. La determinación de esta última es el objetivo del método magnetotelúrico.

Cuando las ondas electromagnéticas se propagan en un medio conductor (el suelo) sufren una atenuación que depende de la frecuencia de la señal y de la resistividad del medio. Esta atenuación se evalúa mediante la penetración (o *skin depth*), que corresponde a la profundidad a la que la amplitud se ha reducido a un 37%. Para un medio homogéneo de resistividad ρ la penetración tiene el valor aproximado de $0,5(\rho/f)^{1/2}$ km cuando ρ y f se dan en unidades del SI. Esto indica que la señal de alta frecuencia (periodos bajos) se amortigua más que la de baja frecuencia (periodos altos), y en consecuencia la frecuencia de la señal va a determinar la profundidad de estudio. También indica que en medios conductores la penetración es menor que en medios resistentes, por lo que este método es adecuado para "atravesar" medios resistentes.

A partir de la correlación de los campos horizontales eléctrico (\mathbf{E}_h) y magnético (\mathbf{H}_h) registrados simultáneamente en el mismo punto se puede definir la impedancia \mathbf{Z} según la expresión:

$$\vec{E}_h(f) = Z(f)\vec{H}_h(f), \text{ o en componentes: } \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad [1]$$

donde f es la frecuencia.

La magnitud \mathbf{Z} es un tensor complejo, y depende exclusivamente de la distribución de la resistividad eléctrica del suelo y de la frecuencia (o de su inversa, el periodo). A partir de \mathbf{Z} se pueden definir la resistividad aparente y la fase para cada uno de los elementos del tensor de impedancia en función de la frecuencia según las siguientes expresiones:

$$\rho_{a,ij}(f) = \frac{1}{2\pi f \mu} |Z_{ij}(f)|^2 \quad y \quad \varphi_{ij}(f) = \text{arctg} \left(\frac{\text{Im} Z_{ij}(f)}{\text{Re} Z_{ij}(f)} \right) \quad [2]$$

donde $\mu \cong \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}/(\text{Am}^{-1})$.

A veces se toma para la resistividad aparente y fase unos valores que engloban toda la información del tensor, como los que corresponden a considerar el determinante del tensor de impedancia, $\det(Z)$, y no sus elementos aislados:

$$\rho_a^{DET}(f) = \frac{1}{\mu_0 2\pi f} |\det(Z)| \quad y \quad \varphi^{DET}(f) = \frac{1}{2} \arg(\det(Z)) \quad [3]$$

Esta expresión puede ayudar en la interpretación cuando la distribución de las estaciones es muy irregular (no están dispuestas sobre un perfil o malla), la dirección geoelectrica no está bien definida o en situaciones 3D.

Para estructuras geoelectricas bidimensionales se puede simplificar la expresión del tensor de impedancia a sólo dos elementos si las direcciones de medida coinciden con la dirección estructural y su perpendicular. Cuando la dirección estructural corresponde a la dirección x, entonces la expresión [1] puede escribirse como

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \text{ o de forma compacta } \vec{E}_h(f) = Z_{2D}(f) \vec{H}_h(f) \quad [4].$$

El modo TE corresponde a la situación en la que el campo eléctrico se ha medido en la dirección estructural y el TM, al caso en que sea el campo magnético el que se mida en esa dirección. En la interpretación bidimensional se invierten las curvas de resistividad aparente y fase de estos dos modos.

El paso de la expresión [1] a la [4] corresponde matemáticamente a un producto matricial $Z_{2D} = R^T Z R$, donde R es la matriz de rotación, y permite pasar de una dirección de medida cualquiera a la dirección estructural.

3.2 Instrumentación. Toma de Datos

El instrumento empleado consta de la estación de registro, los sensores eléctricos y magnéticos y un ordenador personal que controla la adquisición (figura 2), todo el sistema está alimentado por baterías de 12V. Los sensores magnéticos son bobinas de inducción de forma cilíndrica con una longitud de 1,25 m y un diámetro de 7,5 cm. Como sensores eléctricos se emplean electrodos impolarizables dispuestos normalmente en forma de cruz para registrar las dos componentes horizontales del campo eléctrico en la superficie; la longitud del dipolo eléctrico es del orden de 50 m. Todos los sensores se conectan a la estación de registro, tal como se muestra en la figura 3.

Las orientaciones de los sensores son mutuamente perpendiculares, y en este trabajo se han tomado en las direcciones NS y EO.

El registro de estos cuatro canales se realiza simultáneamente, de manera que los datos se digitalizan a una frecuencia de muestreo seleccionada por el operador y se almacenan en la estación de registro, que después se transfieren a un ordenador portátil.



PC de control



Unidad de registro y baterías



Detalle de un electrodo impolarizable



Bobina

Figura 2: Partes del instrumento de AMT

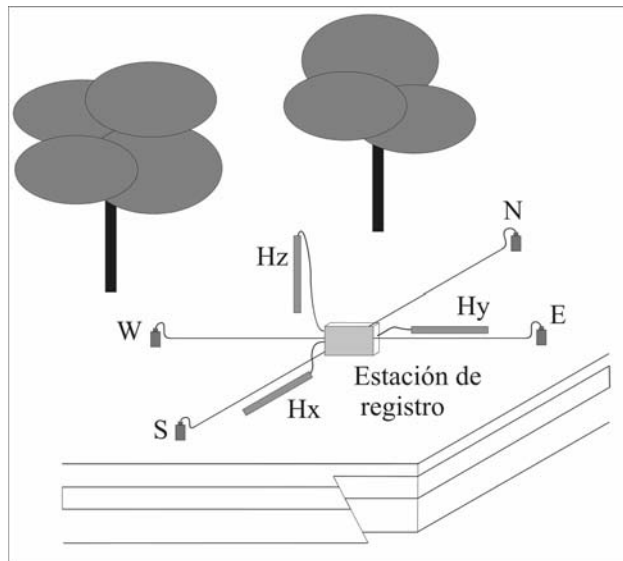


Figura 3: Esquema de la colocación de los sensores para los registros magnetotelúricos

3.3 Tratamiento y Análisis de Datos

El tratamiento de los datos permite obtener la impedancia (y las curvas de resistividad aparente y fase) a partir de los registros temporales de los campos. Para ello es preciso preparar estos registros para pasarlos al dominio espectral (o de frecuencias) mediante la transformada de Fourier. Posteriormente a partir de las relaciones lineales [1] se puede determinar una estimación del tensor de impedancia.

La calidad de esta estimación se basa en dos criterios:

- a) El análisis de la coherencia para cada frecuencia, que permite comprobar que existe una correlación entre los registros eléctrico y magnético.
- b) La dispersión de los datos, que permite estimar la barra de error cuando se considera una frecuencia (ej. Bendat y Piersol, 1971), y también permite detectar la presencia de datos anómalos (*outliers*) en las curvas, ya que la distribución debe ser regular.

Una vez obtenidas las curvas de resistividad aparente y fase para todas las estaciones se pasa a analizar tres aspectos:

- a) la *dimensionalidad* de la estructura geoelectrica, ya que el carácter tensorial de la impedancia permite identificar si los datos se ajustan a una estructura uni-, bi- o tridimensional.
- b) Cuando las estructuras geoelectricas siguen un patrón bidimensional es posible determinar la dirección de la estructura o *direccionabilidad*.
- c) Finalmente se efectúa la corrección del *static shift*, para eliminar los efectos de heterogeneidades próximas a los electrodos, que provocan un desplazamiento vertical de las curvas de resistividad aparente. Esta corrección es necesaria para evitar interpretaciones erróneas.

Después de todo este proceso se obtienen las curvas de resistividad aparente y fase preparadas para iniciar la interpretación, que se realiza mediante del ajuste entre las respuestas del modelo y los datos de campo.

4. TRABAJO REALIZADO

La campaña de adquisición de datos se realizó durante el mes de septiembre de 2005.

Se diseñó la campaña en la zona de estudio a lo largo de dos perfiles: el primero que conectaban los pozos Maestrazgo-1 y Salsadella, y el segundo el pozo de Salsadella con los de Bobalar-1 y -2; y se completó con estación más en la zona del puerto del Querol.

La campaña de adquisición se desarrolló en dos etapas. En la primera se registraron nueve estaciones: las comprendidas entre la M01 y la M08 corresponden al perfil 1 y la M09, al perfil 2. En la segunda etapa se adquirieron siete estaciones: las seis primeras, entre la M11 y la M16, son del perfil 2, y la M17 quedó aislada respecto de las anteriores. En total se han adquirido 16 estaciones magnetotelúricas en ubicaciones distintas.

Los registros se realizaron con los dos instrumentos del modelo GSM06 de la empresa alemana *Metronix* que pertenecen a la Universidad de Barcelona, cuyas características principales están descritas en el anexo 1. Sus números de serie son 60 y 76, que se identifican en los archivos como #001 y #076 respectivamente, por ser esta la numeración que aparece en la cabecera de los registros.

Las coordenadas de las estaciones se obtuvieron con un GPS de la marca *Magellan* y modelo *Meridian Platinum*, con una precisión entre 1 y 3m, que es suficiente para localizar la estación magnetoteléfica ya que la separación entre los electrodos ha sido del orden de 50 m. En la tabla 1 se presentan estos valores, y también unos valores aproximados en las coordenadas Lambert para situarlos en los mapas geológicos. En la figura 4 se muestra la localización de las estaciones en la zona de estudio.

Tabla 1: Coordenadas UTM de las estaciones referidas al huso 31 (Datum Hayford 1909)

estación	UTM-x	UTM-y	z	Lambert-x	Lambert-y
M01	279014	4483959	70	945450	660650
M02	274383	4481201	170	941150	657550
M03	272075	4480182	180	938800	656450
M04	269154	4477581	360	936400	653800
M05	267605	4476160	380	934700	652050
M06	264950	4473933	340	932400	649800
M07	261388	4471940	400	928800	647550
M08	258653	4468794	320	926100	644450
M09	249952	4474012	510	917350	648500
M11	233002	4485560	990	899600	658850
M12	230340	4487174	1290	896850	660450
M13	237473	4482213	1090	904250	655550
M14	243146	4477794	800	910000	650600
M15	240101	4479379	1020	907000	653000
M16	225657	4493832	1170	891550	666500
M17	250876	4490076	620	917050	664500

Para optimizar la capacidad de registro de los instrumentos, el rango de frecuencias de interés (entre 0,01 y 1000 Hz) está dividido en diferentes

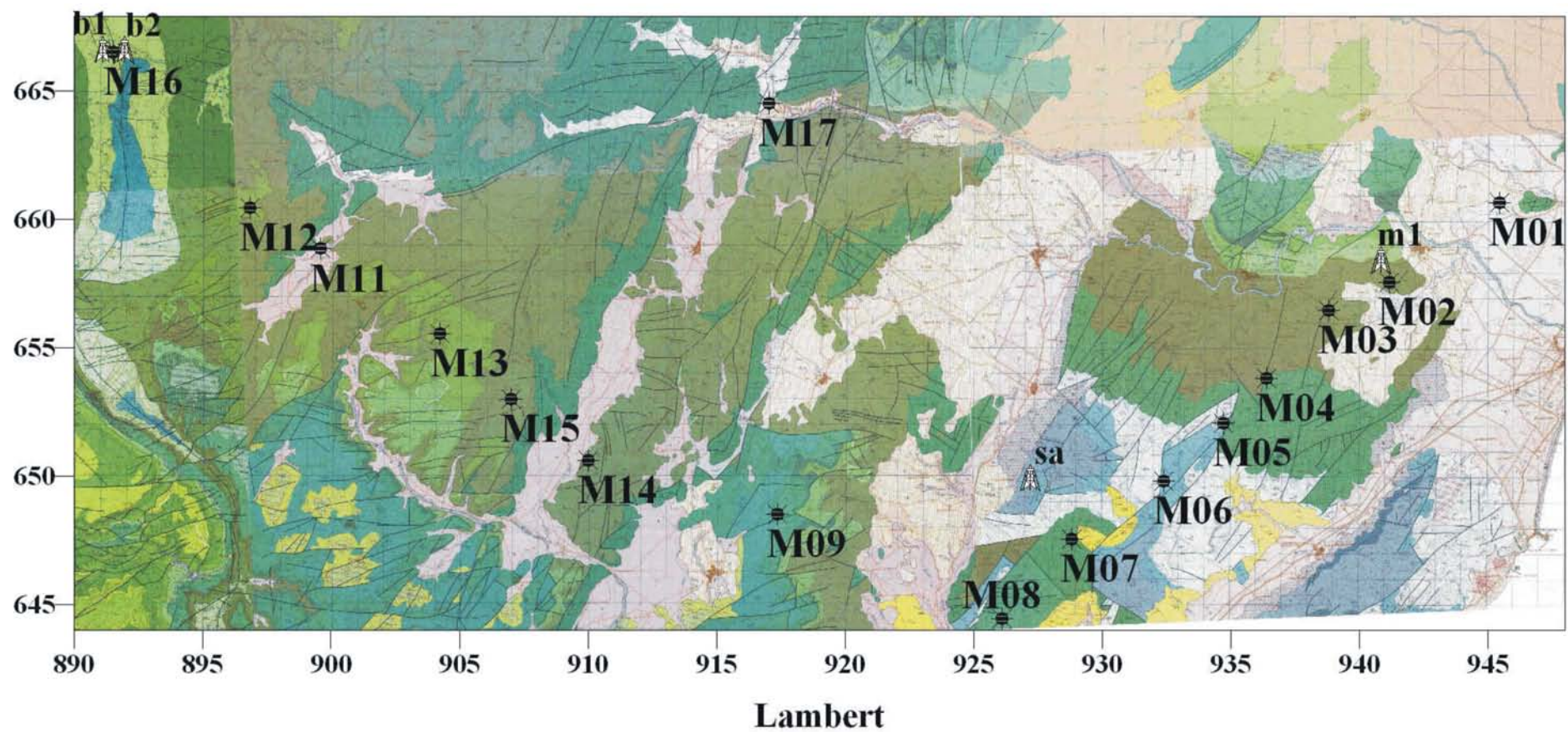


Figura 4 Situación de las estaciones de registro y de los pozos Bobalar-1 (b1), Bobalar-2 (b2), Salsadella (sa) y Maestrazgo-1 (m1). El mapa se ha construido a partir de las hojas 544, 545, 546, 569, 570 y 571 de la serie Magna del IGME.

intervalos o bandas, cada una con una determinada frecuencia de muestreo, que vienen indicadas en la tabla 2.

Tabla 2: Características de las bandas utilizadas por el instrumento GMS06

Banda	Rango de frecuencias	Frecuencia de muestreo
HF	500-8000Hz	40960 Hz
LF1	10-1000 Hz	4096 Hz
Free	2-240 Hz	512 Hz
LF2	0,5-30 Hz	64 Hz
LF3	0,015-0,9 Hz	2 Hz (a partir de la LF2)

4.1 Cronología

El trabajo de campo realizado se distribuyó en dos etapas, la primera se realizó entre el 7 y 11 de septiembre, y la segunda entre el 14 y el 17 de septiembre.

En la primera etapa el grupo estuvo formado por Juanjo Ledo (responsable), Oriol Rosell, Antonio Pedrea, Pedro Ibarra y Manuel Ribero (los dos últimos del IGME), y discurrió de la manera siguiente:

7 de septiembre

Se comprobaron los equipos tras el viaje. Para disponer unos primeros datos en la zona se buscó una localización para la estación M01, donde se instaló el instrumento #001, se dejó registrando durante la noche. Se midieron las bandas HF, LF1, LF2, LF3 y Free, que serían las que se medirían habitualmente (tabla 3). Se inició la búsqueda para las siguientes estaciones.

8 de septiembre

Se recogió la estación M01 y, a continuación, se instalaron y registraron las estaciones M02 (instrumento #001) y M03 (instrumento #076), por lo que se emplearon los dos instrumentos. Se buscaron ubicaciones para las siguientes estaciones. El equipo #001 se desinstaló en primer lugar para utilizarlo en la estación M04, que registraría durante la noche. Posteriormente se desinstaló la M03.

9 de septiembre

Se recogió la estación M04, y se instalaron y registraron las estaciones M05 (equipo #001) y M06 (equipo #076). Se continuó la búsqueda de lugares para las siguientes estaciones. Igual que el día anterior, se desinstaló la estación M05, para utilizar este equipo en la M07, que mediría a lo largo de la noche. Más tarde se desmontó la estación M06.

10 de septiembre

Se desmontó la estación M07, y se instalaron y registraron las estaciones M08 (instrumento #001) y M09 (instrumento #076). Ese mismo día se desmontaron ambas estaciones

11 de septiembre

Se empaquetaron los instrumentos para el viaje de vuelta.

En la segunda etapa participaron Alex Marcuello (responsable), Claudia Arango y Miquel Coll, y la colaboración de Juan L. Plata (IGME) durante su visita, y se desarrolló de la siguiente forma:

14 de septiembre

Se comprobaron los equipos a la llegada. Se buscó una localización para la estación M11, donde se instaló el instrumento #001, mientras registraba se busco la localización para la estación M12 (equipo #076), que se montó para que midiese durante la noche. Más tarde se recogió la M11.

15 de septiembre

Se buscó una localización para la estación M13, se instaló el instrumento #001, registró y se recogió. A continuación se recogió la M12, y se buscó la localización para la estación M14, que se montó (equipo #076) para que midiese durante la noche.

16 de septiembre

Se completó el registro de la M14, y se recogió la estación. Se encontró la ubicación para la M15 (instrumento #076), que se instaló, midió y recogió el

mismo día. Más tarde se buscó la localización para la M16, que se dejaría durante la noche (equipo #001).

17 de septiembre

Se complementó la medida de la estación M16, y se desinstaló. Se instaló la estación M17 (instrumento #076), que registró y se desmontó. Se empaquetaron los equipos para la vuelta.

En la tablas 3 y 4 se recogen a modo de resumen las características principales de los registros efectuados en cada estación.

Tabla 3: Bandas registradas en cada estación (sombreadas en gris) y equipo utilizado

estación	equipo	HF	LF1	Free	LF2	LF3
M01	#001					
M02	#001					
M03	#076					
M04	#001					
M05	#001					
M06	#076					
M07	#001					
M08	#001					
M09	#076					
M11	#001					
M12	#076					
M13	#001					
M14	#076					
M15	#076					
M16	#001					
M17	#076					

4.2 Incidencias

Debido a la orografía de la zona, el tiempo de accesos a las estaciones ha sido largo, por lo que se ha reducido el rendimiento del número de estaciones instaladas por día. Las incidencias más destacables se han producido en las estaciones que estuvieron registrando durante la noche, y que correspondían a al corte del cable de los electrodos o desenterramiento de los sensores, debido a la presencia de animales. Estas incidencias se produjeron en las estaciones

M04 y M14. En estos casos los daños se pudieron reparar allí mismo. En la estación M08 el registro del campo eléctrico en la dirección EO quedó inservible por un problema de la conexión de un electrodo, por lo que la medida de esta estación es parcial.

Una incidencia menor, pero importante para el procesado, es que en la estación M15 se invirtió la polaridad en la bobina H_y (no. 163).

Tabla 4: Número de serie de las bobinas y longitud de los dipolos eléctricos de cada estación

estación	Hx no.serie	H_y no.serie	long. Ex (m)	long. Ey (m)
M01	89	96	50	50
M02	89	96	50	50
M03	135	163	50	50
M04	89	96	42	40
M05	89	96	32	50
M06	135	163	40	43
M07	89	96	50	50
M08	89	96	50	50
M09	135	163	50	50
M11	89	96	40	40
M12	135	163	25	25
M13	89	96	25.2	25
M14	135	163	26.3	25
M15	135	163	25	25
M16	135	163	24.5	25.2
M17	163	135	20	20.6

4.3 Procesado y análisis de los datos obtenidos

Como resultado final del proceso de las series temporales se obtienen los valores de la impedancia, y a partir de ella, los de la resistividad aparente y la fase para cada frecuencia aplicando las expresiones [2]. Las curvas de resistividad aparente y fase se muestran en la figuras 5, 6, 7 y 8.

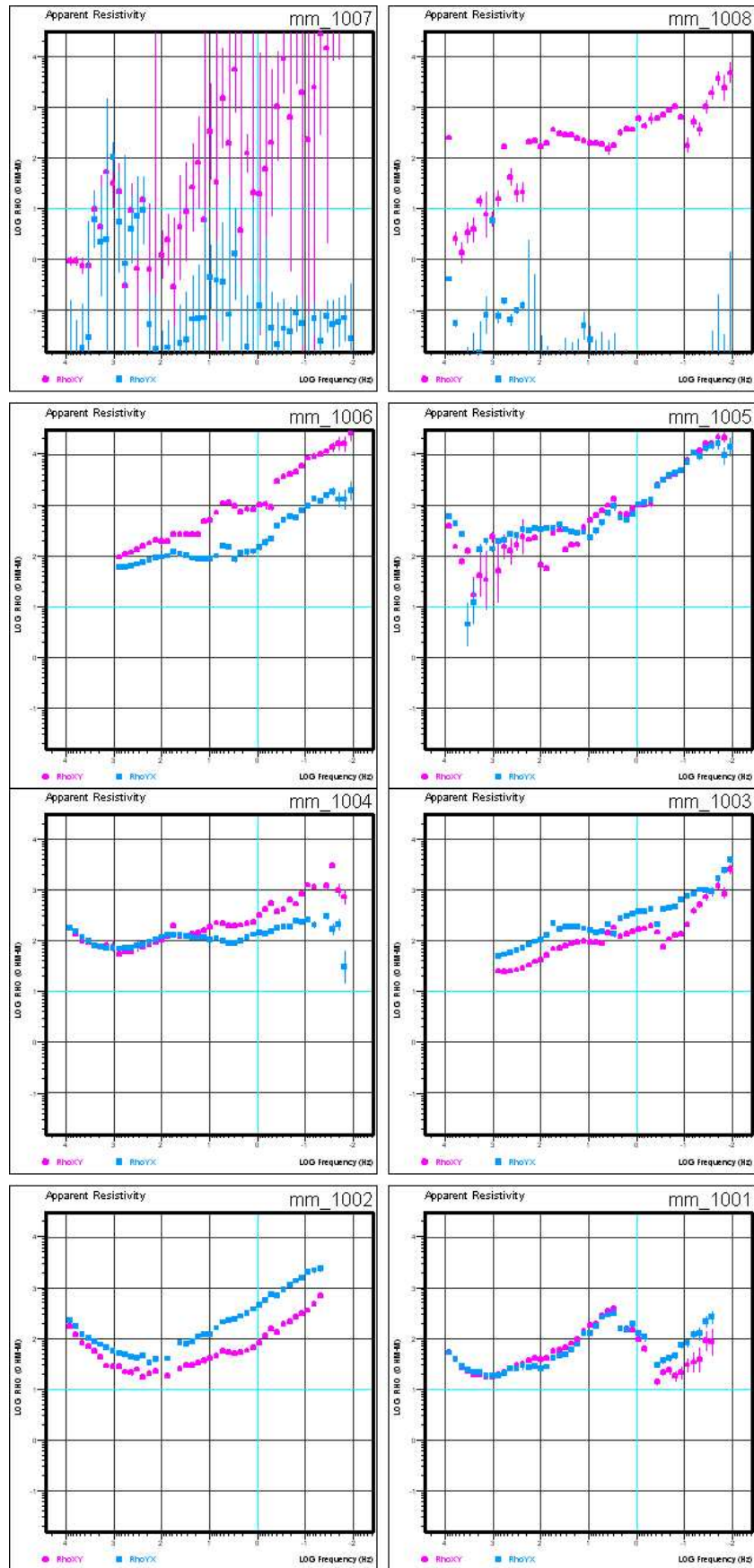


Figura 5: Curvas de resistividad aparente de la M08 a la M01.

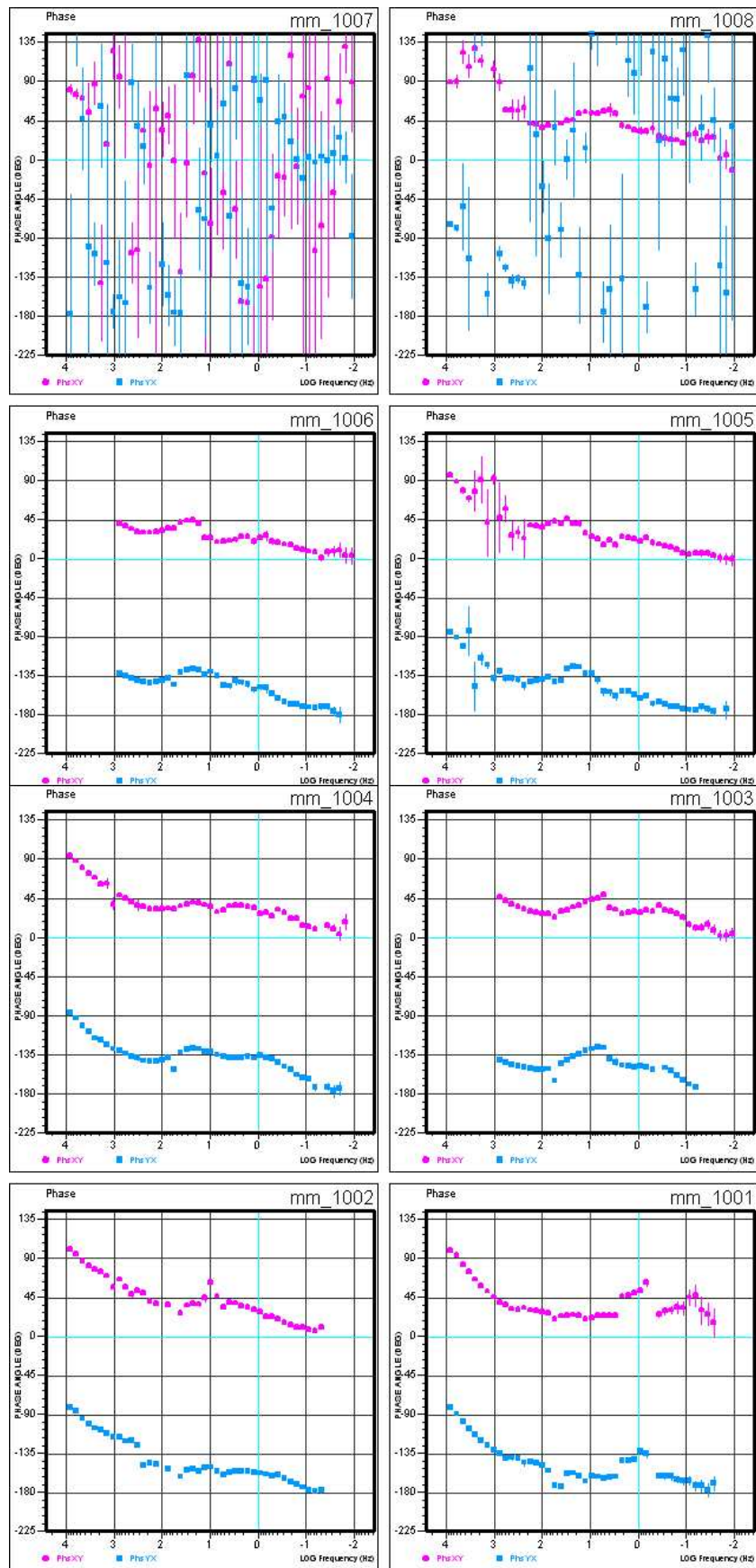


Figura 6: Curvas de fase de la M08 a la M01.

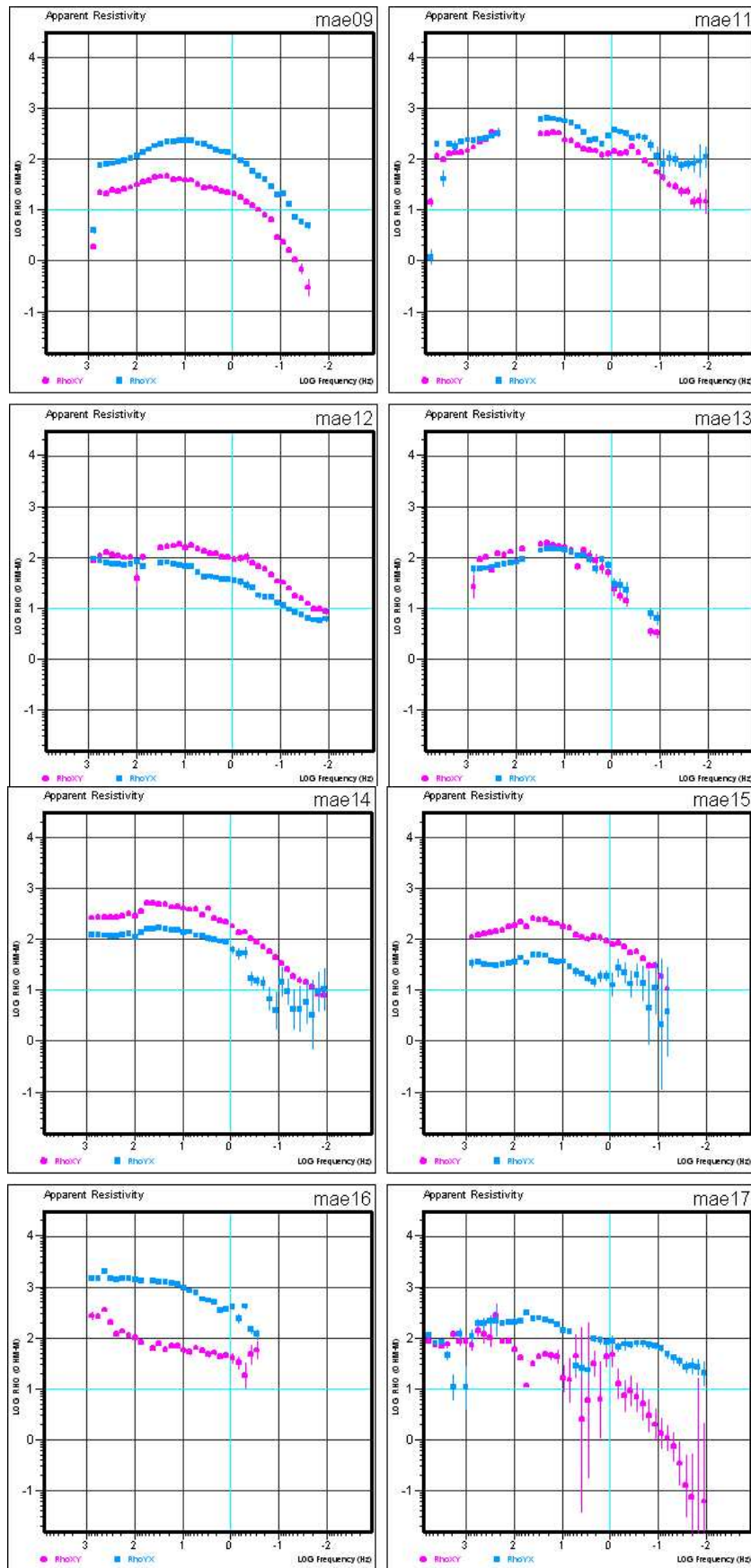


Figura 7: Curvas de resistividad aparente de la M09 a la M17.

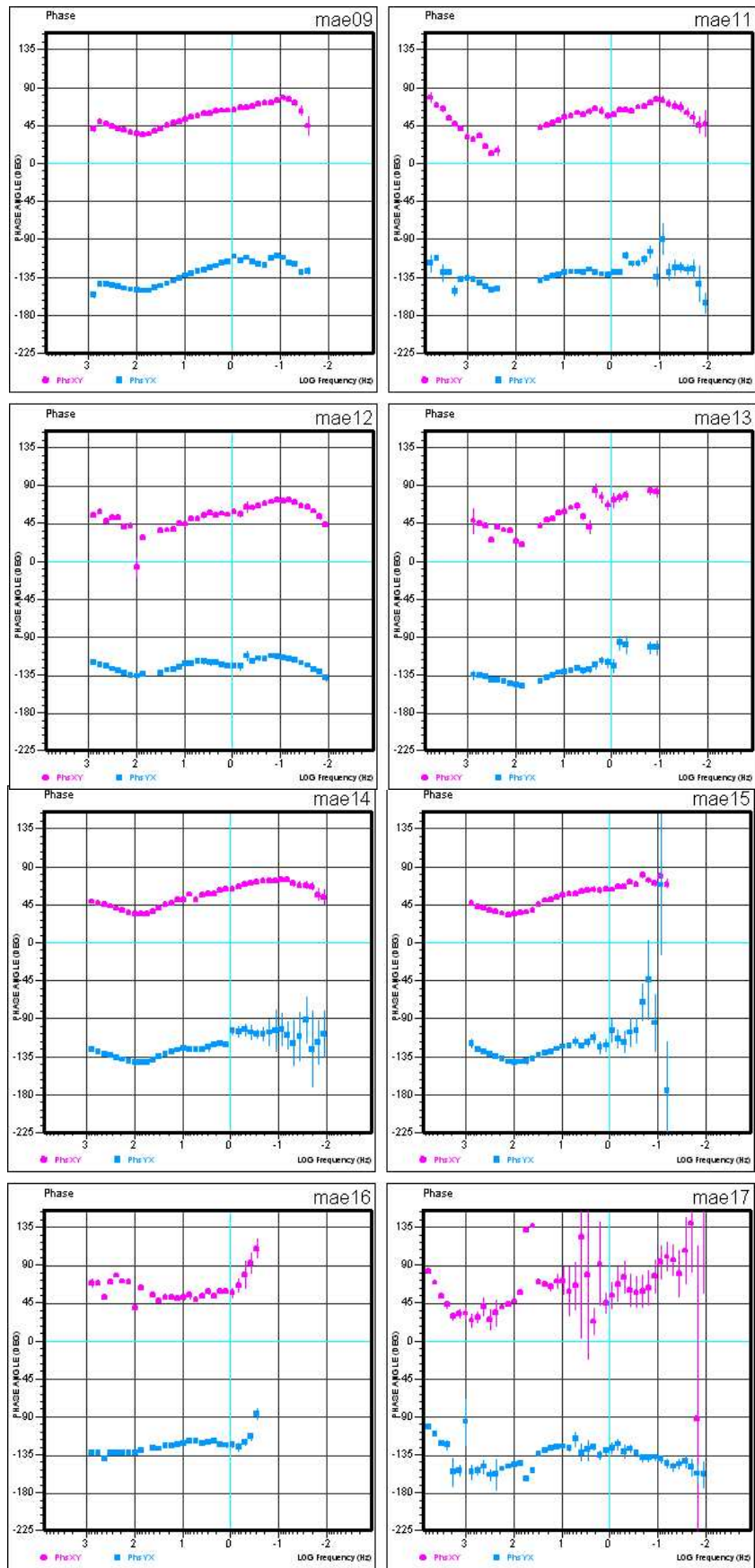


Figura 8: Curvas de fase de la M09 a la M17.

En estas figuras el número de la estación se identifica por los dos últimos caracteres de la parte superior derecha de cada panel. La dirección XY corresponde a la dirección eléctrica NS y la magnética EO, y la dirección YX, a la dirección eléctrica EO, y la magnética NS.

Los datos de la estación M07 muestran una muy mala calidad y no se ha determinado el motivo, porque aparentemente parecía un lugar alejado de fuentes de ruido electromagnético. Esta estación no ha sido considerada en el proceso de interpretación. Los de la estación M08 muestran que la dirección YX, tal como se ha comentado en las incidencias, no se puede aprovechar, y para ésta se efectuará una interpretación escalar y no tensorial.

Se observa que las curvas de resistividad aparente de las figura 5 y 7 tienen un comportamiento diferente a frecuencias bajas (parte derecha de la curva): en la figura 5 las curvas son crecientes, mientras que en la figura 7 las curvas son decrecientes. Este aspecto se comentará más adelante.

Para determinar si las estructuras geoelectricas son principalmente uni-, bi- o tridimensionales se ha realizado el análisis de la *dimensionalidad* mediante la implementación realizada por Martí *et al.* (2004) del método WAL desarrollado por Weaver *et al.* (2000) y los resultados se muestran en la figura 9. En ella se indican mediante cuatro paneles los cuatro intervalos de frecuencia entre 1000 y 0,1 Hz, que representan diferentes profundidades de estudio. Para el posicionamiento de las estaciones se han empleado coordenadas geográficas. El color rojo indica que la estructura que describe los datos de esa estación para ese intervalo de frecuencias es tridimensional; el verde, que la estructura puede ser uni- o bidimensional, y sin color cuando la estructura queda indeterminada. Este análisis requiere trabajar con el tensor de impedancias completo, por lo que no se ha incluido la estación M08.

Esta figura muestra la estructura geoelectrica dominante para toda la zona de estudio y las frecuencias (profundidades) medidas no es bidimensional, lo que apoya la hipótesis de que para ella la descripción completa de las estructuras deben ser realizado mediante modelos tridimensionales.

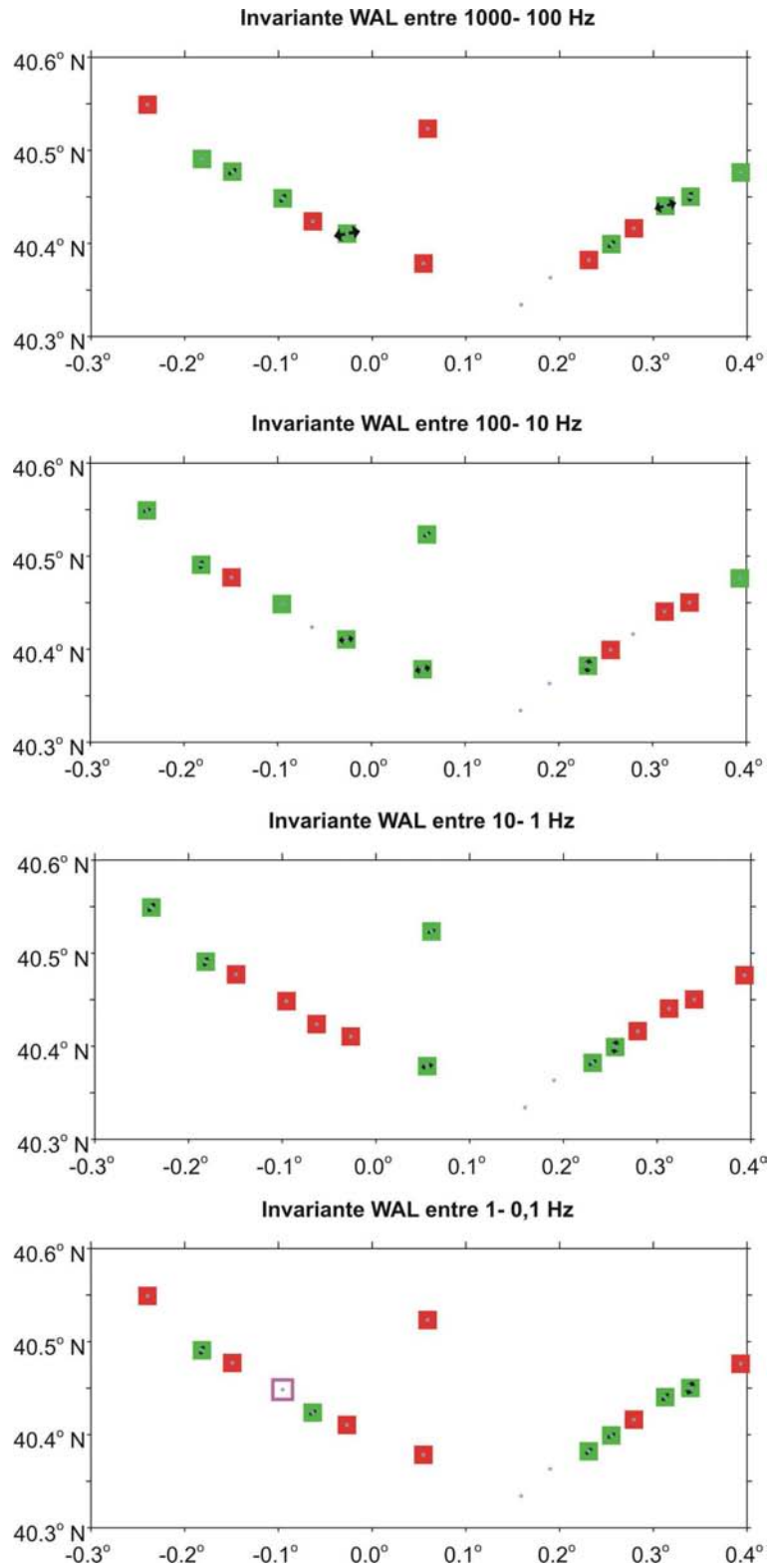


Figura 9: Análisis de la dimensionalidad para cuatro intervalos de frecuencia.

Dado que la densidad de datos no permite la elaboración de un modelo tridimensional, se han agrupado los datos según los dos perfiles ya que para ellos, las altas frecuencias parecen tener un comportamiento bidimensional.

El análisis de la *direccionalidad* según el esquema de la descomposición de Groom y Bailey (1989), permite definir para cada perfil una dirección estructural. Para las estaciones M01 hasta M06, que corresponde al denominado perfil 1, se ha obtenido una dirección estructural de 45°O , de manera que el perfil se ha proyectado en la dirección perpendicular (45°E). Para las estaciones M09 hasta M16, el llamado perfil 2, se ha calculado que la orientación estructural tiene una dirección de 15°E , por lo que tomado un perfil con la dirección 75°O . Estos perfiles se muestran en la figura 10.

El perfil 1 está alineado con las estaciones mientras que el perfil 2, no. Ello implica que el modelo que se obtenga para el perfil 2 se debe tomar como un modelo para una zona más amplia, como la delimitada entre las líneas más delgadas (figura 10). Para la interpretación, las estaciones se han proyectado sobre estos perfiles, el tensor de impedancia se ha rotado para que las direcciones de los campos coincidan con las determinadas para la estructura geoelectrónica, y a partir de él, se ha calculado los modos TE y TM.

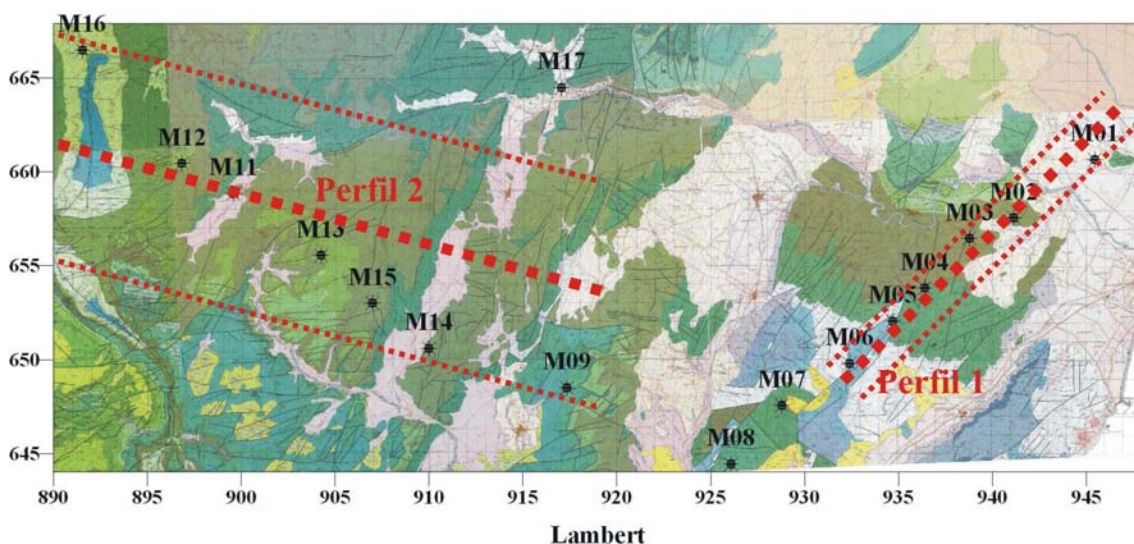


Figura 10. Direcciones de los perfiles interpretados 1 y 2.

Para la corrección del *static shift* se ha distinguido entre las estaciones tomadas sobre las calizas y las tomadas sobre los sedimentos, y se ha contemplado el valor promedio de las frecuencias altas para cada caso.

5. INTERPRETACIÓN

Se ha procedido a invertir cada perfil por separado. Se han considerado los datos en el rango de frecuencias entre 1000 y 0,01 Hz. Los modelos 2D para los perfiles se han obtenido mediante el algoritmo RLM2DI (Rodi y Mackie, 2001), que invierte las curvas de resistividad aparente y fase de ambas polarizaciones, y se han adaptado a la topografía. Para las estaciones M08 y M17 se ha considerado una inversión unidimensional.

5.1 Modelo para el perfil 1

Como resultado para el perfil 1 se ha obtenido el modelo que se presenta en la figura 11.

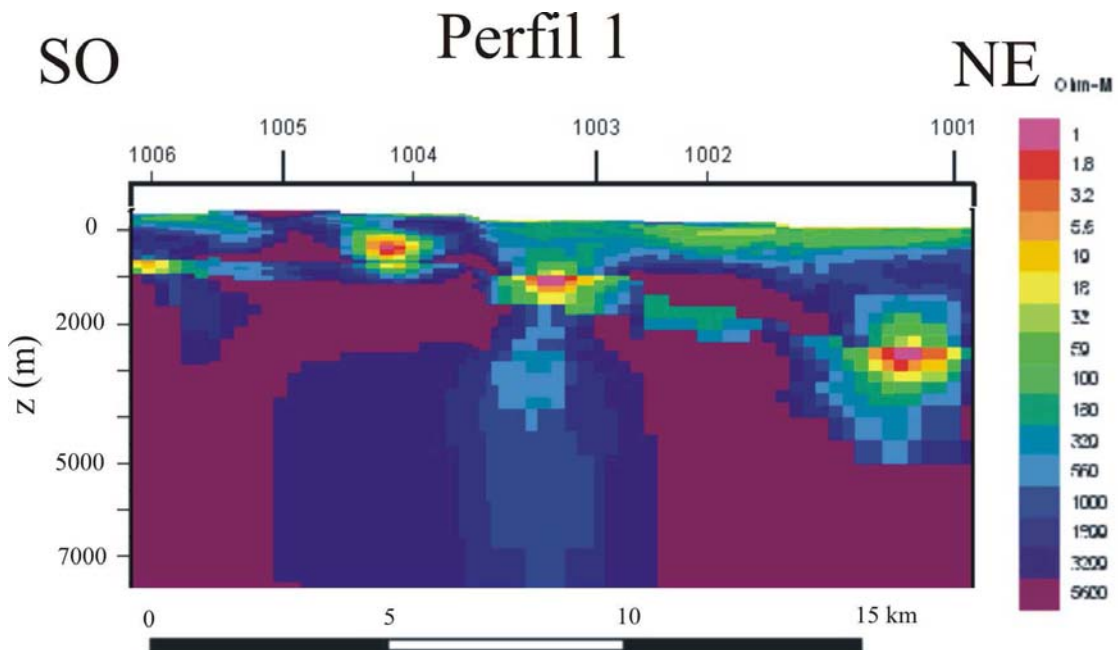


Figura 11: Modelo geoelectrico para el perfil 1.

Los ajustes entre las respuestas para dicho modelo y las curvas de resistividad aparente y fase ya rotadas se muestran en las figuras 12 y 13 respectivamente. En azul se tiene la polarización TM y en rojo, la TE.

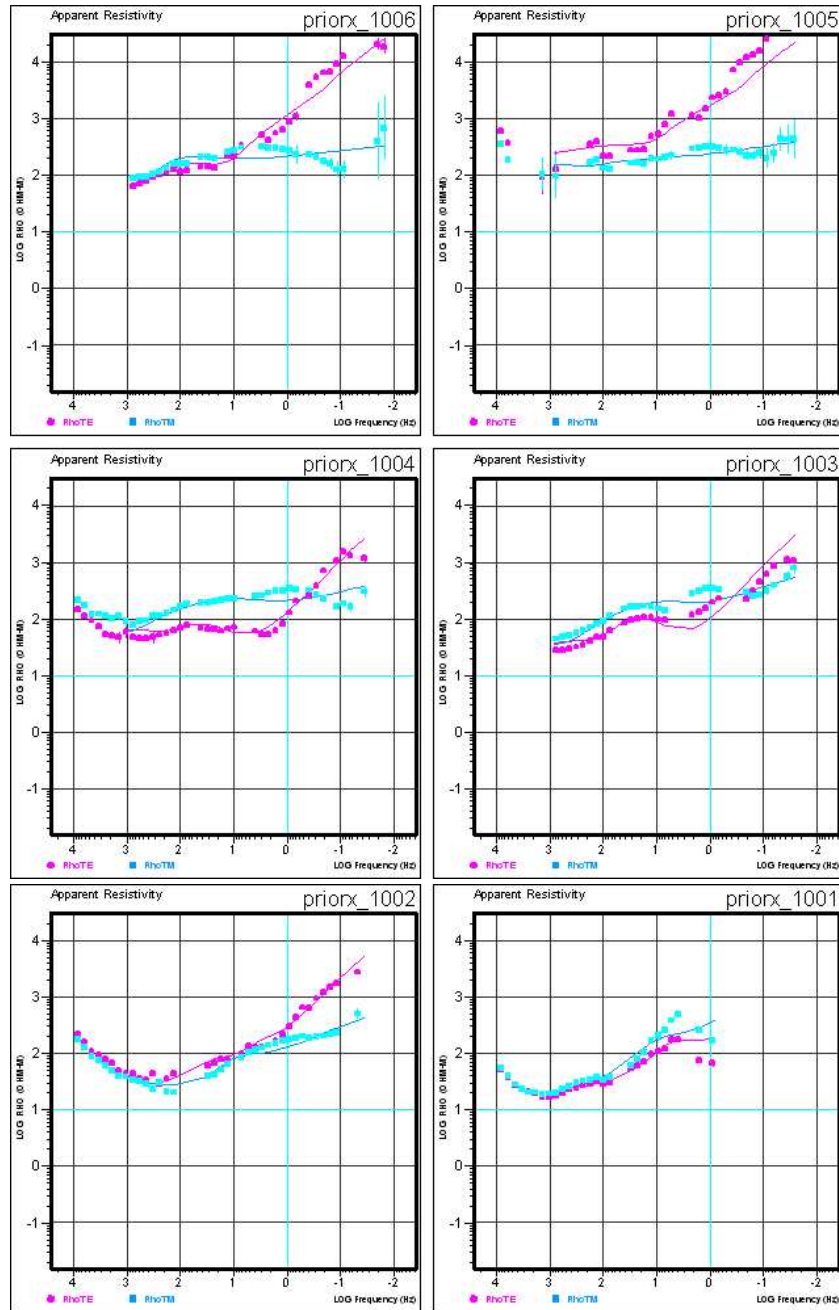


Figura 12: Comparación entre las curvas de resistividad aparente medidas (puntos) y las del modelo (línea continua)

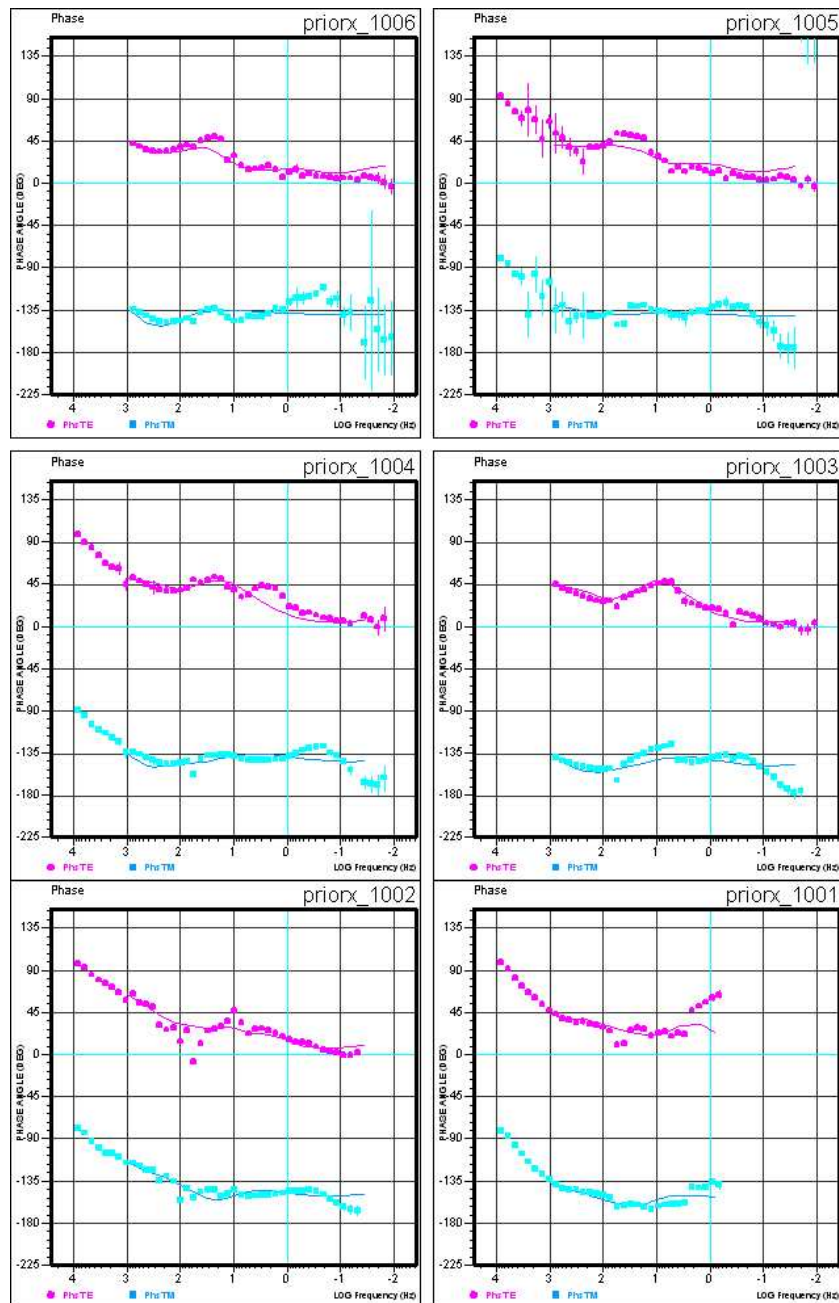


Figura 13: Comparación entre las curvas de fase medidas (puntos) y las del modelo del perfil 1 (línea continua)

Las figuras anteriores muestran una buena calidad del ajuste entre las respuestas y los datos. Para ello se ha calculado el RMS empleando la expresión:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(d_i - f_i)^2}{\epsilon_i^2}},$$

donde d_i son los datos (tanto $\ln \rho_a$ como φ); f_i , las respuestas calculadas por el modelo para esos datos; ε_i , la barra de error, y N , el número de datos. El valor obtenido ha sido de 5,8.

En los datos se observa que para frecuencias bajas, las curvas de resistividad aparente son crecientes, y eso tiene como consecuencia que el modelo presente un nivel muy resistente en profundidad.

5.2 Modelo para el perfil 2

Para los datos del perfil 2 se ha procedido de la misma manera que en el caso anterior, y el modelo obtenido se muestra en la figura 14.

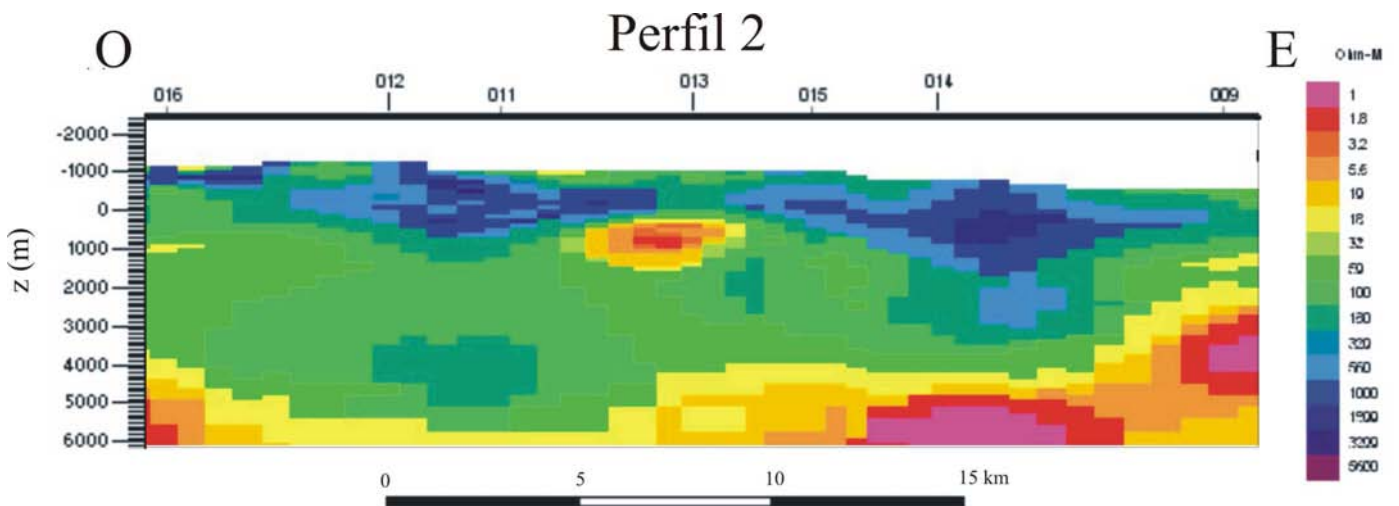


Figura 14: modelo geoelectrico para el perfil 2.

Los ajustes entre las respuestas del modelo y las curvas de resistividad aparente y fase según las direcciones rotadas se enseñan en las figuras 15 y 16: en azul se tiene la polarización TM y en rojo, la TE.

Se comprueba que las respuestas del modelo y los datos presentan un buen ajuste, con un RMS de 3,4.

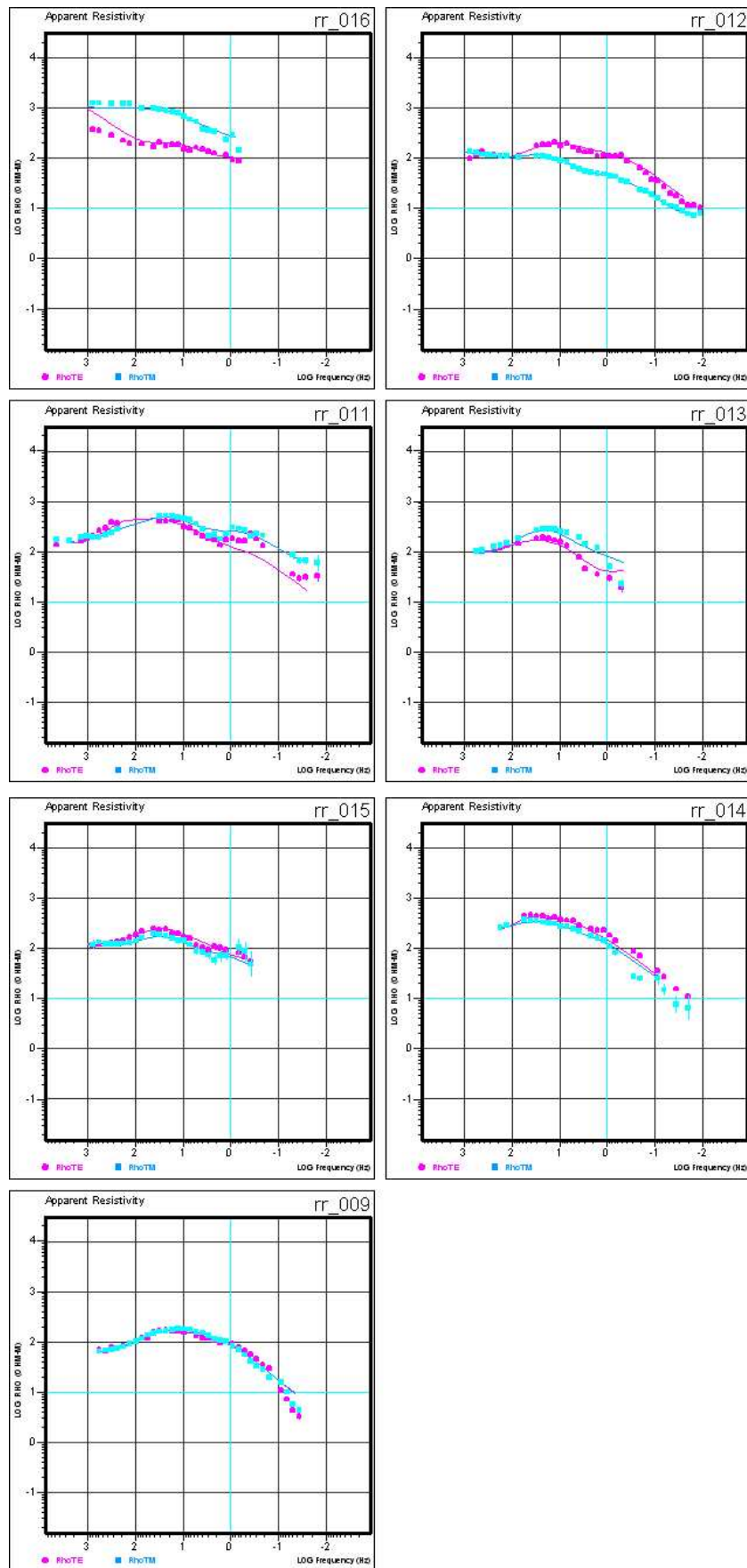


Figura 15: Comparación entre las curvas de resistividad aparente medidas (puntos) y las del modelo del perfil 2 (línea continua).

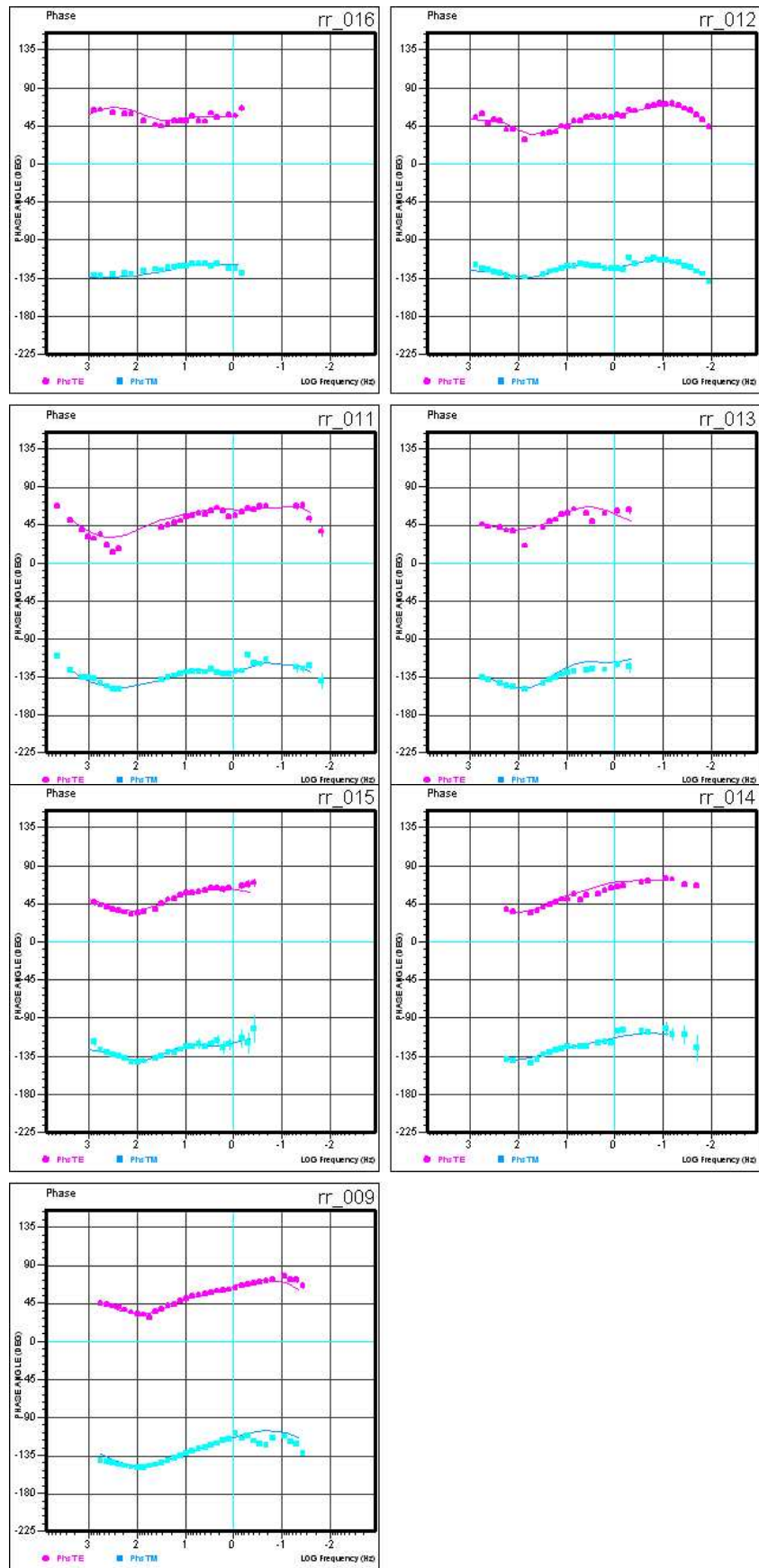


Figura 16: Comparación entre las curvas de fase medidas (puntos) y las del modelo del perfil 2 (línea continua).

En este perfil, a diferencia de lo que ocurre en el perfil 1, las curvas de resistividad aparente para frecuencias bajas decrecen, y eso tiene como consecuencia que el modelo (figura 14) presente un conductor en profundidad. Este aspecto se discute más adelante.

5.3 Modelo unidimensionales para las estaciones M17 y M08

La interpretación a partir de modelos unidimensionales debe ser tomada con cierta cautela, porque los efectos laterales pueden aparecer bajo el sondeo como variaciones verticales de resistividad.

La estación M17 quedaba aislada de los dos perfiles anteriores y por ello se ha procedido a una inversión unidimensional utilizando las expresiones del determinante del tensor de impedancia según las fórmulas [3].

El modelo y los ajustes se muestran en la figura 17. Estas curvas tienen el mismo comportamiento que las del perfil 2 con un decrecimiento de la resistividad aparente para frecuencias bajas.

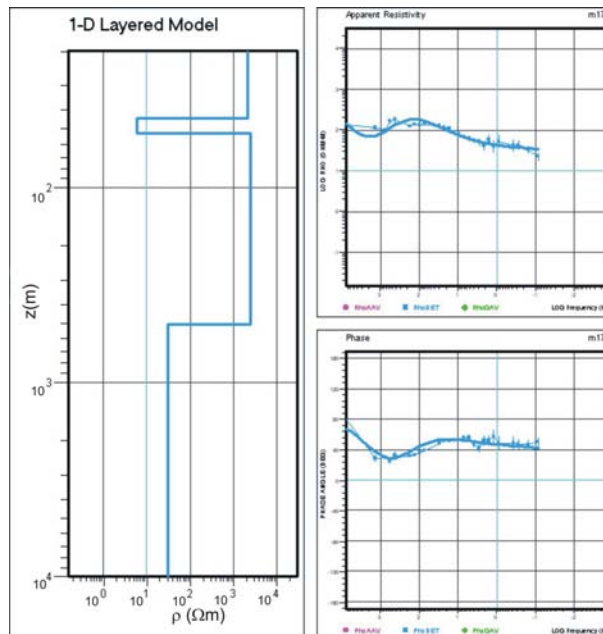


Figura 17: Ajuste para la estación M17. La profundidad está en escala logarítmica.

El modelo obtenido tiene cuatro capas: en la superficie se tiene una capa resistente de $2000 \Omega\cdot\text{m}$ y 45 m de potencia, sobre un nivel conductor delgado ($7 \Omega\cdot\text{m}$ y 10 m); bajo ella hay otra capa resistente ($2500 \Omega\cdot\text{m}$) limitada por un medio conductor ($30 \Omega\cdot\text{m}$) cuyo techo se puede situar a $0,5 \text{ km}$ de profundidad, si bien por la cuestión de equivalencia se podría localizar entre $0,4$ y $0,6 \text{ km}$.

La estación M08 sólo registró una dirección del campo eléctrico, de manera que no se ha podido realizar el tratamiento tensorial que se ha aplicado a las otras, y la interpretación debe tomarse con mayor cautela. De todas maneras, para esa dirección se ha efectuado la inversión 1D y el resultado se muestra en la figura 18.

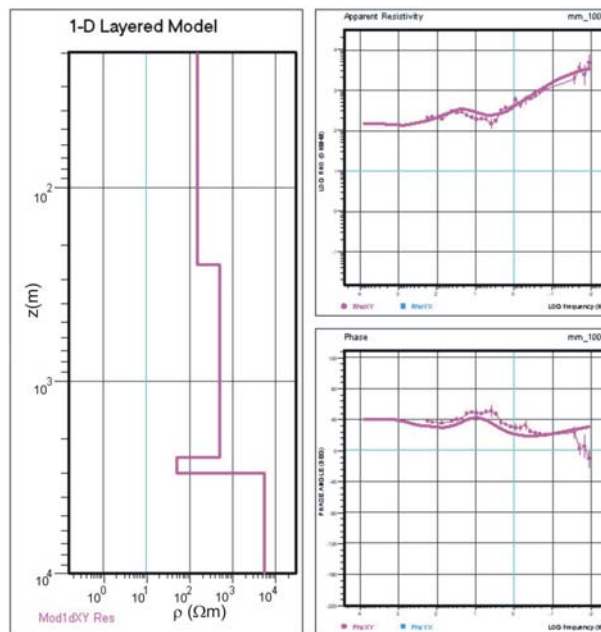


Figura 18: Ajuste para la estación M08. La profundidad está en escala logarítmica.

El modelo identifica cuatro capas, una primera capa de $150 \Omega\text{m}$ y 250 m de potencia, bajo la que hay más resistente de $500 \Omega\text{m}$. El techo siguiente capa conductora se sitúa a $2,5 \text{ km}$ de profundidad y tiene una potencia de unos $0,5 \text{ km}$, bajo la cual hay un medio muy resistente ($> 5000 \Omega\text{m}$). Estos valores pueden variar ligeramente por el principio de equivalencia. Este comportamiento es semejante al que aparece en el modelo del perfil 1.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los modelos geoelectrico anteriores asociados a los perfiles 1 y 2 se muestran en la figura 19 utilizando la misma escala para favorecer su comparación. Y aunque están relativamente próximos, su comportamiento es muy diferente en profundidad, tal como se sugería a partir de la forma de las curvas de resistividad aparente en esos perfiles. A continuación se describen estos modelos más detalladamente.

En el modelo del perfil 1 se distinguen unos cuerpos conductores, identificados por las flechas blancas en la figura 19, que buzan hacia el NE y se interpretan como los materiales triásicos. La discontinuidad en las resistividades que presenta este nivel se puede asociar a la diferente tipología de estos materiales que alcanzan valores de resistividad altos (yesos o halitas) y bajos (arcillas o disoluciones salinas). Este buzamiento se ajusta con la información de los pozos Salsadella y Maestrazgo-1. El primero se encuentra en el extremo SO del perfil, en la proximidades del la estación M07, y distingue los materiales triásicos a 0,5 km; el segundo está cercano a M02, en el extremo NE del perfil, sitúa esos materiales a 2,5 km. Bajo estos objetos aparece un horizonte muy resistivo ($> 3000 \Omega\text{m}$) que estaría asociado al basamento. Este comportamiento también se da para la estación M08.

El modelo del perfil 2 se distingue un horizonte resistente cuya base se sitúa entre 1 y 2 km de profundidad, identificado por los colores en tono azul, que se ha asociado a los materiales cretácicos y jurásicos (indicados por las flechas blancas en la figura), que están adelgazados bajo las estaciones M16, M13 y M09, y en el caso del M16 coincide con una estructura anticlinal. A diferencia del modelo del perfil 1, no se aprecian esos niveles conductores que se identificaron en aquel como triásicos, excepto bajo la estación M13. Los pozos de Bobalar-1 y Bobalar-2 están próximos a la estación M16, en el extremo O del perfil, e identifican los materiales triásicos a 1 km de profundidad. En el modelo bajo la estación M16 sólo distingue una estructura resistente hasta unos 0,5 km, debajo de la que sitúa una estructura más conductora (50 – 100

Ωm , de color verde en el modelo), uniforme hasta unos 4,5 km de profundidad, que debe contener tanto los materiales triásicos como los del basamento y que el modelo no los discriminar eléctricamente. Por debajo de esta capa aparece un nivel mucho más conductor (de colores amarillo y naranja en el modelo) que parece buzarse hacia el oeste, que quizás podría estar asociado a un nivel de despegue basal o a la presencia de algún material altamente conductor (grafito ¿?). En cualquier caso este basamento presenta un comportamiento completamente diferente del obtenido en el modelo del perfil 1. La estación M17 parece estar en el mismo contexto geoelectrico que el perfil 2, ya que el modelo unidimensional calculado muestra un comportamiento equivalente.

Los modelos muestran que es posible caracterizar los materiales jurásicos y cretácicos que se asocian al acuífero libre, pero los datos muestran que en esta zona las estructuras son tridimensionales de manera que los modelos bidimensionales son una aproximación a estas estructuras. Los materiales triásicos y el basamento paleozoico presentan un comportamiento diferente según los modelos obtenidos por los dos perfiles, que ya se manifestaba en los datos: la forma de las curvas de resistividad aparente a frecuencias bajas es muy diferente para ambos perfiles.

Para una descripción más completa sería necesario disminuir la distancia entre estaciones, plantear la adquisición en base a la obtención de un modelo tridimensional, y realizar nuevas adquisiciones en la zona entre los dos perfiles para discriminar el diferente comportamiento de las estructuras que se ha interpretado como basamento.

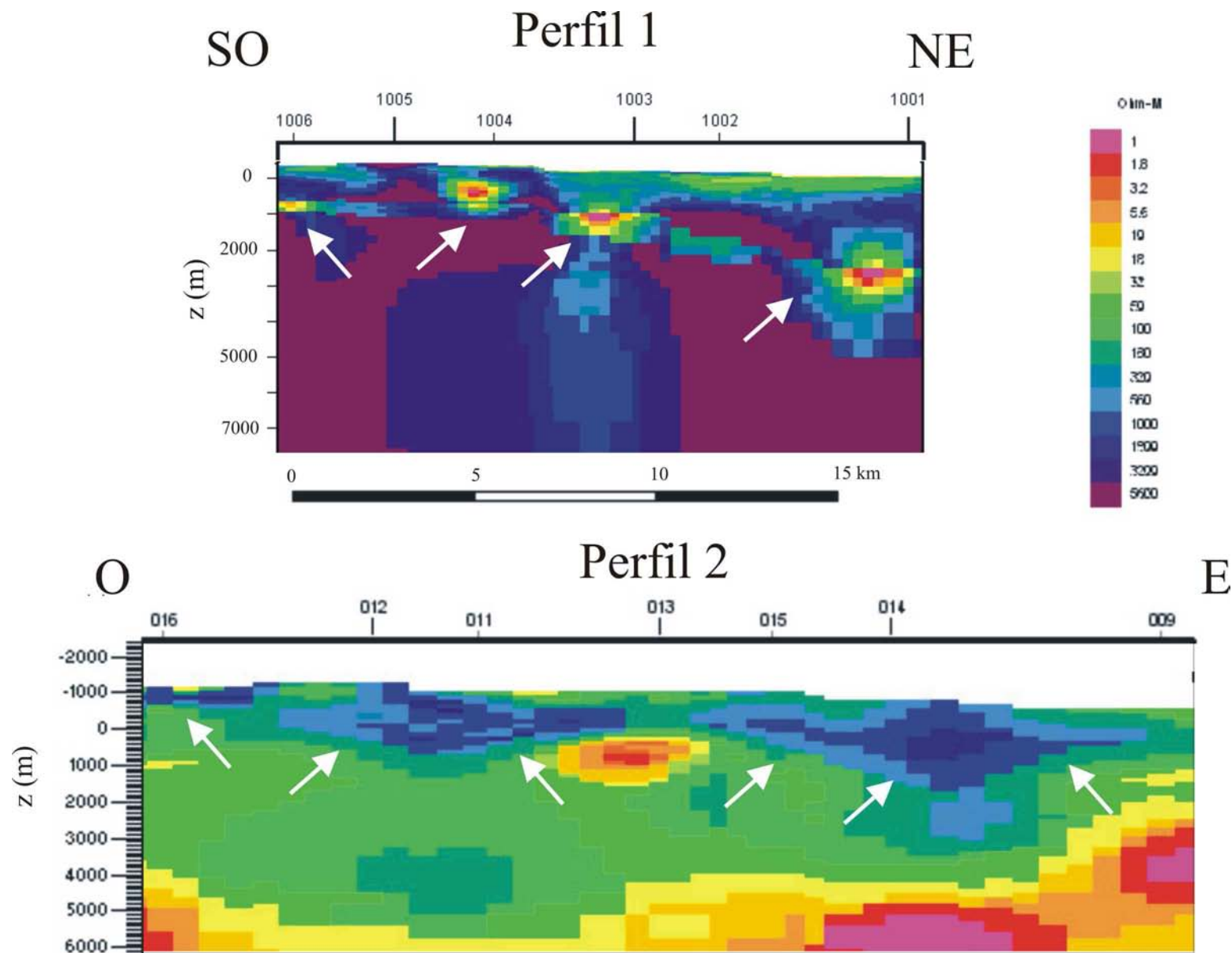


Figura 19: Modelo geoléctrico para el perfil 1 (panel superior) y el perfil 2 (panel inferior).

Referencias

- Bendat, J.S y Piersol, A.G. 1971. Random data: analysis and measurements procedures. John Wiley & sons. Nueva York, 407 pág.
- Groom, R.W. y Bailey, R.C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in presence of local three-dimensional galvanic distortion. *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1989.
- Martí A., Queralt, P. y Roca, E. 2004. Geoelectric dimensionality in complex geologic areas: application to the Spanish Betic chain. *Geophys. J. Int.*, 157, 961-974.
- Pedersen L. y Engels, M. 2005. Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor. *Geophysics*, 70, 33-41.
- Rodi, W. y Mackie, R.L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversions, *Geophysics*, 66 , 174-187.
- Vera, J.A. (Editor). 2004. Geología de España. Ed. Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España. 884 pp.
- Weaver J.T., Agarwal, A.K. y Lilley, F.E.M. 2000. Characterisation of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophys. J. Int.*, 141, 321-336.

APÉNDICE 1: Especificaciones técnicas de los equipos

Sistemas de registro

Metronix ADU06 (registrador del GMS06): Ordenador interno de 32 bits, dos convertidores A/D: 4096 muestras/s y 40960 muestras/s, de 24 bit, y 5 canales.

Rango de frecuencias: DC-20 kHz

Reloj Interno: Oscilador de cristal de alta precisión ± 130 ns con referencia GPS (Motorola).

Capacidad: 256 Mb de memoria Flash.

Conexión de red: Cable coaxial estándar.

Alimentación: batería de 12 V (40Ah).

Sensores magnéticos

El GMS06 utiliza las bobinas MFS06 y cada instrumento emplea sus propias bobinas de inducción cuyas funciones de respuesta son particulares de cada una. La función de respuesta típica de estas bobinas se muestra en la figura 20.

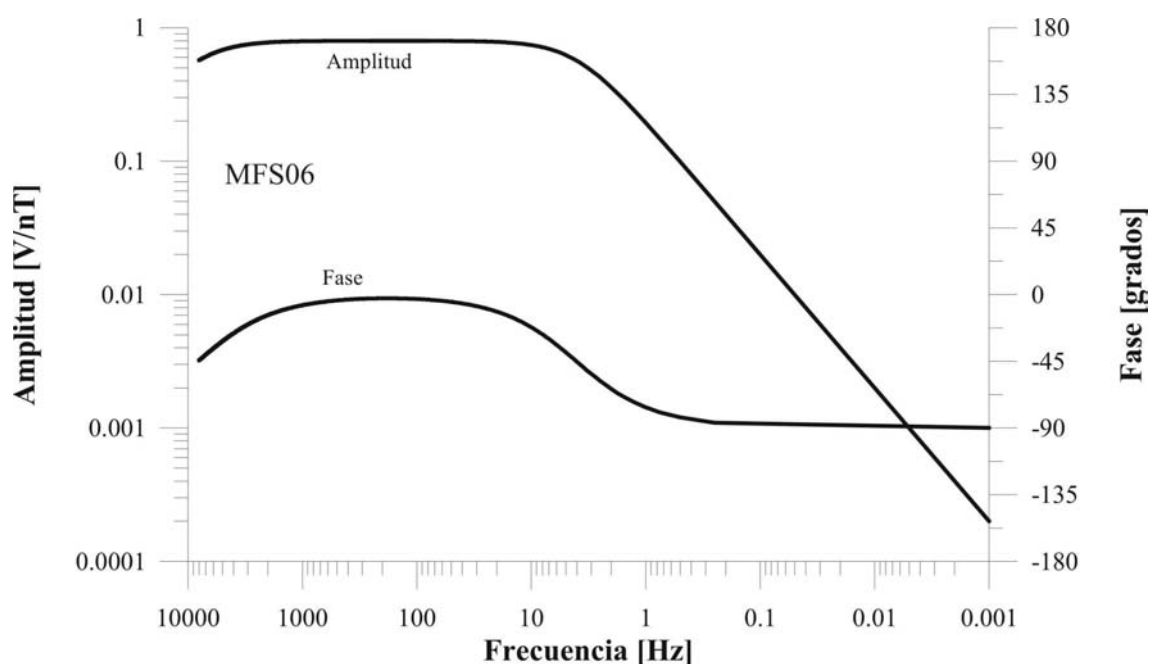


Figura 20: Funciones de respuesta típica de los sensores magnéticos.

APÉNDICE 2: Formato de los archivos de las series temporales (archivos *.ATS)

Los datos de campo originales (series temporales) registrados por el sistema GMS06 están almacenados en unos archivos escritos en formato binario por el programa de adquisición de datos GMS157b desarrollado por Metronix (Tabla 4). Estos archivos están en un directorio con el nombre de la estación y el nombre sigue la convención siguiente:

ssscrrtb.ATS

donde:

sss = número del serie del equipo ADU06

c = Número de canal del ADU06 (a=1...h=8)

r = número de registro o *run*

t = tipo de canal (a=Ex, b=Ey, x=Hx, y=Hy, z=Hz)

b = frecuencia de muestreo (a=40960, b=4096, c=64, d=2, f= 512 Hz)

Tabla 5: Cabecera del archivo ATS

Byte Off-set	ADR	Byte	Tipo	Nombre	Información
1	000H	2	INTEGER	Header length	Tamaño de la cabecera en byte
3	002H	2	INTEGER	Header version	Número de versión de la cabecera (*100)
5	004H	4	LONGINT	Samples	Número de muestras
9	008H	4	SINGLE	Sample freq.	Frecuencia de muestreo
13	00CH	4	LONGINT		Tiempo de inicio de la medición (en segundos desde 1.1.70)
17	010H	8	DOUBLE	LSBVal	LSB en mV
25	018H	8	BYTE	Reserved	Reservado
33	020H	2	INTEGER		Número de serie del ADU06
35	022H	2	INTEGER		Núm. de serie de la tarjeta A/D ADB06
37	024H	1	BYTE		Número de canal (0, 1, ...7)
38	025h	1	BYTE	Reserved	Reservado
39	026h	2	CHAR		Tipo de canal (Ex,Ey,Hx,Hy,Hz)
41	028H	6	CHAR		Tipo de sensor (MFS05,BF4...)
47	02EH	2	INTEGER		Número de serie del sensor
49	030H	4	SINGLE		x1 coordenadas del electrodo 1(m)
53	034H	4	SINGLE		y1
57	038H	4	SINGLE		z1
61	03CH	4	SINGLE		x2 coordenadas del electrodo 2(m)

65	040H	4	SINGLE		y2
69	044H	4	SINGLE		z2
73	048H	4	SINGLE		Longitud del dipolo eléctrico (m)
77	04CH	4	SINGLE		Ángulo(0°=norte) (grados)
81	050H	4	SINGLE		Resistencia de contacto (ohm)
85	054H	4	SINGLE		Compensación del canal (mV)
89	058H	4	SINGLE		Amplificación interna (1 o 30)
93	05CH	4	BYTE		Reservado
97	060H	4	LONG		Latitud (msec)
101	064H	4	LONG		Longitud (msec)
105	068H	4	LONG		Elevación (cm)
109	06CH	1	CHAR		Lat/Long Tipo: U' definido por el usuario, 'G' reloj interno GPS
110	06DH	1	CHAR		Tipo de coordenadas adicionales: 'U' UTM, 'G' Gauss-Kruger (Alemania)
111	06EH	2	INTEGER		Mediano de referencia
113	070H	8	DOUBLE		Coordenada X
121	078H	8	DOUBLE		Coordenada Y
129	080H	1	CHAR		Status GPS/CLK: 'G' GPS sintonizado, 'C' CLK sincronizado, 'N' CLK no sincronizado
130	089H	1	BYTE		Precisión aproximada del GPS/CLK: 9 indica una precisión de 10 ⁻⁹
131	082H	14	BYTE		Reservado
145	090H	12	CHAR		Nombre del archivo de cabecera del registro
157	09CH	4	CHAR		Tipo de medición: MT o CSAMT
161	0A0H	12	CHAR		Nombre del archivo con los resultados del autotest
173	0ACH	2	CHAR		Resultado del autotest 'OK' o 'NO'
175	0AEH	2	BYTE		Reservado
177	0B0H	2	INTEGER		Número de frecuencias de calibración en el archivo
179	0B2H	2	INTEGER		Tamaño de las frecuencias de entrada(32 byte)
181	0B4H	2	INTEGER		Versión del formato de calibración (*100)
183	0B6H	2	INTEGER		Dirección lógica inicial de la información de calibración en la cabecera (400H)
185	0B8H	8	BYTE		Reservado
193	0C0H	12	CHAR		Nombre del archivo de calibración del ADU06
205	0CCH	4	LONG		Fecha/Hora de calibración
209	0D0H	12	CHAR		Nombre del archivo de la calibración del sensor
221	0DCH	4	LONG		Fecha/Hora de calibración
225	0E0H	4	SINGLE		Frec. 1 de la red eléctrica
229	0E4H	4	SINGLE		Frec. 2 de la red eléctrica
233	0E8H	8	BYTE		Reservado
241	0F0H	4	SINGLE		CSAMT: frecuencia del transmisor
245	0F4H	2	INTEGER		CSAMT: bloques de registro
247	0F6H	2	INTEGER		CSAMT stacks/bloque
249	0F8H	4	LONG		CSAMT tamaño del bloque
253	0FCH	4	BYTE		Reservado
257	100H	16	CHAR		Cliente
273	110H	16	CHAR		Contratista
289	120H	16	CHAR		Área

305	130H	16	CHAR		Identificador de la Campaña
321	140H	16	CHAR		Operador
337	150h	112	CHAR		Reservado
449	1C0H	64	CHAR		Condiciones meteorológicas
513	200H	512	CHAR		Comentarios
1025	400H	32			Frecuencia de calibración 1
1025	400H	4	SINGLE		Frecuencia
1029	404H	4	SINGLE		Amplitud: campo e (V) – campo h (nT/V)
1033	408H	4	SINGLE		Fase (grados)
1037	40ch	4	SINGLE		Precisión de la amplitud (%)
1041	410H	4	SINGLE		Precisión de la fase (+/- grados)
1045	414H	12	BYTE		Reservado
1057	420H	32			Frecuencia de calibración 2
...					...
	400H+(n.1)*20H	32			Frecuencia de calibración n
	400H+n*20H	4 samples	LONGINT		Series temporales