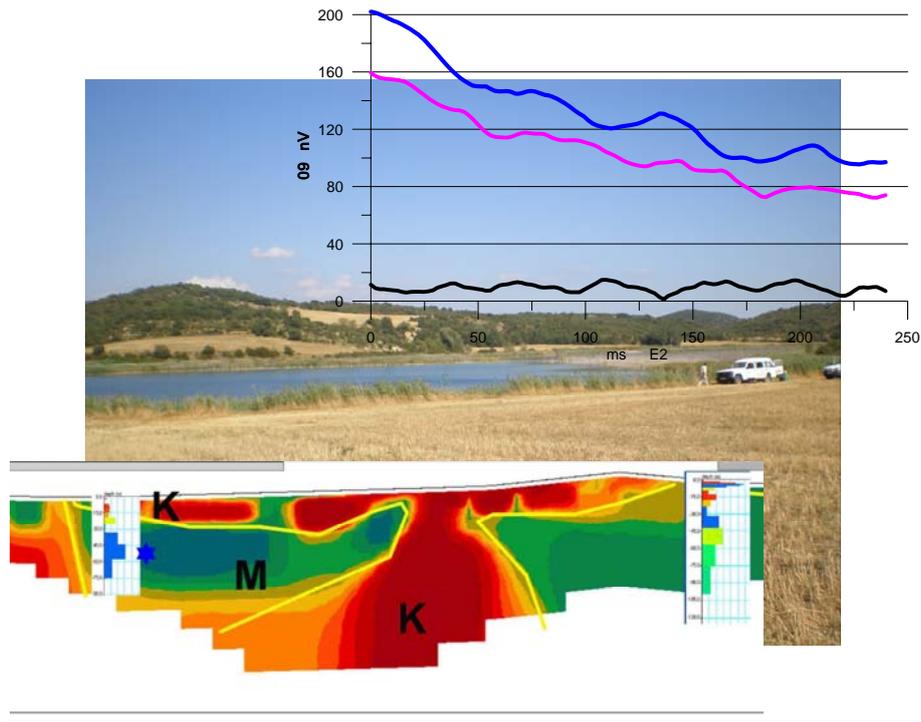


**PROYECTO
FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS
CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL EBRO**

HUMEDALES-EBRO



**INFORME DE LAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS EFECTUADAS EN
2008 EN LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)**

Juan Luís Plata Torres
Félix M. Rubio Sánchez-Aguililla

Grupo de Geofísica del IGME
Tres Cantos
Abril 2009



INDICE

- 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**
- 2 NOCIONES GENERALES DEL MÉTODO DE PERFILES ELÉCTRICOS**
- 3 CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**
- 4 INTERPRETACIÓN DE LOS PERFILES ELÉCTRICOS**
- 5 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO SRM**
 - 5.1 Fundamentos teóricos y medición de los SRM
 - 5.2 Parámetros de inversión de un SRM
 - 5.3 Presentación de los resultados
- 6 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO DE SRM**
 - 6.1 Instrumentación utilizada
 - 6.2 Equipo de trabajo
 - 6.3 Selección de los emplazamientos de medición de los SRM
 - 6.4 Parámetros de adquisición e incidencias de medición
- 7 ANÁLISIS DE LOS DATOS SRM DE CAMPO**
 - 7.1 Análisis individual de cada SRM
 - 7.2 Visión conjunta de los SRM
- 8 ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO**
- 9 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE INVERSIÓN**
 - 9.1 Parámetros determinados a partir del análisis de los datos
 - 9.2 Influencia del modelo geoelectrico en los resultados de la inversión
 - 9.3 Cálculo de las matrices de inversión para los SRM de Estaña
 - 9.4 Efecto del parámetro de regularización
 - 9.5 Efecto del número de capas
 - 9.6 Parámetros de proceso adoptados
- 10 PRESENTACIÓN GENERAL DEL RESULTADO DE LA INVERSIÓN DE LOS SRM**
- 11 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVERSIÓN DE LOS SRM**
- 12 ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LOS RESULTADOS DE SRM**
 - 12.1 Análisis de la distribución de acuíferos por su curva $E_0(q)$ y el resultado $w(z)$
 - 12.2 Correlación de SRM en forma de perfiles
- 13 INTEGRACIÓN DE DATOS GEOELÉCTRICOS Y DE RESONANCIA MAGNÉTICA**
- 14 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**
 - 14.1 Respecto de la Geología del subsuelo
 - 14.2 Respecto de los límites hidrogeológicos
 - 14.3 Recomendación de acciones complementarias
- 15 OTRAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS**
 - 15.1 Comentarios a las mediciones de conductividad del agua en las lagunas de Estaña
 - 15.2 Informe sobre la realización de un perfil de magnetometría

ANEXO I: GRAFICOS DEL RESULTADO DE LA INVERSION DE LOS SRM

ANEXO II: RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS PERFILES ELÉCTRICOS

ANEXO III: RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS SRM

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo se encuadra dentro de las actividades llevadas a cabo por el Grupo de Geofísica del IGME en el Proyecto FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL EBRO 2008-2010.

Uno de los objetivos generales de dicho Proyecto es desarrollar un modelo geológico en relación con los humedales seleccionados que permita determinar las relaciones entre el agua subterránea y los humedales en condiciones naturales. Para ello, tras recopilar los datos previos disponibles sobre las lagunas o humedales seleccionados, se realizarán nuevos trabajos, tanto de geología de superficie como estudios geofísicos complementarios, para mejorar el conocimiento de la geometría del acuífero. Para realización de campañas de métodos de prospección Geofísica, se prevé que la toma de datos en campo se lleve a cabo por los propios medios del IGME cuando se disponga de la instrumentación necesaria.

La zona seleccionada para el presente estudio geofísico ha sido las Lagunas de Estaña (Benabarre, Huesca), donde de manera complementaria a la elaboración de una cartografía geológica, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la continuidad en profundidad de los materiales cartografiados (Figura 6) a escala 1:5.000 (limos con cantos sueltos del cuaternario, arcillas y yesos del Keuper, y las dolomías y calizas del Muschelkalk).
- Estudiar el contacto entre las calizas del Cretácico Superior (Sinclinal de Estopiñán) y las arcillas con yesos del Keuper.
- Establecer límites hidrogeológicos en el entorno de las lagunas de Estaña.

La información hidrogeológica hasta ahora conocida puede sintetizarse en lo siguiente:¹⁾

El acuífero principal está constituido por las calizas del Cretácico superior, de hasta 200 m de potencia, que forman parte del Sinclinal de Estopiñán, en cuyo núcleo afloran materiales calcáreos del Paleoceno. A este acuífero se asocian las descargas de los manantiales más importantes, como el de las Ollas.

¹⁾ Extraído de :

- Pérez, C., Gómez J.A. y Lambán, L.J. 2008. Monitorización de las Lagunas de Estaña y los manantiales principales del acuífero del sinclinal de Estopiñán (Huesca, España). Elche enero 2008.
- Pérez, C. y Lambán, L.J. 2007. Implicaciones de las directivas europeas en zonas húmedas relacionadas con las lagunas subterráneas. Aplicación a las lagunas de Estaña (Huesca, España). Santiago de Compostela, noviembre, 2007.
- Pérez, C. y Lambán, L.J. 2008. Primeros resultados obtenidos sobre el funcionamiento hidrogeológico de las lagunas de Estaña y su relación con el acuífero de Estopiñán (Huesca, España). 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar 2008.

Los complejos movimientos tectónicos que originan la estructura del Sinclinal son probablemente los responsables de la caótica disposición de los distintos bloques de materiales carbonatados del Muschelkalk (de unos 60-80 m de potencia) y su compleja relación con los materiales del Keuper, que pueden encontrarse parcialmente afectados por procesos de diapirismo. Esta serie puede estar intensamente plegada, con buzamientos en direcciones muy variables, e incluso verticalizados. El contacto entre el Muschelkalk con los materiales del Keuper es mediante contacto mecánico o por falla, y en raras ocasiones por contacto normal. El Keuper está compuesto por lutitas y yesos, con espesores de hasta 250 m, que pueden tener restos de sales cloruradas; dentro del Keuper también afloran ofitas.

Se han observado muchas surgencias asociadas al contacto Muschelkalk – Keuper, con un régimen permanente de descarga, lo que podría indicar que los materiales dolomíticos triásicos se encuentran saturados de agua y funcionan como acuífero local, descargando hacia las lagunas. La compleja estructura entorno de las Lagunas no permite descartar la existencia de aportes subterráneos procedentes de los materiales cretácicos del sinclinal. Parece existir un flujo subterráneo NO-SE, así como una posible conexión hidráulica entre los dos tramos permeables principales (Cretácico superior y Eoceno); dada la cota de las lagunas, podría existir conexión hidráulica entre ellas y el sinclinal.

Las lagunas son endorreicas y se encuentran sobre los materiales dolomíticos triásicos del Muschelkalk y los materiales arcillosos y evaporíticos del Keuper, ambos carstificados. Se han formado a partir de una dolina de colapso, y están rellenas de materiales cuaternarios. La laguna más pequeña está topográficamente más alta. La grande tiene las paredes verticalizadas, y un umbral en su parte central, que la divide en dos cubetas de 12 y 20 m de profundidad.

Las transmisividades medidas en el Cretácico Superior por ensayo de bombeo es de 31-34 m²/día, con coeficiente de almacenamiento de 1.9×10^{-4} a 1.4×10^{-6}

En este contexto, el objetivo es confirmar el origen subterráneo de las lagunas, determinando el grado de conexión existente entre los materiales triásicos y el acuífero principal del Sinclinal de Estopiñan (Cretácico).

Analizados los objetivos y el entorno geológico, se decidió la utilización de dos métodos geofísicos complementarios:

- **Método de Perfiles Eléctricos**, ya que la propiedad mas distintiva del tipo de rocas existentes es la resistividad, que se verá además modificada por la presencia agua.
- **Sondeos de Resonancia Magnética (SRM)**, ya que es el único método geofísico que detecta directamente la presencia de agua, permitiendo por lo tanto diferenciar entre rocas conductoras y rocas cuya resistividad ha disminuido debido al contenido y calidad del agua.

2 NOCIONES GENERALES DEL MÉTODO DE PERFILES ELÉCTRICOS²

El propósito de una campaña eléctrica es determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo mediante la realización de medidas en superficie. La resistividad de las rocas del subsuelo está relacionada con diversos parámetros: los minerales contenidos, la porosidad, el grado de saturación de agua de la roca, la salinidad del agua, la temperatura, etc.

Las medidas de resistividad se hacen inyectando corriente al terreno a través de un par de electrodos denominados de "corriente", y midiendo la diferencia de potencial entre otro par de electrodos denominados de "potencial". A partir de la intensidad de corriente I emitida y el voltaje medido V se calcula un valor de resistividad aparente mediante la expresión $\rho_a = k V / I$ donde k es un factor geométrico que depende de la disposición y distancias entre los electrodos. Esta resistividad se adjudica a un punto situado en el centro del dispositivo electródico y a una profundidad que aumenta con las distancias entre los electrodos de corriente, o entre dichos electrodos y los de potencial, según el tipo de dispositivo. En la Figura 1 se muestran los dispositivos más comunes junto con su factor geométrico.

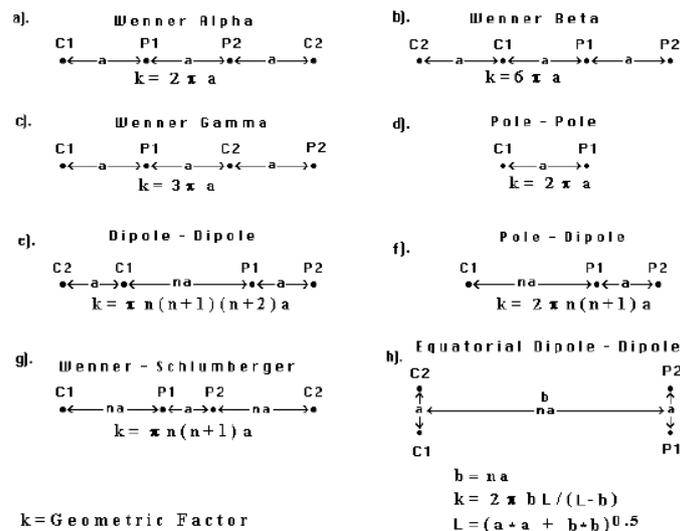


Fig. 1 Dispositivos más comunes utilizados en campañas eléctricas y sus factores geométricos: Wenner, dipolo-dipolo y Schlumberger.

La inversión de los datos de campo permite pasar de la resistividad aparente y su relación con las dimensiones y forma del dispositivo de medida, a la distribución de la resistividad en el subsuelo. En los métodos de inversión estándar 1D se supone que el subsuelo está formado por un modelo de capas horizontales, con variaciones de resistividad solamente con la profundidad; es el modelo utilizado por los

² Notas extraídas del Tutorial "2-D and 3-D electrical Imaging surveys" de M.H. Loke, 2004

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). Las mediciones de los Perfiles Eléctricos permiten utilizar modelos del subsuelo en 2D, donde la resistividad varía no solo con la profundidad sino que también lo hace lateralmente, sin que cambie en la dirección perpendicular a la línea de medida (sección o corte del terreno). El uso de Perfiles Eléctricos 2-D (también denominados tomografía eléctrica), permite por lo tanto estudiar áreas con una geología moderadamente compleja.

En estas campañas se trata de ir muestreando la resistividad del subsuelo a diferentes niveles de profundidad n (Figura 2) en puntos cuya equidistancia depende del dispositivo electrónico utilizado. Para llevarlas a cabo se utiliza un gran número de electrodos conectados mediante un cable multiconductor (cable con varios hilos conductores), pudiendo actuar cada uno de ellos tanto como electrodo de corriente (C) o como electrodo de potencial (P). En la Figura 2 se muestra un esquema típico de la forma de llevar a cabo las mediciones en 2D, con los electrodos dispuestos en un perfil según una línea recta y dispositivo Wenner. Normalmente se utiliza un espaciado constante entre las posiciones ocupadas por los electrodos, aumentando progresivamente la distancia entre los de emisión, o entre éstos y los de potencial, a fin de obtener la resistividad a los diferentes niveles de profundidad. La secuencia de medida es controlada por el instrumento de registro, que selecciona de manera automática los electrodos apropiados para cada lectura, de entre todos los dispuestos sobre el terreno. El tiempo de registro o lectura automática de las mediciones suele ser muy superior al dedicado a la implantación de los electrodos y cables sobre el terreno.

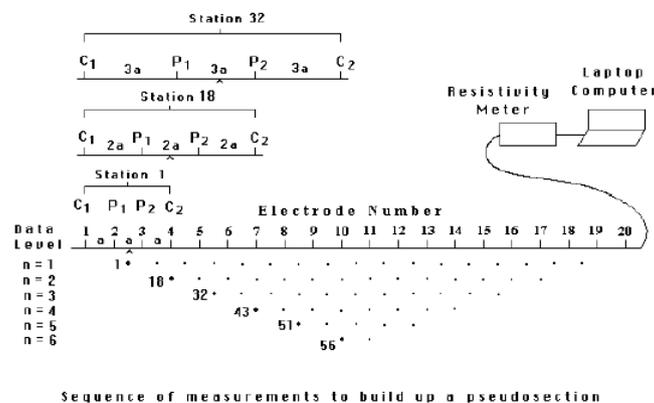


Fig. 2 Disposición de electrodos para una campaña eléctrica 2D y la secuencia de medición para construir una pseudosección con dispositivo Wenner. P: electrodos de potencial; C: electrodos de corriente.

Para representar los datos de la campaña 2D, se utiliza normalmente la pseudosección. La localización horizontal de un dato se establece en el punto medio del juego de electrodos utilizados para hacer la medida. La localización vertical del dato se sitúa a una profundidad proporcional a la separación de los electrodos de emisión de corriente. Otro método consiste en situar la posición vertical del dato en la profundidad media de investigación o seudopropundidad del dispositivo empleado. El valor de la seudopropundidad está basado en los valores de sensibilidad o derivadas de Frechet para un

semiespacio homogéneo. Puesto que este último parece tener alguna base matemática, es el que normalmente se emplea. En la Tabla 1 se muestran las profundidades medias de investigación para los diferentes dispositivos.

Array type	z_e/a	z_e/L
Wenner Alpha	0.519	0.173
Wenner Beta	0.416	0.139
Wenner Gamma	0.594	0.198
Dipole-dipole		
n - 1	0.416	0.139
n - 2	0.697	0.174
n - 3	0.962	0.192
n - 4	1.220	0.203
n - 5	1.476	0.211
n - 6	1.730	0.216
Equatorial dipole-dipole		
n - 1	0.451	0.319
n - 2	0.809	0.362
n - 3	1.180	0.373
n - 4	1.556	0.377
Wenner - Schlumberger		
n - 1	0.52	0.173
n - 2	0.93	0.186
n - 3	1.32	0.189
n - 4	1.71	0.190
n - 5	2.09	0.190
n - 6	2.48	0.190
Pole-dipole		
n - 1	0.52	
n - 2	0.93	
n - 3	1.32	
n - 4	1.71	
n - 5	2.09	
n - 6	2.48	
Pole-Pole	0.867	

Tabla 1. Profundidad media de investigación (Z_e) para los diferentes tipos de dispositivos. L es la longitud total del dispositivo. El factor geométrico es para $a=1$ metro. (Edwards 1977, Geophysics, 42, 1020-1036).

No obstante conviene enfatizar que la seudosección es simplemente una manera de representación que proporciona una imagen aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo, que pueda estar distorsionada debido a que su trazado depende del tipo de dispositivo empleado así como de la verdadera resistividad del subsuelo. La seudosección es útil como un medio de representar la resistividad aparente medida, y sirve como un modelo inicial para la interpretación cuantitativa. Sería un error utilizar la seudosección como una representación final de la resistividad real del terreno (Figura 3).

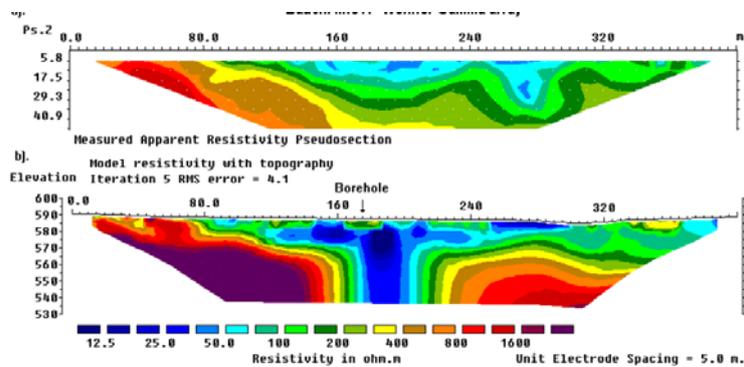


Fig. 3 Ejemplo de diferencia entre seudosección (parte superior) y modelo de resistividad obtenido tras la inversión de los datos (parte inferior).

En la Figura 4 se proporciona un ejemplo de cómo el uso de diferentes dispositivos puede producir para la misma estructura geológica formas diferentes en las pseudosecciones. Cada tipo de dispositivo tiene sus ventajas y sus desventajas, la elección del mejor dispositivo para una campaña depende del tipo de estructura a estudiar, la sensibilidad del equipo de medida y el nivel de ruido de la zona. Entre las características a tener en cuenta a la hora de elegir un dispositivo están: la sensibilidad del dispositivo a cambios laterales y/o verticales del subsuelo, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal del dispositivo y la intensidad de la señal.

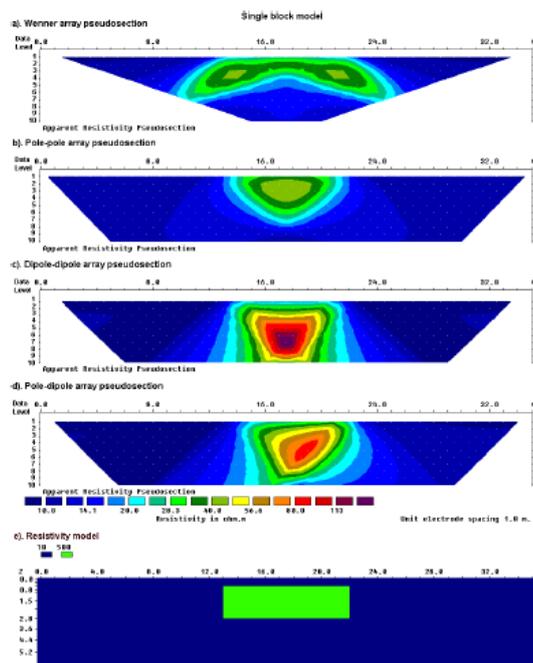


Fig. 4 Seudosecciones de resistividad aparente correspondientes a las imágenes 2D de un bloque rectangular con diferentes dispositivos.

El dispositivo Wenner es el más adecuado para investigar estructuras horizontales, es decir, cambios de resistividad con la profundidad en la vertical del centro del dispositivo. Comparado con otros dispositivos posee una moderada profundidad de investigación (Tabla 1), y es el dispositivo con mayor intensidad de señal, lo que puede ser un factor importante en áreas de alto ruido de fondo. Una desventaja de este dispositivo es la relativamente pobre cobertura horizontal (pérdida de información en los extremos del perfil)

El dispositivo Dipolo-Dipolo es muy sensible a cambios de resistividad de estructuras verticales, y relativamente insensible a cambios de resistividad de estructuras horizontales, lo que significa que es muy bueno resolviendo estructuras como diques y cavidades, pero relativamente pobre resolviendo

estructuras de capas horizontales. Este dispositivo posee una menor profundidad de investigación comparada con el dispositivo Wenner, pero sin embargo posee una mejor cobertura horizontal. Una desventaja de este dispositivo es la señal tan débil que se recibe para grandes valores de n (distancia entre electrodos), por lo que el equipo de medida debe de poseer una alta sensibilidad y un buen sistema de rechazo de ruido.

El dispositivo Wenner-Schlumberger es moderadamente sensible a estructuras verticales (sobre todo profundas) y horizontales (para menor profundidad) y podría ser un buen compromiso entre los dos dispositivos citados anteriormente. La profundidad de investigación de este dispositivo es alrededor de un 10% mayor que para el dispositivo Wenner y la intensidad de la señal es menor que la del dispositivo Wenner y mayor que la del dispositivo Dipolo-Dipolo. La cobertura horizontal de este dispositivo es mejor que la obtenida con el Wenner pero peor que la que se obtiene con el Dipolo-Dipolo.

A la hora de realizar la inversión de los datos hay que tener en cuenta que la solución no es única: para los mismos datos medidos existen un amplio rango de modelos que pueden dar lugar a los mismos valores calculados de resistividad. En el caso de que las estructuras del subsuelo posean cambios graduales de resistividad el programa de inversión puede utilizar el algoritmo de inversión de *smoothness constrain*, el cual trata de minimizar el cuadrado de las diferencias entre los valores de resistividad medidos y calculados. En los casos en que las estructuras presenten cambios bruscos de resistividad (estructuras casi homogéneas internamente y con límites netos), el algoritmo de inversión apropiado es el *robust constrain*, que trata de minimizar al valor absoluto de las diferencias entre los valores de resistividad medidos y los calculados. Estos dos algoritmos proporcionan valores extremos del rango de modelos que es posible obtener con un conjunto de datos, por lo que puede ser recomendable el realizar dos inversiones, una con cada tipo de algoritmo y comparar los resultados. En la Figura 5 se puede ver, sobre un ejemplo teórico, las diferencias obtenidas en la sección geoelectrica a partir de la misma distribución de resistividades o pseudosección (valores resultados de la medición sobre el terreno), al emplear un algoritmo “smooth” o “robust”.

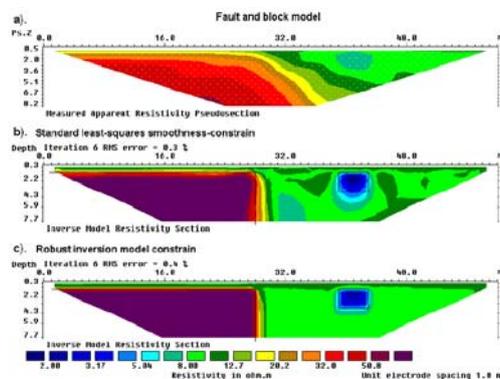


Fig. 5 Diferencias entre el resultado de emplear un algoritmo de inversión smooth y robust.

3 CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Se han medido cuatro perfiles de tomografía eléctrica, tres de ellos situados en los alrededores de las Lagunas de Estaña (PE1, PE2 y PE3) y otro en La Zona de las Ollas (PE4) (Figura 6). Su situación ha sido elegida combinando los objetivos de cartografía geoelectrica del subsuelo con las posibilidades logísticas que el terreno ofrece para extender los cables de las longitudes requeridas.

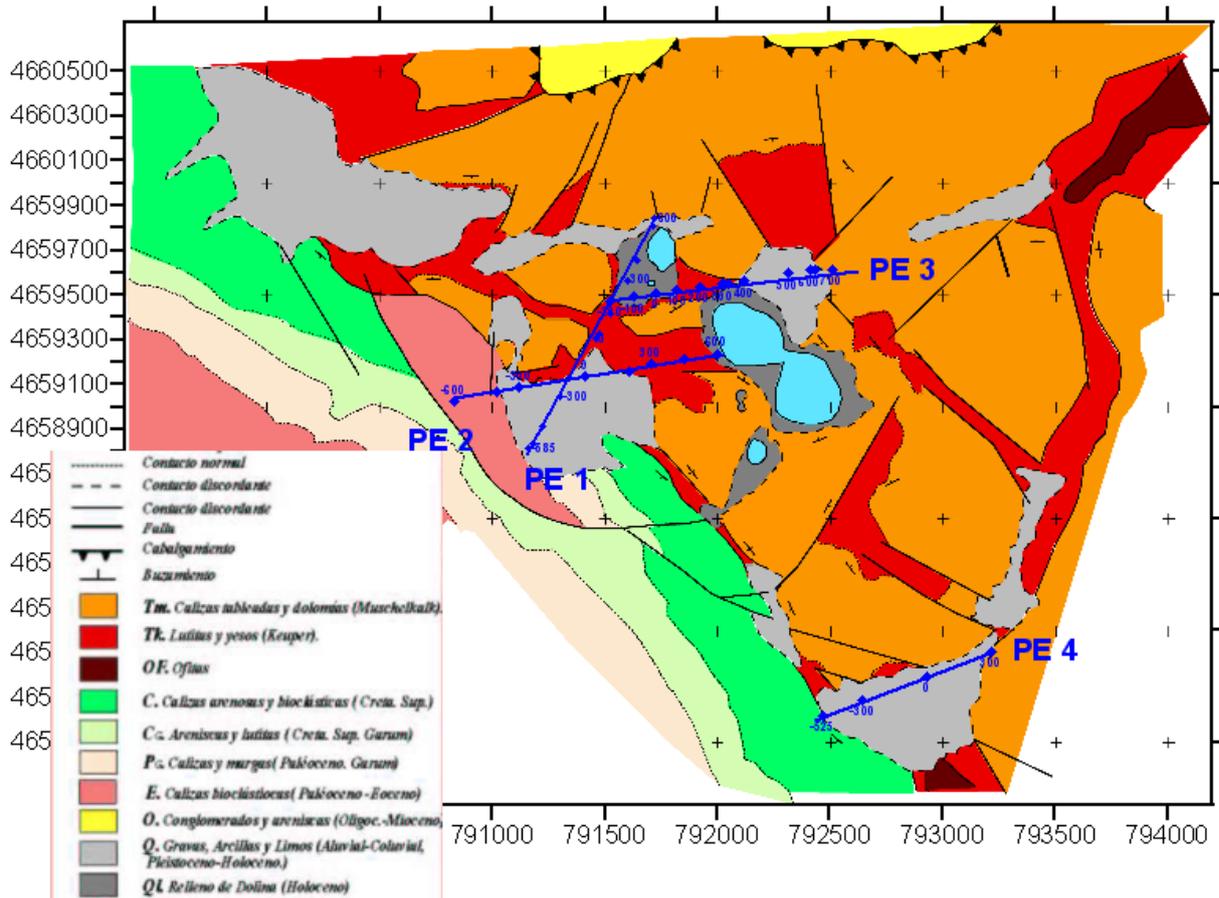


Fig. 6 Situación de los Perfiles Eléctricos medidos

Se ha utilizado el sistema LUND de ABEM, propiedad del IGME. Para la inversión de los datos de campo y obtención de los perfiles de resistividad finales se ha empleado el programa RES2DINV v. 3.46b de M.H. Loke. Los parámetros empleados en la inversión han sido los mismos para todos los perfiles. En el ANEXO II se describen los ficheros digitales generados con los datos de campo y los resultantes de la interpretación.

Las características de los perfiles y dispositivos empleados se recogen en la Tabla 2.

Perfiles Eléctricos en las Lagunas de Estaña

Parámetros de medición

Coordenadas UTM H30

Nombre	Dispositivos empleados	Espaciado Interelectrónico	Longitud del Perfil	X (origen)	Y(origen)	X(Final)	Y(Final)
PE 1	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295045	4656795	294417	4655814
PE 2	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295278	4656174	294098	4656044
PE 3	Wenner	5 m	1300 m	294754	4656274	295816	4656516
PE 4 (Ollas)	Wenner /Schlumberger	15 m	850 m	296109	4654671	295634	4654530

Tabla 2. Parámetros y coordenadas de posición de los Perfiles Eléctricos

Perfil Estaña 1 (Figura 7)

Este perfil de 1200 m de longitud, comienza (extremo NE) en el borde norte de la laguna pequeña, a pie de los afloramientos calizos del Muschelkalk y transcurre hacia el SO (Figura 6). Se ha utilizado un espaciado interelectrónico de 15 m, y ha sido medido empleando dos dispositivos: Wenner y Schlumberger. Durante el proceso de datos, se eliminaron los puntos de medida con un error superior al 5%, y en la inversión se ha tenido en cuenta el perfil topográfico, empleado el algoritmo “robust constrain”.

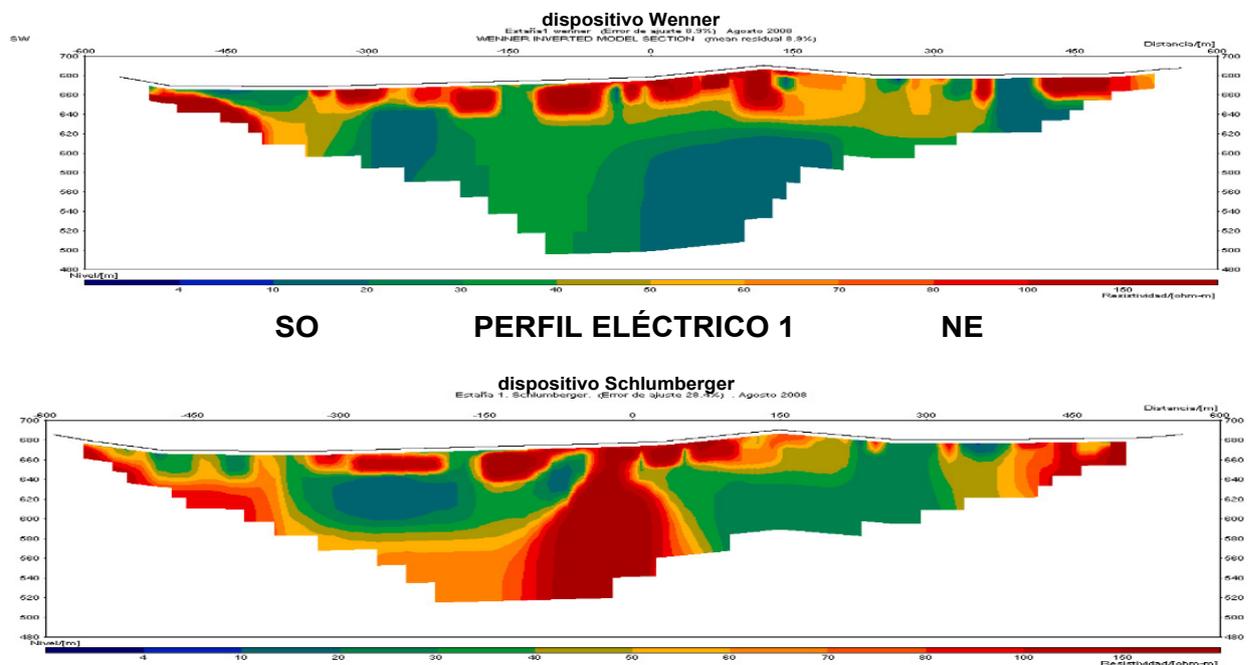


Fig. 7 Secciones geoelectricas del PE 1, con dispositivos Wenner y Schlumberger

Estaña 2 (Figura 8)

Este perfil, de 1200 m de longitud, comienza (extremo E) en las proximidades de la laguna grande de Estaña, y se ha desplegado siguiendo una dirección noreste-suroeste (Figura 6). El espaciado interelectródico ha sido de 15 m, midiéndose con dos dispositivos: Wenner y Schlumberger. Durante el proceso de datos, se han eliminado los puntos de medida con un error superior al 5%, y se ha tenido en cuenta el perfil topográfico en la inversión, empleando el algoritmo “robust constrain”.

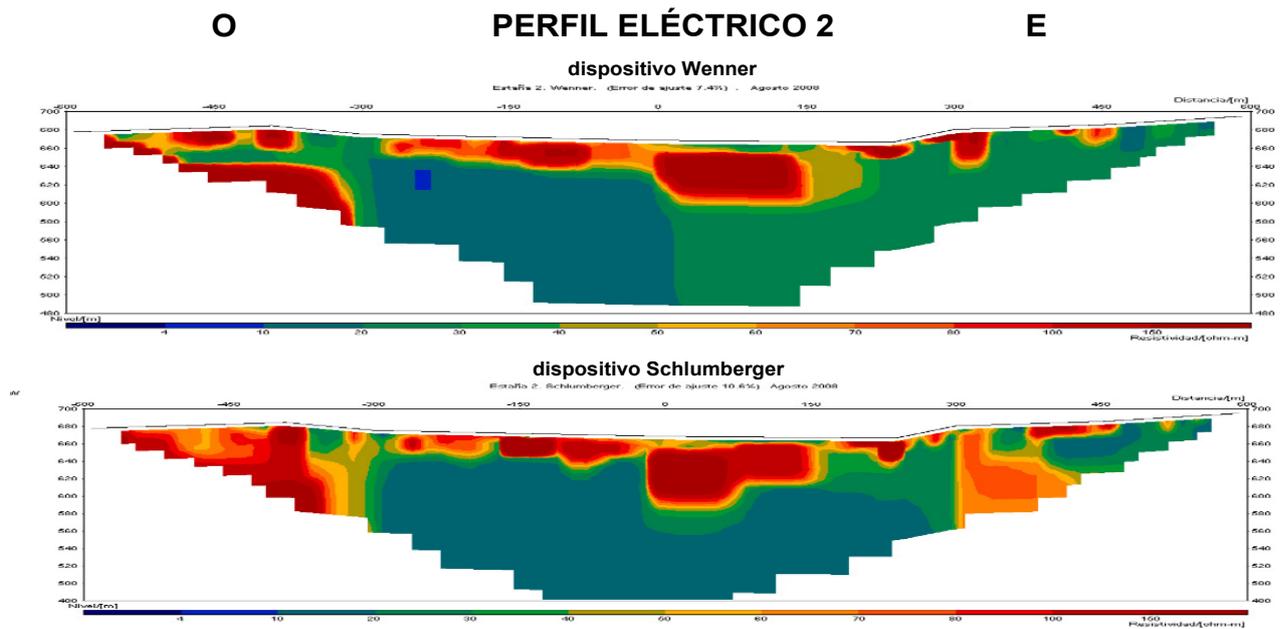


Fig. 8 Secciones geoelectricas del PE 2, con dispositivos Wenner y Schlumberger

Estaña 3 (Figura 9)

Este perfil se ha medido con el objetivo estudiar la zona existente entre las lagunas, empleando un espaciado electródico de 5 m, longitud de 1300 m, y utilizando exclusivamente el dispositivo Wenner. La dirección de medida ha sido de oeste a este (Figura 6). Durante el proceso de datos se han eliminado los puntos de medida con un error superior al 5%; en la inversión se ha tenido en cuenta el perfil topográfico, empleado el algoritmo “robust constrain”. La menor distancia interelectródica da lugar a una penetración inferior al resto de los perfiles.

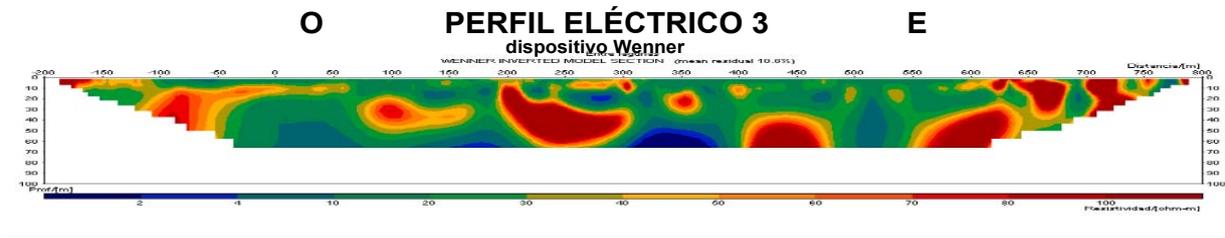


Fig. 9 Sección geoelectrica del PE, con dispositivo Wenner

Estaña 4 (Figura 10)

Este perfil está medido en la zona de Las Ollas (Figura 6). Como en los dos primeros se ha medido utilizando los dispositivos Wenner y Schlumberger, con un espaciado eléctrico de 15 m, dirección sur-norte, y una longitud de 850 m. Durante el proceso de datos se han eliminado los puntos de medida con un error superior al 5%, y se ha tenido en cuenta el perfil topográfico en la inversión, empleado el algoritmo “robust constrain”.

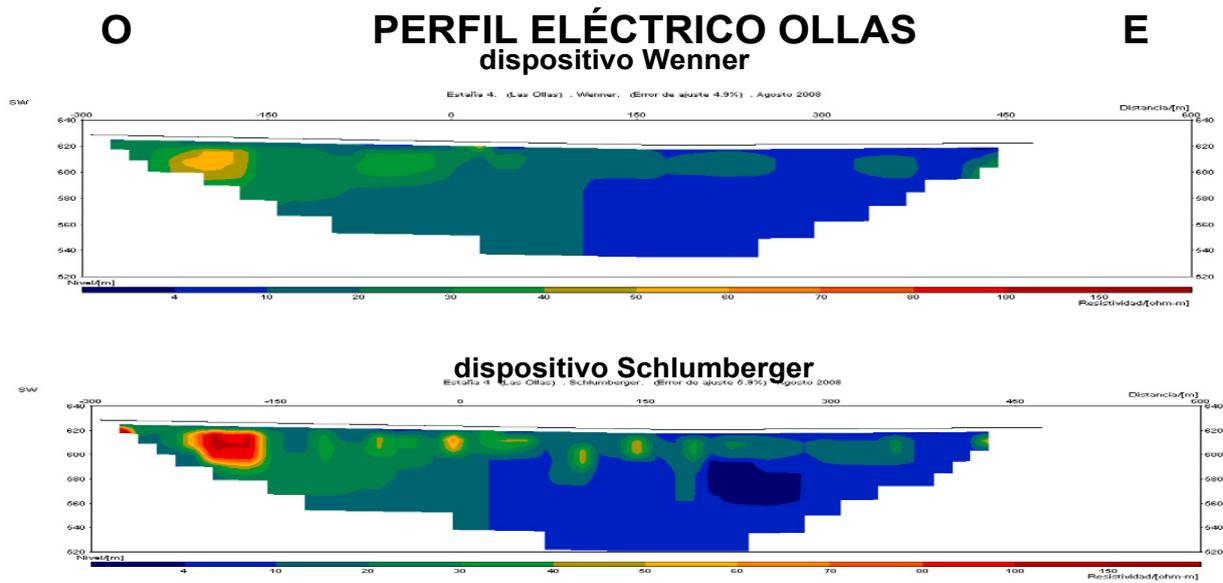


Fig. 10 Secciones geoelectricas del PE 4 (Ollas), con dispositivos Wenner y Schlumberger

4 INTERPRETACIÓN DE LOS PERFILES ELÉCTRICOS

Las secciones geoelectricas han sido representadas en las Figuras 7 a 10 en escala horizontal y vertical homogénea, utilizando para todos los perfiles la misma asignación de color al mismo rango de resistividad. Para la mejor identificación de los rasgos generales de las secciones, los valores de resistividad se han limitado entre mayores de 4 ohm.m e inferiores a 150 ohm.m, asignando colores en intervalos de 10 ohm.m.

Las litologías presentes son:

- calizas y dolomías del Muschelkalk
- lutitas y yesos del Keuper
- calizas arenosas y bioclásticas del Cretácico Superior (y Paleoceno-Eoceno)
- gravas, arcillas y limos aluviales del Holoceno
- relleno de dolomías del Holoceno

Dentro del rango de resistividad considerado en las secciones, la correspondencia genérica más probable con los materiales presentes es la mostrada en la Figura 11. Calizas, dolomías y yesos secos son materiales muy resistivos; las gravas y arenas sin agua pueden ser algo más conductoras, aunque resistivas. Arcillas, limos, lutitas, gravas y arenas con agua y yesos hidratados se comportan como materiales más conductores, con menor resistividad.

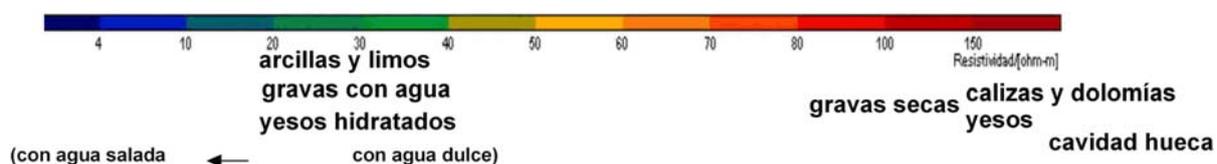


Fig. 11 Clasificación primaria de las rocas en la zona prospectada de acuerdo a su resistividad

Sin embargo, la mezcla de materiales, la fracturación de las calizas, el contenido en agua, la salinidad de la misma, etc., pueden hacer variar estos rangos de resistividad de forma importante, de tal forma que p.e. las calizas podrían tener un comportamiento tan conductor como las gravas. Se ha incluido en la clasificación anterior la posibilidad de existencia de cavidades, que en el caso de estar vacías se comportarán como zonas de muy alta resistividad; su colmatación total o parcial con otros materiales, incluida el agua, puede darlas cualquier valor de resistividad, aunque en cualquier caso lo normal será que destaquen como cuerpos de geometría limitada.

Para realizar una interpretación de las secciones geoelectricas en términos petrológicos se ha escogido en cada caso la obtenida con el tipo de dispositivo que parece reflejar mejor las estructuras geológicas

presumiblemente existentes. El dispositivo Wenner, como se ha dicho anteriormente, es más apropiado para estructuras con cambios de resistividad en la vertical (capas horizontales), mientras que el tipo Schlumberger responde en principio tanto a los cambios laterales (a poca profundidad) como a los que se producen en la vertical (a mayor profundidad).

Otro aspecto a tener en cuenta en la interpretación de las secciones es que, a pesar de haber empleado un algoritmo de inversión que da lugar a los cambios más netos posibles de resistividad (robust constrain), la geometría y límites de las estructuras no queda inequívocamente identificada, aparte de la “distorsión” que representa su imagen geoelectrica respecto de la geometría real. Por tanto, las líneas que se han marcado en la representación de las secciones interpretadas deben ser entendidas como una indicación de situación aproximada de los límites litológicos, y no de su verdadera geometría. Se utilizan los siguientes símbolos:

- C:** calizas cretácicas
- M:** calizas del Muschelkalk
- K:** materiales del Keuper
- Q:** cuaternario

En las secciones interpretadas se ha indicado además la situación de los Sondeos de Resonancia Magnética más próximos, el cruce con otros perfiles, el afloramiento de terrenos cuaternarios (mediante un rectángulo gris) y la situación de las lagunas.

En el **perfil PE1** (Figuras 6 y 12) afloran en su tercio del Sur terrenos aluviales cuaternarios, pasando a materiales del Keuper en su porción central, y terminado en el Norte con Cuaternario de relleno de dolina. Los primeros 20-30 m de la sección tienen en general un carácter resistivo, posiblemente debido a que todas las litologías aflorantes están secas, excepto en el inicio sur del perfil y entorno de la estación 300, donde el terreno es más conductor. Por debajo la resistividad es más baja, lo que interpretamos como terrenos del Keuper hidratados, excepto en el sur donde se presenta un cambio neto de resistividad que se asigna a la presencia de calizas cretácicas, y en el norte, donde la misma resistividad se asigna a calizas triásicas. En la porción central aparece un bloque más resistivo, visible en ambos dispositivos (ver Figura 7), pero mejor caracterizado en el Schlumberger. Dada la magnitud y extensión de este cuerpo, se le ha asignado la posibilidad de que se trate de calizas triásicas.

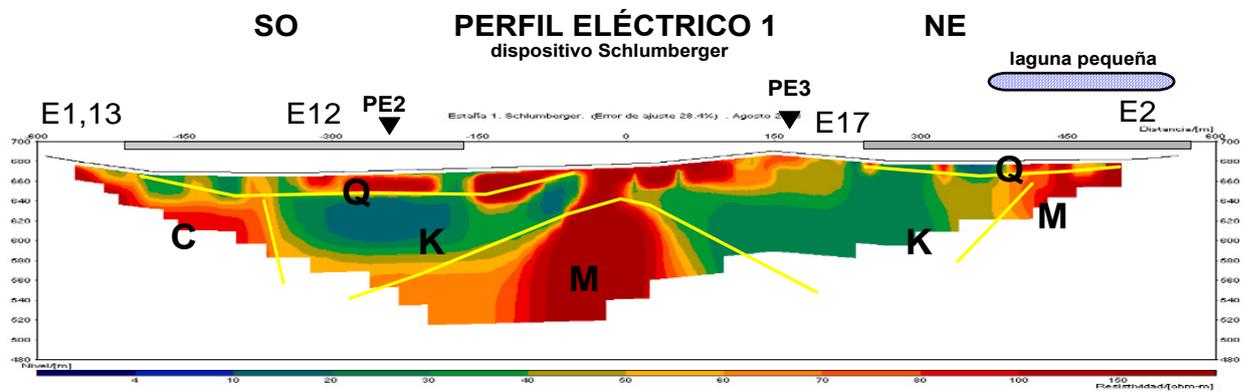


Fig. 12 Interpretación del perfil eléctrico PE1.

Para la interpretación del **perfil PE2** se ha seleccionado el dispositivo Wenner, ya que parece corresponder fundamentalmente a una secuencia de variación de resistividad con la profundidad (Figura 8). Al sur del perfil (Figuras 6 y 13) afloran las calizas cretácicas, pasando a cubierto por Cuaternario hasta más de la mitad del perfil, finalizando en el norte con afloramiento del Keuper. En consecuencia, el resistivo del extremo sur se ha asignado a las calizas cretácicas; los materiales resistivos de la zona bajo el Cuaternario se asignan en principio a dichos materiales, aunque parece excesivo suponer que llegue a haber hasta del orden de 60 m de depósitos, por lo que es posible que parte del mismo sean materiales del Keuper secos. A mayor profundidad, la resistividad se ha asignando a materiales del Keuper (siguiendo el criterio establecido para el Perfil P1), que pueden estar más hidratados en la porción oriental, más conductora. Se ha situado sobre esta misma sección, con un signo de interrogación, la anomalía resistiva que se detecta en la sección obtenida con dispositivo Schlumberger, situada en el extremo occidental. El cruce de los perfiles PE1 y PE2 confirma la distribución de resistividades en esas zonas.

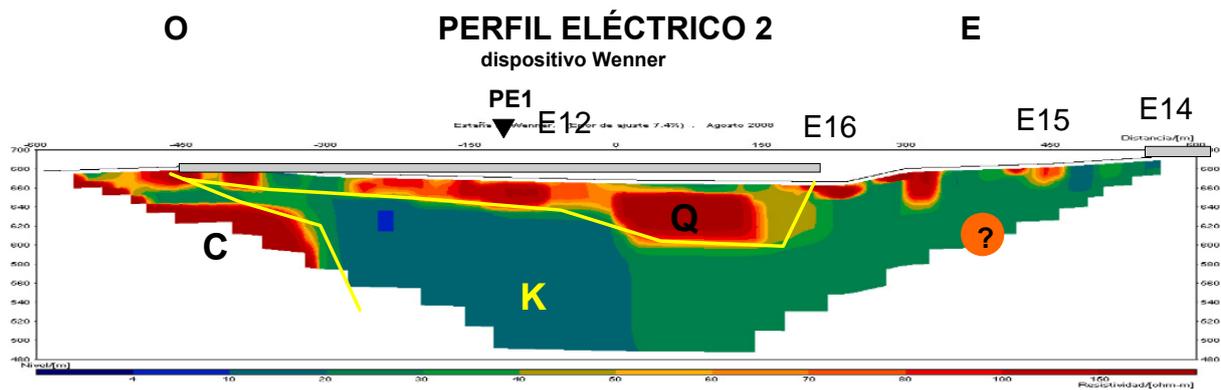


Fig. 13 Interpretación del perfil eléctrico PE2.

El extremo oriental del perfil PE3 (Figuras 6 y 14) se sitúa sobre las calizas del Muschelkalk, que pasan enseguida a estar cubiertas por Cuaternario en una zona tectónicamente muy compleja por la confluencia de varias fallas. El perfil continúa sobre los materiales del Keuper entre las dos lagunas, y en el tercio final está cubierto de nuevo por Cuaternario. Los parámetros de registro de este perfil hacen que su profundidad de investigación sea inferior a los anteriores; además presenta una distribución de resistividad más compleja, con el inconveniente de que el dispositivo Wenner (el único utilizado en este perfil) no resulta el más adecuado para resolver este tipo de situaciones de contrastes laterales de resistividad. Los altos valores de resistividad del extremo oriental se han asignado a materiales calizos triásicos; el cuaternario, en ambos extremos se manifiesta en este perfil más conductor, lo que podría significar con mayor contenido en agua o más arcilloso; el resistivo del extremo occidental puede asignarse a la presencia de calizas triásicas sin que ello suponga la existencia de estructuras extrañas. Sin embargo, los cuerpos resistivos que aparecen en el resto de la sección, suprayacentes a un alto conductor que se detecta bajo las estaciones 0 a 400, son más problemáticos de explicar sin recurrir a hipótesis más aventuradas. Por una parte podrían ser asignados a efectos laterales por influencia de la mayor resistividad de las calizas del Muschelkalk; sin embargo este efecto no es visible en el PE1, que transcurre también sobre un estrecho afloramiento de Keuper rodeado de calizas. La otra hipótesis que puede hacerse es que se trata de cavidades vacías, correspondiendo entonces las zonas altamente conductoras a cavidades con agua.

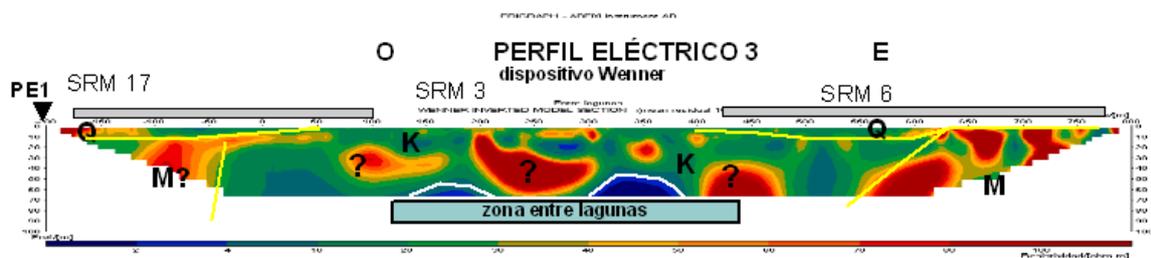


Fig. 14 Interpretación del perfil eléctrico PE3.

El perfil realizado en la zona de las Ollas (Figura 6 y 15) está situado completamente sobre materiales cuaternarios. La mayor resistividad del extremo occidental ha sido asignada a la presencia de calizas cretácicas. En el resto de la sección puede distinguirse una distribución de resistividades por capas horizontales, siendo la primera capa algo más resistiva y con menor potencia en el este, unos 20 m, que en el oeste pasa a más de 50 m. Aunque parece una potencia dudosa para ser materiales cuaternarios de aluvión, se ha hecho esa asignación, para diferenciar los terrenos de los infrayacentes, asignados a materiales del Keuper, que deberían estar muy hidratados para presentar tan baja resistividad.

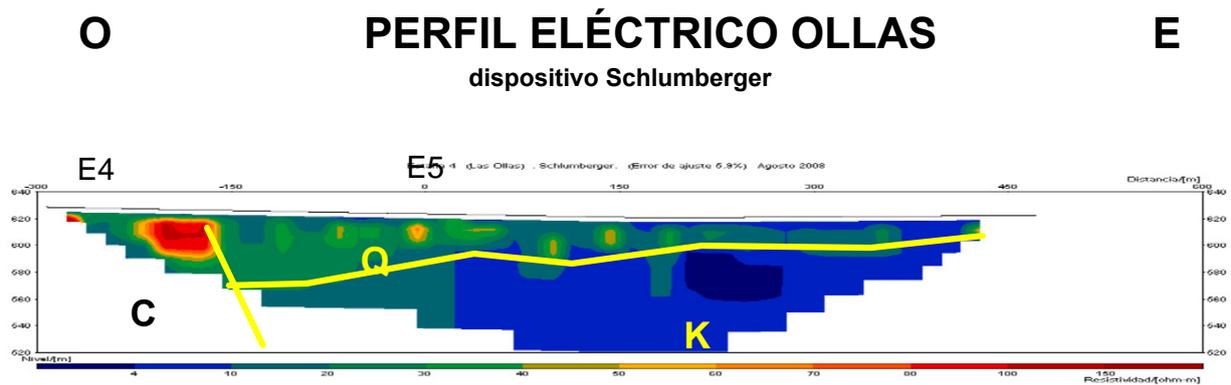


Fig. 15 Interpretación del perfil eléctrico PE O (zona de las Ollas)

5 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO SRM³

Para la mejor comprensión de los datos técnicos de este Informe, así como del alcance de la interpretación efectuada, es preciso conocer algunas cuestiones básicas del método utilizado de Sondeos de Resonancia Magnética. Dicho método es una técnica geofísica específica para su utilización en investigación hidrogeológica, permitiendo la detección desde la superficie de la presencia de agua libre en el subsuelo. La calidad de los resultados obtenidos depende tanto de factores geográficos y geológicos (amplitud e inclinación del campo magnético terrestre, susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica de las rocas), como ambientales (ruidos electromagnéticos naturales y artificiales). Los datos deducidos en la inversión o interpretación de las medidas de campo permiten cuantificar la distribución de agua en función de la profundidad, adjudicando además a cada tramo un valor de un parámetro (Constante de Tiempo de la señal medida) relacionado con el tamaño de los poros de la formación y su permeabilidad.

5.1 Fundamentos teóricos y medición de los SRM

El fundamento de este método estriba en que toda partícula atómica puede variar su estado energético cuando es excitada por un campo magnético de una determinada frecuencia, exclusiva para cada elemento y partícula atómica. Dicha frecuencia depende de la intensidad del campo magnético terrestre y del índice giroscópico de la partícula (constante física para cada elemento, e igual a 0.04258 para los protones de hidrógeno). Cuando cesa la excitación externa, la partícula vuelve a su estado inicial, devolviendo la energía absorbida en forma de un nuevo campo electromagnético de la misma frecuencia; este campo induce en una bobina una f.e.m. con decaimiento exponencial característico, que se denomina señal de resonancia. En los Sondeos de Resonancia Magnética el campo de excitación se introduce desde la superficie del suelo mediante una bobina por la que se hace circular una corriente eléctrica de frecuencia igual a la de precesión del hidrógeno en ese lugar, y que por lo tanto sólo puede ser absorbido por los protones de hidrógeno. La señal de resonancia de este campo sólo puede existir si existen protones de hidrógeno. En la Naturaleza, y dentro de las primeras decenas de metros del subsuelo, es el agua la que contiene prácticamente todo el hidrógeno presente, por lo que la medición de señal SRM es un indicador de la presencia de agua.

Para hacer un SRM, se comienza por medir con un magnetómetro la intensidad de campo magnético terrestre **B**, a fin de calcular la frecuencia de precesión de los protones de hidrógeno en ese sitio, mediante la ecuación $f=0.04258 B$.

³ Una descripción más completa del método SRM puede verse en el monográfico "Magnetic Resonance Sounding. A reality in applied hydrogeophysics", Boletín Geológico y Minero. V 118, nº 3. 2007.

Tras la extensión de un cable, formando un bucle o antena, sobre la superficie del suelo, se hace pasar por él una corriente eléctrica de la frecuencia anteriormente determinada y de gran intensidad I durante un corto tiempo Δt (pulso de excitación de momento $q=I \Delta t$, medido en A ms [Amperio por milisegundo]), creando un campo magnético de la misma frecuencia que la de precesión del hidrógeno, y de dirección distinta a la del campo magnético terrestre. Si existe hidrógeno en el subsuelo, sus protones entrarán en precesión al cortar la corriente emisora, perdiendo su excitación mientras que vuelven a orientarse a su posición de equilibrio inicial. En ello tardan un determinado tiempo, durante el cual el campo magnético generado por los protones induce en el bucle de cable extendido sobre la superficie una corriente eléctrica de la misma frecuencia de precesión. Lo que se mide es la amortiguación de dicho campo eléctrico con el tiempo $E(t)$, que es exponencial (Figura 16, medición).

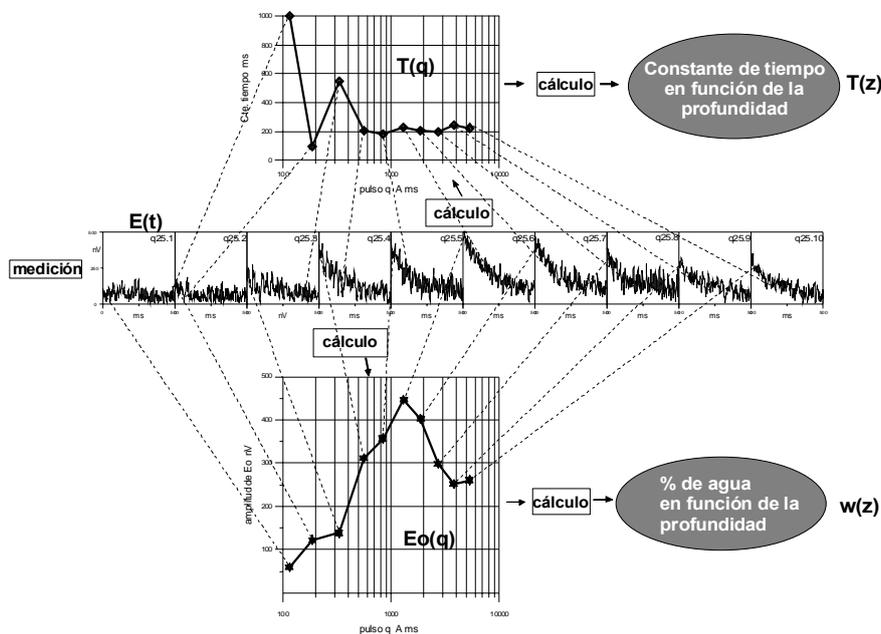


Fig. 16. Esquema del registro y elaboración de los datos de un SRM

La intensidad máxima (inicial o valor extrapolado para $t=0$) E_0 de esta f.e.m. [fuerza electromotriz] inducida depende de la cantidad de protones presentes o cantidad de agua. El tiempo T_2^* (constante de tiempo de decaimiento) que tarda en amortiguarse, depende del tamaño medio de los poros donde está contenida el agua, de tal forma que es pequeño para las arcillas y grande para las gravas sueltas; no obstante, el tiempo de amortiguación también depende de la susceptibilidad magnética de las rocas y de su mineralogía, por lo que no existe una relación universalmente válida. El agua de formación y la contenida en las arcillas dan lugar a constantes de tiempo inferiores a 30 ms, por lo que quedan amortiguadas antes de iniciar la medición de $E(t)$ (se precisa de este tiempo para la conmutación de los circuitos, de tal forma que la antena pase de ser emisora a receptora).

Si antes de que se amortigüe la señal del primer pulso se emite un segundo pulso, es posible evaluar un segundo tiempo de decaimiento, y, en función de las amplitudes máximas de f.e.m. obtenidas para cada pulso y del intervalo de tiempo entre ambos se calcula un tiempo de relajación T_1 que está relacionado, no ya con el tamaño medio de los poros, sino con la permeabilidad de la formación, siendo además menos dependiente de la heterogeneidad del campo magnético terrestre. Desde el punto de vista instrumental, la emisión de este segundo pulso exige disponer de dos unidades de convertidores. En general, el valor de T_1 es igual a $1.5 T_2^*$.

La profundidad de investigación alcanzada depende de la intensidad del pulso o momento magnético emitido, por lo que para obtener información de mayor profundidad, se emite un nuevo pulso con mayor intensidad de corriente, y así sucesivamente (Figura 16). En cualquier caso, las dimensiones de la antena suponen un límite para la penetración, que es de un orden de magnitud igual al diámetro del bucle empleado. La información obtenida proviene además de una extensión de terreno de al menos una vez y media dicho diámetro a partir del punto central de aplicación. Este aspecto integrador de valores promediados de un gran volumen del subsuelo es preciso tenerlo en cuenta a la hora de apreciar los resultados obtenidos con un SRM, ya que la permeabilidad (y la porosidad secundaria) de una formación es un parámetro dependiente de la escala considerada.

El resultado de la medición de un SRM es, por tanto, una colección de n curvas $E(t)$ de decaimiento de la f.e.m. producida por la excitación de cada pulso de momento q emitido, en función del tiempo (en la Figura 16 sólo se presentan 10 de estas curvas, por simplificación; en una secuencia estándar se utilizan 16 pulsos). En el mismo instrumento de medición se efectúa un primer cálculo del valor máximo inicial de cada curva, E_0 , y de la constante de decaimiento T_2^* . Las funciones $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$ son el resultado final del proceso de medición. Si se ha medido con dos pulsos, se obtiene además una función $T_1(q)$.

La morfología de la curva del SRM o curva $E_0(q)$ permite una apreciación cualitativa de la geometría del acuífero, dándose varios modelos en la Figura 17.

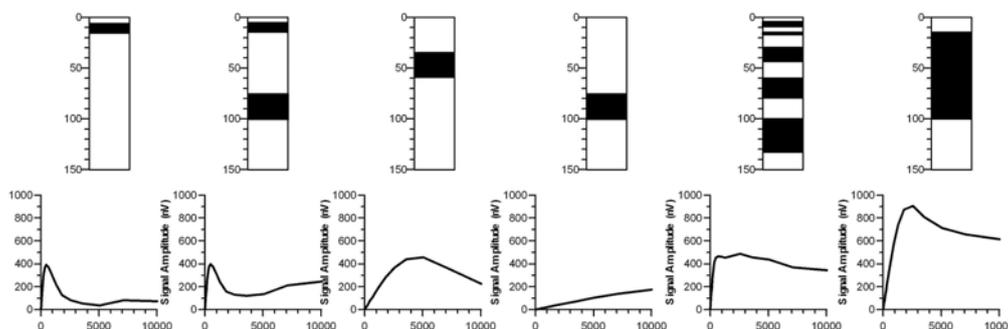


Fig. 17 Diferente morfología de la curva $E_0(q)$ resultado de un SRM, según la profundidad y potencia del acuífero.

La inversión o interpretación consiste en convertir los valores $E_0(\mathbf{q})$ y $T(\mathbf{q})$ en la distribución, en función de la profundidad \mathbf{z} , del tanto por ciento de agua $\mathbf{w}(\mathbf{z})$ (porosidad), de $T_2^*(\mathbf{z})$ y de $T_1(\mathbf{z})$ (indicadores litológicos y de permeabilidad). Los cálculos del proceso de inversión se apoyan en una matriz numérica que tiene en cuenta el modelo geoelectrico del lugar, el tipo de antena utilizado y la inclinación del campo magnético terrestre. El proceso consiste, en síntesis, en calcular la respuesta teórica de un modelo del subsuelo formado por un conjunto de capas horizontales de potencia predeterminada, variándose la porosidad (y/o la constante de tiempo) de las mismas hasta encontrar la mejor coincidencia con los valores realmente medidos. La calidad de la inversión se estimada por un error de ajuste en % de las diferencias entre las medidas y la solución teórica. La interpretación de las mediciones está afectada (como gran parte de los métodos de prospección geofísica) por el principio de equivalencia de resultados, ya que la señal teórica debida a una determinada cantidad de agua es la misma para una capa poco potente con gran contenido en agua por unidad de volumen, que para una capa de mayor potencia pero con menor contenido volumétrico en agua. La determinación de la profundidad de cada capa y la resolución vertical de la función de distribución (potencia de los diversos tramos acuíferos) pueden ser significativamente mejoradas con la utilización de información geométrica "a priori", con lo que se consigue además dotar de mayor fiabilidad a la determinación del contenido en agua de cada tramo.

El bucle o antena extendida sobre la superficie del suelo, además de medir el campo magnético de resonancia, mide también los campos electromagnéticos existentes de otros orígenes, que suponen un ruido externo no deseable. La señal de decaimiento SRM es del orden de decenas o unos pocos centenares de nV [nanoVoltios], mientras que el ruido puede ser de varios miles de nV. A fin de mejorar la relación señal/ruido, la técnica empleada consiste en emitir el mismo pulso varias veces, sumando la señal recibida (stacking). Si el ruido es aleatorio, esta suma tenderá a reducir su influencia. Además, una forma eficaz de disminuir el efecto del ruido es diseñar la antena en forma de doble bucle en "ocho", aunque de esta manera, con la misma longitud de cable, la penetración disminuye, ya que el área eficaz de la antena es menor. Si la frecuencia de precesión está próxima a un armónico de 50 Hz [Hertzios], la eliminación del ruido producido por las líneas e instalaciones eléctricas resulta más problemática.

En un proceso de inversión estándar el terreno queda automáticamente dividido en tantas capas como pulsos de emisión se hayan utilizado en el SRM, hasta una profundidad máxima igual a las dimensiones de la antena utilizada (lado del cuadrado, o de uno de los cuadrados en caso de utilizar una antena en forma de "ocho"). La potencia de cada capa es creciente con la profundidad (iguales en escala logarítmica) y depende de la antena utilizada. En la Figura 18 se indica esta distribución para las antenas de 50 m y 150 m, para 16 pulsos de emisión. En caso de utilizar un número inferior de pulsos la profundidad máxima se mantiene, pero la potencia de cada capa se ajusta convenientemente. Es posible, no obstante, realizar una distribución distinta por selección manual de la misma, para lo que hay que disponer de criterios suficientes en los que apoyar dicha distribución. Al analizar los resultados de la inversión de un SRM, hay que tener por lo tanto en cuenta que la resolución es decreciente con el aumento de la profundidad, y que el contenido en agua para las capas más profundas puede encontrarse

realmente condensado en sólo una parte del tramo obtenido como resultado de la inversión. Por otra parte, en el caso de acuíferos de porosidad secundaria y de acuíferos cársticos, hay que considerar que la amplitud de la señal puede estar disminuida por la especial geometría de su concentración en el subsuelo, y los resultados de inversión en estos casos hay que considerarlos con precaución, ya que la distribución real no es la del modelo de inversión de capas horizontales saturadas, como se indica en el esquema del lado derecho de la Figura 18.

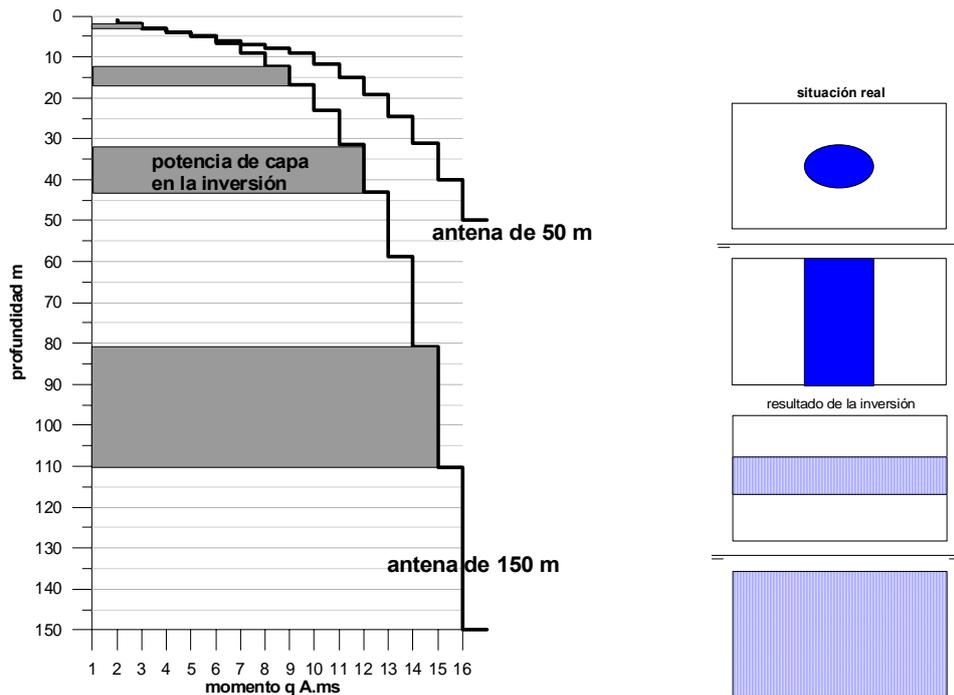


Fig. 18 Izquierda: Resolución (potencia de las capas) obtenida en la inversión de un SRM en función del número de pulsos de emisión y de las dimensiones de la antena. Derecha: la distribución real del agua, en caso de acuíferos cársticos, aunque no corresponde a un modelo de distribución en capas horizontales, será la solución dada en la inversión con modelos 1D.

Otro aspecto a tener en cuenta del proceso de inversión es que para realizar el ajuste entre las mediciones de campo y la respuesta teórica del modelo obtenido es preciso utilizar un parámetro de regularización, que pondera dichas diferencias hasta conseguir un proceso de cálculo convergente. El valor de este parámetro puede tener gran influencia en el aspecto del resultado final: un parámetro de valor cero, dará como resultado una concentración del agua en pocas capas, con variación brusca entre ellas; un parámetro de valor 10000 dará una distribución suavizada del contenido en agua. En cualquier caso, el valor integrado del producto de la potencia de cada capa por su contenido en agua, permanecerá inalterable (principio de equivalencia de las soluciones).

A partir de las mediciones de campo de un SRM, es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, y en particular de la permeabilidad k . La estimación de estos parámetros está fuera de

los objetivos del presente estudio, por lo que únicamente señalaremos que para su determinación se precisa de calibración (para obtener un parámetro o constante denominada C_p) de las medidas SRM con los resultados de un ensayo de bombeo efectuado en el mismo lugar que el SRM.

5.2 Parámetros de inversión de un SRM

El proceso de inversión utilizado con los datos tomados en este Proyecto se ha llevado a cabo con el programa SAMOVAR v 6.2, facilitado por IRIS junto con la instrumentación NUMIS PLUS. Este proceso consta de dos fases:

1/ obtención de los valores E_o , T_2^* y T_1 a partir de las curvas $E(t)$, para cada pulso de emisión de momento q A.ms

2/ conversión de las funciones $E_o(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1(q)$ en $w(z)$, $T_2^*(z)$, $T_1(z)$ y $k(z)$, que es la fase de inversión propiamente dicha, y para lo que es preciso disponer de la matriz con el modelo geoelectrico del terreno.

Los valores obtenidos en la inversión es evidente que dependen de los valores medidos y de los parámetros seleccionados en el proceso de cálculo (Figura 19), y por ello es preciso puntualizar algunas cuestiones:

- finalizada la medición de un SRM en campo, el propio software de adquisición efectúa un cálculo previo de los valores E_o , T_2^* y T_1 a partir de las curvas $E(t)$ (contenidas en los ficheros srm.0q), proporcionando las correspondientes funciones $E_o(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1(q)$ (ficheros con extensión denominada .inp e .in2). Estos valores son brutos, sin aplicar a las medidas más filtros que los propios del proceso analógico de detección síncrona de la señal.
- en la fase de proceso por SAMOVAR se parte de nuevo de las funciones $E(t)$, pero antes de calcular E_o , T_2^* y T_1 se someten a un filtrado digital, con la finalidad de eliminar el ruido en la medida de lo posible y calcular así mejores valores de partida para la inversión. De estos filtros, es forzoso seleccionar uno de estos dos:
 - . PB paso banda, para dejar pasar sólo una banda de frecuencias entorno de la de resonancia
 - . RA running average: produce un suavizado de la curva, promediando los valores en una ventana de n ms. Cuanto mayor es la longitud de la ventana, menores serán los valores de E_o y en ocasiones, puede disminuir el valor de T_2^*

Un filtro opcional es el de Notch, en la banda de 50 Hz, para amortiguar el efecto de la inducción de líneas eléctricas. Cuando la señal es muy débil y su frecuencia es muy próxima a un múltiplo de la de

inducción de líneas (1850, 1900 Hz), la aplicación del filtro Notch puede ser perjudicial, porque elimina también la poca parte de señal que hay, distorsionando aun más los resultados.

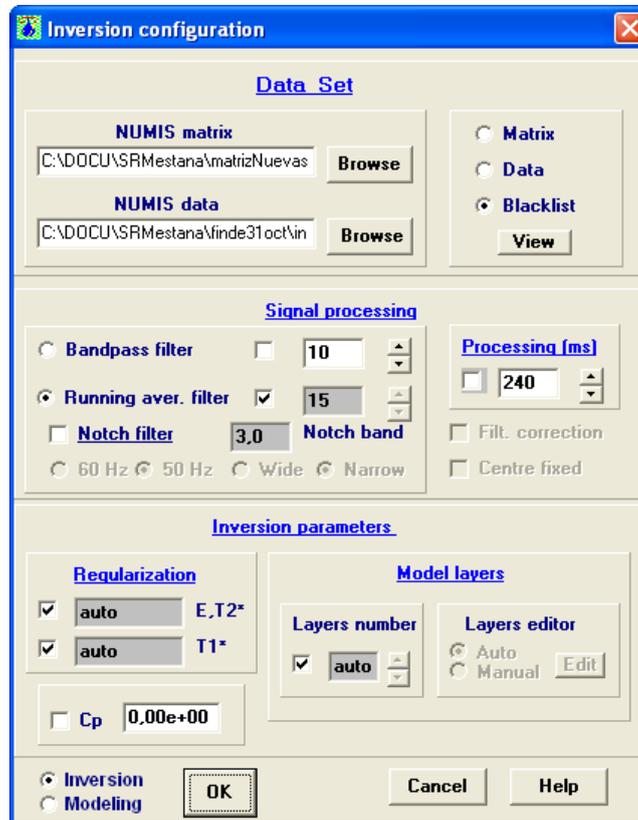


Fig. 19 Consola de entrada de datos y parámetros de proceso en la inversión de un SRM mediante el programa SAMOVAR

Otros parámetros del proceso de inversión son el tiempo seleccionado de la señal $E(t)$, el parámetro o factor de regularización y el número de capas. Ambos afectan al mayor o menor suavizado de la distribución de valores con la profundidad, y pueden dejarse a selección automática por el programa, a falta de criterios firmes en que justificar su valor. Finalmente, si se ha medido T_1 , para calcular la permeabilidad k es preciso introducir un factor de calibración (constante C_p), que por defecto toma el valor 7×10^{-09} . Si este factor no es el correcto, los valores calculados no tienen más significación que su variación relativa (entre capas y/o entre emplazamientos de SRM). El sistema de proceso también permite eliminar alguna de las mediciones E_0 que hayan resultado muy influenciadas por el ruido.

5.3 Presentación de los resultados

Los resultados de la medición e inversión de cada SRM se presentan de forma gráfica y numérica. Los gráficos que se van a emplear en este estudio son los siguientes:

- Curvas $E(t)$ para cada pulso de momento q , con la función exponencial ajustada (en rojo) con escala de amplitudes arbitraria, que no tiene más objeto que visualizar el aspecto de las curvas de campo tras la aplicación de los filtros de proceso.(Figura 20, NUMIS signals).
- Curvas $E_0(q)$ (FID1), junto con el ruido filtrado y sumado (noise) y la curva teórica correspondiente al modelo resultado de la inversión (inv. fit., línea roja). La diferencia entre los valores teóricos del modelo y los realmente medidos, se especifican cómo un tanto por ciento respecto del valor medido, siendo este % indicativo del error o desviación de la inversión. (Figura 20, FID1)
- Curvas $T_2^*(q)$ y/o $T_1(q)$ (Figura 20)

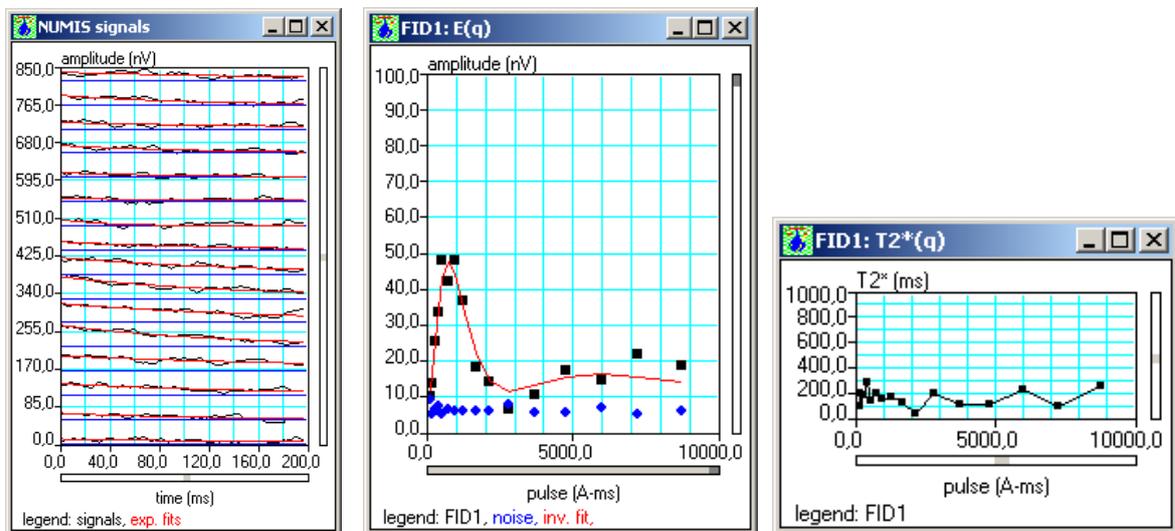


Fig. 20 Curvas $E(t), E_0(q)$ y $T_2^*(q)$

- Curvas de **ruido ambiental** en función del momento q aplicado (Figura 21, ambient noise)
- Curvas de **frecuencia(q)** y **fase(q)**. Dan indicación de la calidad de las mediciones. (Figura 21).

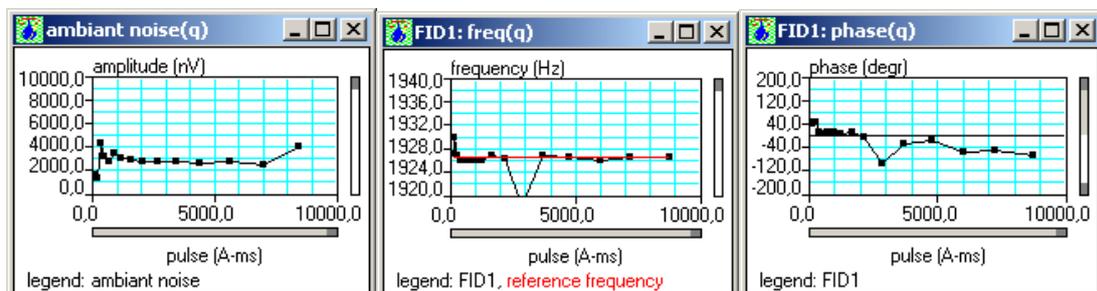


Fig. 21 Funciones de variación del ruido ambiental, frecuencia y fase en función del pulso q

- Gráfico de distribución de valores de porosidad o contenido en agua $w(z)$ en %, con escala superpuesta de color indicativa del valor del parámetro T_1 de cada capa. Si no se ha medido con dos convertidores, sólo se calcula la constante de tiempo T_2^* . (Figura 22)

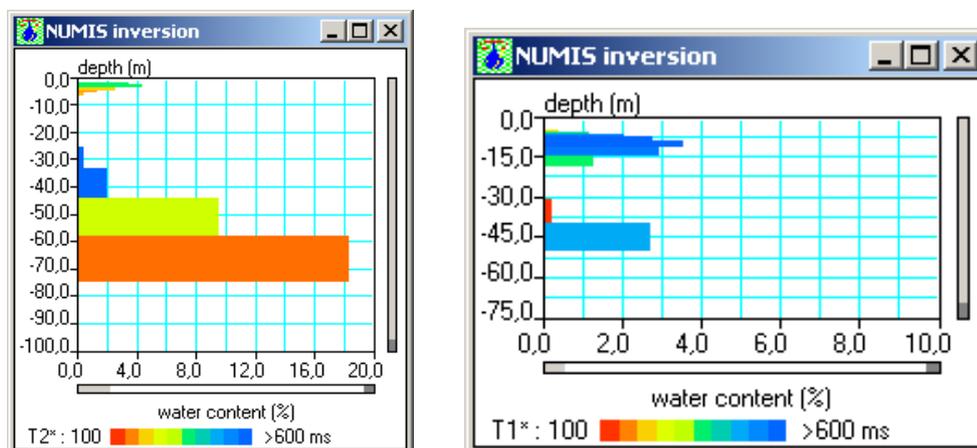


Fig.22 Funciones $w(z)$, ejemplos de resultados de la inversión en dos SRM medidos con uno y dos pulsos.

En la Tabla 3 se indica la relación empírica entre el valor de T_2^* y la litología (tamaño medio de los poros), y a su vez con T_1 , aceptando que este valor es aproximadamente $1.5 T_2^*$. Se indica también la gama de colores de representación que corresponde a cada constante. En el uso de esta información debe tenerse en cuenta que se trata de indicaciones aproximativas, basadas en aspectos generales del fenómeno físico de la resonancia magnética protónica, y no calibradas expresamente para la zona de trabajo.

relación entre valores de las constantes de tiempo, la litología y el color de las escalas de representación				
T2* ms	color T2*	litología	T1 ms	color T1
<30		arcilla	<45	
30-60	Rojo	arenas muy finas, arenas arcillosas	45-90	rojo
60-120	Rojo a naranja	arenas finas	90-180	naranja a naranja claro
120-180	naranja claro	arenas medias	180-270	amarillo
180-300	amarillo-a verde claro	arenas gruesas, arenas con grava	270-450	verde claro a azul
300-600	verde oscuro a azul	gravas	450-900	azul claro a oscuro
>600		agua volumétrica	>900	

Tabla 3. Relación empírica entre el valor de las constantes de tiempo y la litología-granulometría.

La asignación de este parámetro a las rocas con permeabilidad secundaria, como rocas fracturadas, no se ha establecido todavía, siendo objeto de actuales investigaciones.

- Gráficos de distribución de la permeabilidad $k(z)$ m/s y de la **Transmisividad(z) m²/s**, calculadas a través del factor de calibración C_p . La transmisividad se representa acumulada.(Figura 23)

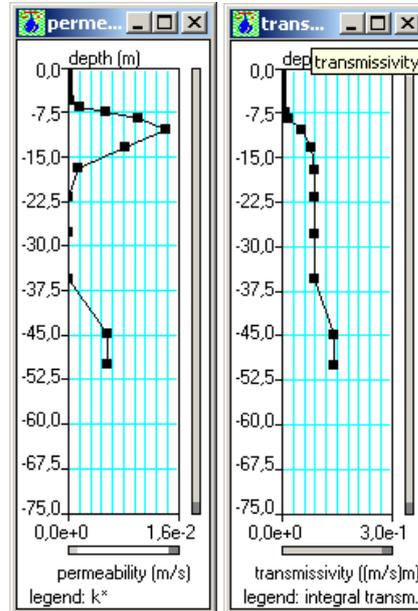


Fig. 23 Distribuciones de permeabilidad y transmisividad

Para esta última determinación se precisa de una fase de calibración en cada zona o para cada tipo de litología y granulometría, para lo que se utilizan los resultados obtenidos en ensayos de bombeo, permitiendo así llegar a determinaciones de permeabilidad, transmisividad y caudal específico con un grado elevado de fiabilidad, según las experiencias hasta ahora obtenidas por el IGME y otros grupos de trabajo en rocas detríticas.

Teniendo en cuenta los principios en los que se basa el método SRM, la consecución de los objetivos planteados en este Proyecto viene condicionada por la realidad finalmente encontrada en la calidad de los datos de campo y por la posibilidad de aplicar modelos de inversión 1D a la geometría realmente existente.

6 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO DE SRM

6.1 Instrumentación utilizada

Para la ejecución de estos trabajos se ha alquilado el equipo NUMIS PLUS de la casa Iris Instruments, de Orleáns (Francia), constando de las siguientes unidades:

NUMIS Plus Generator #008

NUMIS Plus DC/DC Converter #013

NUMIS Plus DC/DC Converter #014

NUMIS Plus Tuning Capacitor #015

NUMIS Plus Tuning Capacitor #019

Noise analyser #003

Laboratory coil s/n 006/02-15-97

Tester for SUMID DC/DC converter

PC Dell con software de adquisición

6 Rollos de cable de 10 mm² (antena)

4 Baterías de 12V / 65Ah

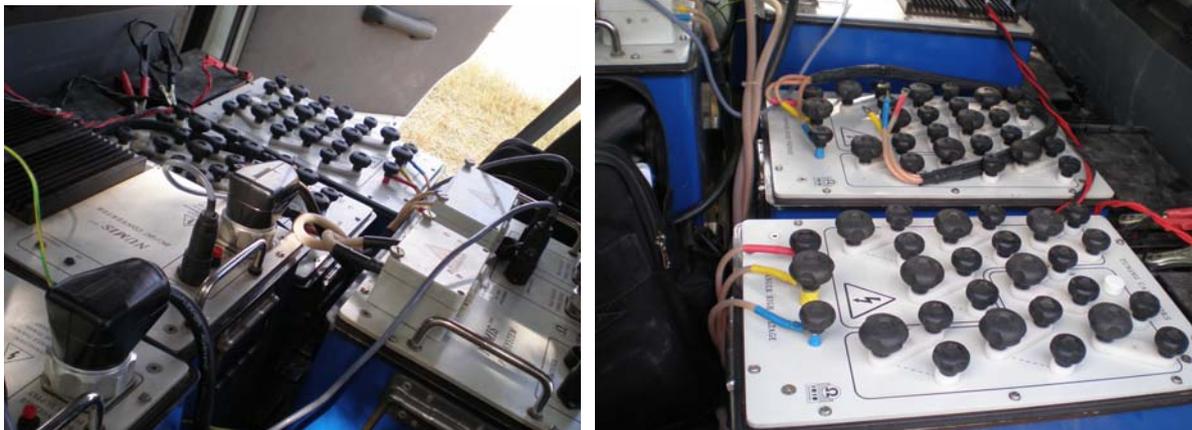
1 Baterías de 12V / 38Ah para el PC

Material complementario: cables de unión de instrumentación, cargadores de baterías, conectores de cables de antena, etc.

Se ha dispuesto de tres vehículos de campo, necesarios para el transporte e instalación de la instrumentación y para extender los cables sobre el terreno, así como del magnetómetro de protones Geometrics 816 propiedad del IGME.



Instrumentación NUMIS PLUS instalada en el interior de un vehículo de campo



Instrumentación NUMIS PLUS instalada en el interior de un vehículo de campo

6.2 Equipo de trabajo

Los trabajos de campo se han efectuado desde el día 12 al día 22 de agosto de 2008, con residencia en Benabarre del personal del IGME desplazado desde Madrid. El equipo de trabajo en campo ha estado formado por:

Juan Luis Plata Torres, investigador de Geofísica del IGME, responsable del equipo

Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla, investigador de Geofísica del IGME

José María Llorente, operador de geofísica, GPS y extensión de las antenas.

Isabel Reguero, auxiliar de investigación.

A través de la oficina del IGME en Zaragoza se ha contado con la colaboración para los trabajos de campo de: Cristina Pérez Bielsa, Carlota Oliván, Victoria Lafuente, Teresa Naudín, Margarita Chueca, Francesca Colucci, Javier Ramajo, Jesús Causape y Javier Lambán. Durante la realización de los trabajos se recibieron varias visitas de diversos técnicos e investigadores interesados en conocer el método utilizado: Mario Morellón (IPE), Leticia Gaspar (CSIC), Manuel López Vicente (CSIC), Raúl Velasco (DGA) y Antonio Pérez (UNIZAR).

6.3 Selección de los emplazamientos de medición de los SRM

El criterio seguido para la selección de emplazamiento de las mediciones ha sido bordear las lagunas y explorar la zona entre las mismas y los afloramientos de calizas cretácicas del anticlinal de Estopiñán. Por otra parte, se ha tratado de aproximar las mediciones a los Perfiles Eléctricos previamente efectuados en la zona. Los sitios finalmente utilizados (Figura 24 a 27) lo han sido en función de la existencia del área suficiente para la extensión de la antena, lo que ha motivado que dicha área sea variable, habiéndose finalmente utilizado bucles de 50, 75, 100 y 150 m, así como algunas

configuraciones en forma de “ocho” en lugares especialmente afectados por ruidos electromagnéticos externos.

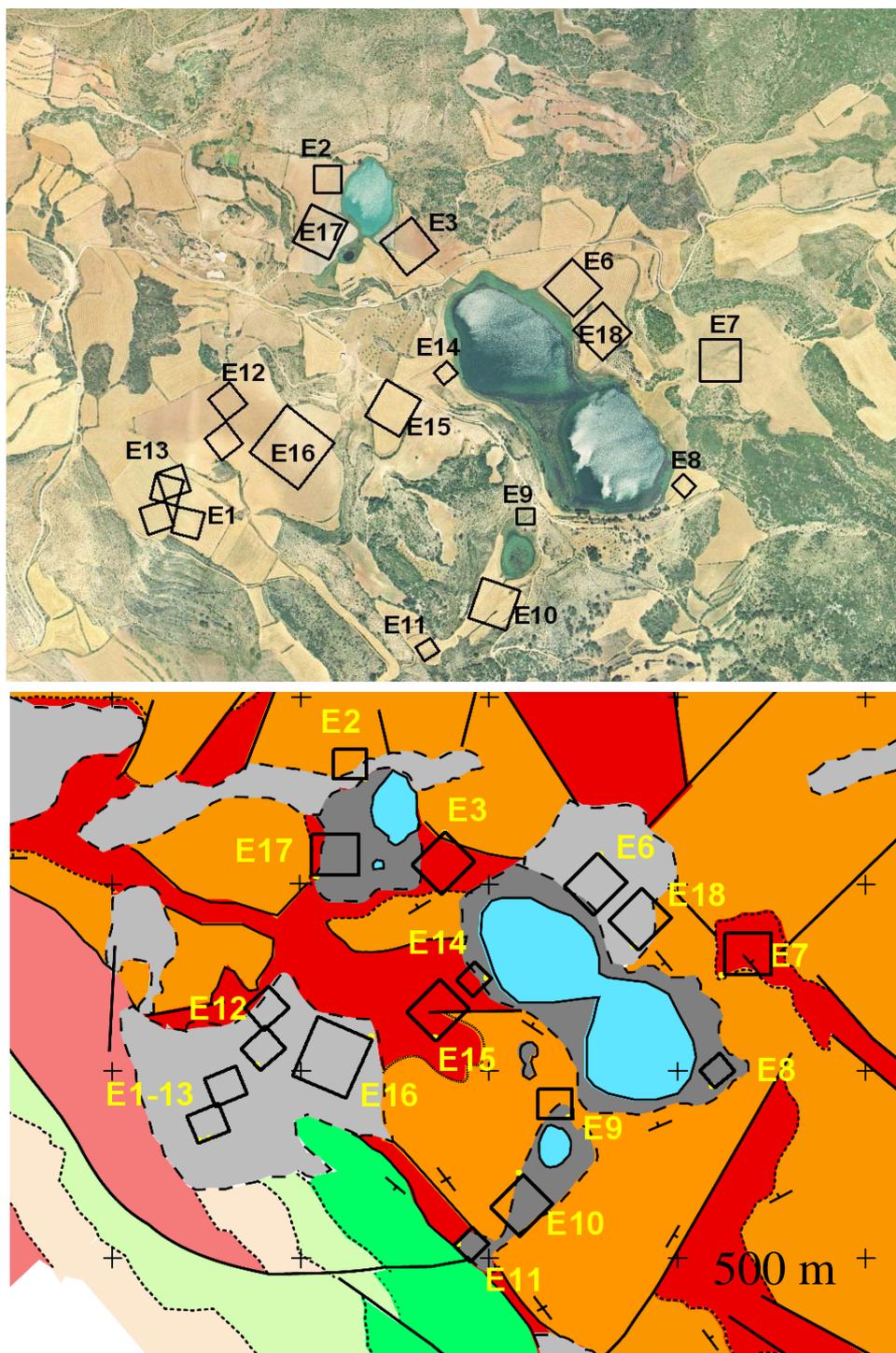


Fig. 24 Emplazamiento y extensión de las antenas de los SRM medidos entorno de las Lagunas de Estaña (Huesca), sobre fotografía aérea y mapa geológico. La dimensión de las antenas se ha dibujado a la escala de cada documento. El lado del cuadrado de las antenas es: 150 m para E16, 100 m para E6, 75 m para E2 y 50 m para E8 (ver tabla 4). La distancia entre las cruces de referencia del mapa geológico es de 500 m. La correspondiente leyenda puede consultarse en la Figura 6.

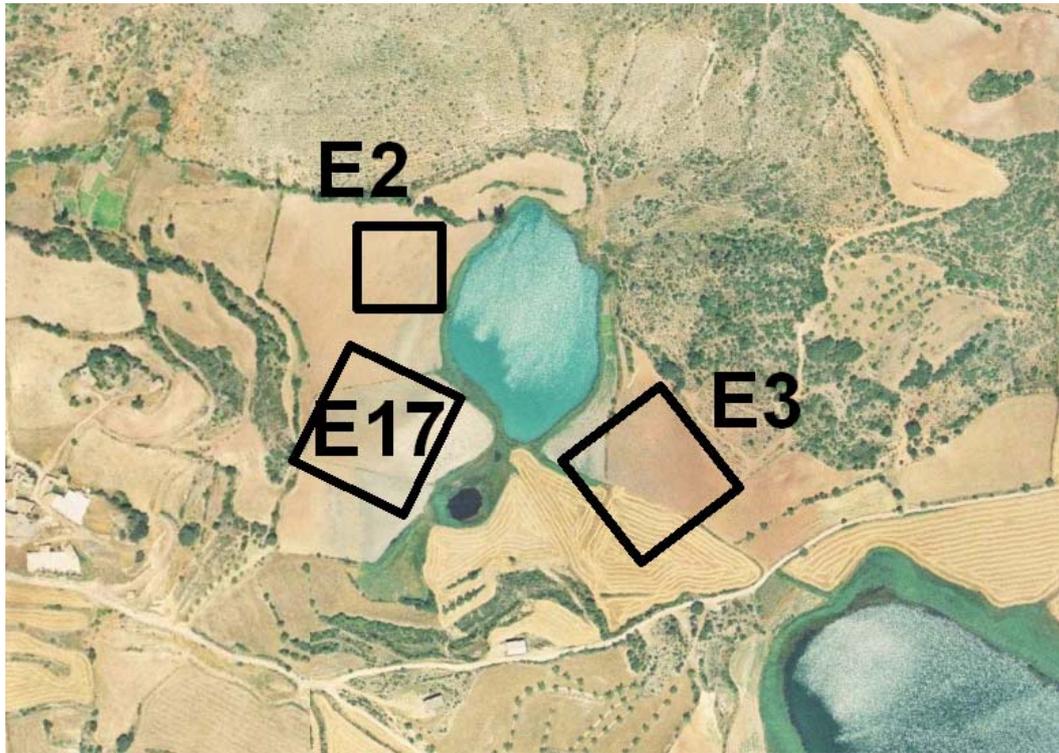


Fig. 25 Detalle de emplazamientos entorno de la laguna pequeña

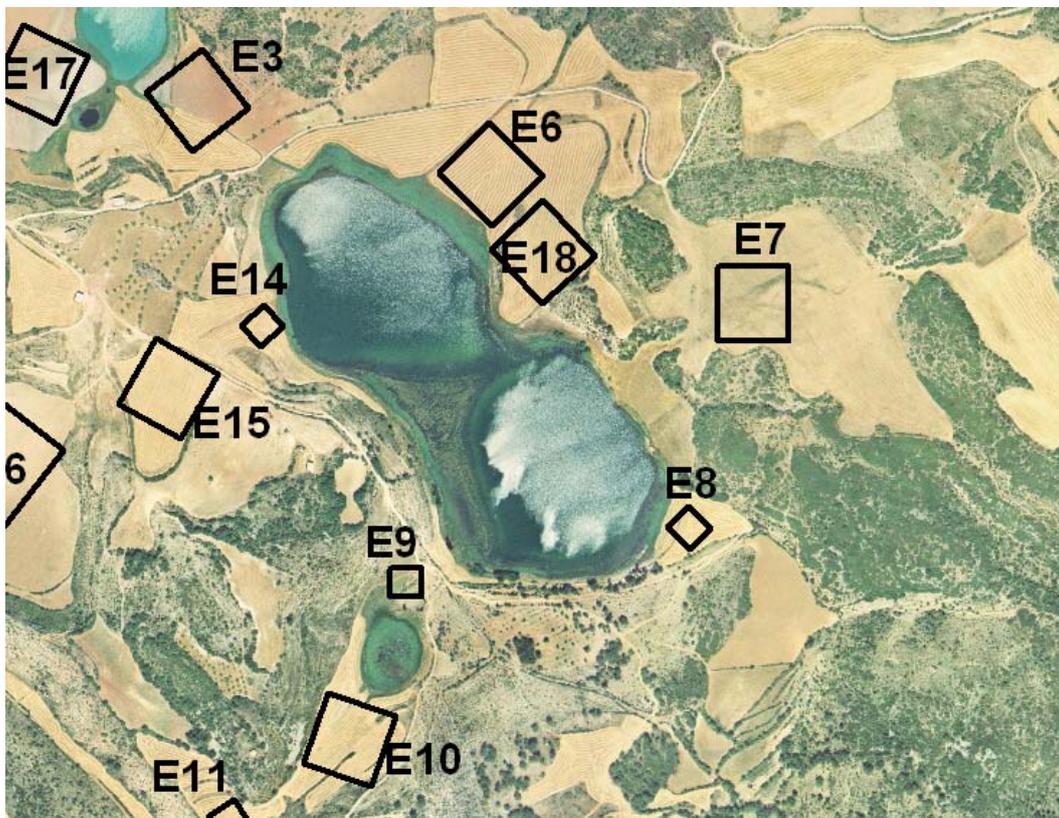


Fig. 26 Detalle de emplazamientos entorno de la laguna grande.

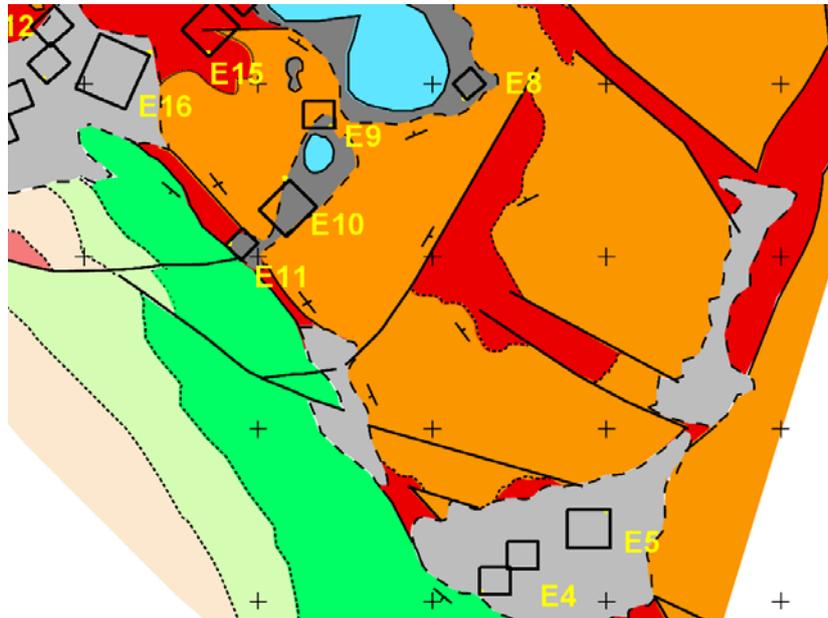


Fig. 27 Emplazamiento y extensión de antenas en los SRM medidos en la zona de las Ollas (E4 y E5)

En cada lugar de medición se han tomado las coordenadas (una de las esquinas de la antena) mediante GPS, situando la orientación del bucle sobre fotografía aérea. Tras la selección del emplazamiento adecuado se ha procedido a la medición del ruido electromagnético existente, para decidir el tipo de antena a utilizar (un solo cuadrado, o dos cuadrados formando un “ocho”); tras la extensión del cable de antena según el espacio disponible, se ha medido el campo magnético con un magnetómetro de protones Geometrics G-816 en varios puntos del interior del área de la antena. Seguidamente se ha procedido a las mediciones necesarias para evaluar los parámetros de registro a adoptar en cada lugar.

6.4 Parámetros de adquisición e incidencias de medición

Como parámetros generales se han seleccionado los siguientes:

- Tiempo de registro: 240 ms, tanto para medición inicial del ruido ambiente como para el registro de la señal.
- Utilización de dos pulsos de 40 ms, con tiempo de retraso de 0 ms.
- Aplicación de filtro High-cut de forma estándar, y Notch cuando se ha requerido por la presencia de líneas eléctricas.
- Emisión de 16 pulsos, con stacking base de 64, a ampliar o reducir según ruido.

Las incidencias de medición han sido las siguientes:

SRM E1: sondeo situado a unos 400-500 m de una línea eléctrica. Se comienza extendiendo un bucle cuadrado de 150 m de lado, midiéndose un ruido ambiental de 29000 nV. Se cambia a bucle cuadrado de 100 m, bajando el ruido a 11800 nV, sin apreciarse la existencia de señal. Se pasa a un bucle en ocho de 75 m, con longitud máxima paralela a la dirección de la línea eléctrica. El ruido, variable, baja a 330-818 nV. Las frecuencias de respuesta varían entre 1948 y 1956 Hz, para 1934 Hz teóricos. El sistema rechaza muchas lecturas a partir de $q=8$ por superación del umbral de ruido, por lo que, a fin de acortar el tiempo de medición, se procede a bajar el stacking inicial de 64 a 32 para $q=11$; $s=24$ para $q=12$; $s=12$ para $q=13$. Se aprecia una posible señal para $q=12$. Se interrumpe el sondeo SRM para $q=14$, tras haber empleado más de 9 horas en este lugar.

Los resultados del fichero de campo (*.inp) son los siguientes:

Si te: est1b ocho 75 16q 64s
 Lo op: 4 - 75.0 Dat e: 8/1 2/200 8 Time: 12:00:00 AM

N	q	e	t2	noise	Udc	freq	phase
	4 14	4515.	7				
0	0	0.00	0	0.0	0	0.00	0
1	22	19.32	133	818.1	9	1947.65	323
2	42	9.43	185	519.9	9	1925.82	6
3	96	10.01	1000	396.4	12	1930.68	8
4	169	6.25	1000	325.3	16	1934.08	349
5	274	7.52	1000	462.0	23	1946.35	113
6	395	12.09	1000	937.8	30	1936.18	92
7	544	21.14	207	538.1	39	1948.56	97
8	742	17.45	1000	373.2	51	1949.49	317
9	1011	32.26	1000	330.8	66	1948.92	193
10	1318	24.66	1000	604.8	86	1949.03	113
11	1680	13.32	220	412.9	113	1928.36	341
12	2055	16.65	1000	485.1	146	1949.11	350
13	2575	22.12	1000	946.0	191	1947.33	355
14	3148	78.90	1000	525.4	250	1948.80	211

En consecuencia, cabe deducir que en este emplazamiento no existe agua dentro del rango de penetración.

SRM E2: medición sin incidencias. Se aprecian excelentes curvas $e(t)$ en el monitor.

SRM E3: en el registro para $q=13$ (fichero Sounding001) el sistema se detiene con mensaje de error en el DC/DC, que no está indicado en el manual. Tras varios intentos de verificación se habla con el personal técnico IRIS Instruments en Orleáns (Francia), que sugiere realizar los tests específicos de las unidades DC/DC y generador (bobina auxiliar). Se comprueba el buen funcionamiento de estos elementos y se cambia la caja de condensadores. Se prosigue el registro (fichero Sounding002),

registrando los pulsos q=13, 14 y 15, fallando de nuevo el sistema para q=16, dando una multitud de mensajes de error: “door open”, “Missing loop”, “DC/DC measure error”, “ E communications trouble”, “conexión USB”. Se aumenta un condensador en la unidad C1, se cierra el proceso del software de adquisición Prodiviner y se vuelve a encender, registrándose entonces correctamente el pulso q=16 (fichero Sounding003). Puede ser que los problemas fueran debidos a un fallo en la sincronización para amplitudes de pulso superiores a 4000-5000 A.ms. En consecuencia se decide utilizar la configuración de condensadores siguiendo las instrucciones del manual antiguo en vez de las indicadas en el programa Prodiviner. Los registros *.inp obtenidos son los siguientes:

Sounding001: valen hasta q=12

Site: est3 cuadro 10 016q 64s
 Location: op: 2 - 100.0 Date: 8/ 13/20 08 Time: 12:00:00 AM

N	q	e	t2	noise	Udc	freq	phase
	2 13	5070.8					
0	0	0.00	0	0.0	0	0.00	0
1	70	8.77	1000	194.4	8	1933.97	31
2	122	17.66	331	187.0	10	1933.47	357
3	189	29.51	178	191.3	14	1933.71	25
4	282	31.13	540	133.1	17	1933.85	34
5	440	44.96	273	115.8	23	1933.76	31
6	614	43.40	373	124.4	30	1933.75	31
7	835	39.84	441	135.6	40	1933.88	40
8	1125	40.82	277	143.0	52	1933.64	41
9	1508	50.84	151	122.6	68	1933.57	39
10	1995	42.95	243	131.2	88	1933.78	45
11	2652	32.32	322	132.5	115	1933.87	44
12	3477	38.33	228	144.2	149	1934.24	45
13	4517	37.23	295	134.3	194	1934.54	60

Sounding002: efectuado sólo para q=13,14 y 15

13	4601	42.22	219	129.1	194	1934.43	25
14	5733	43.46	281	109.5	253	1934.52	26
15	7061	46.65	346	130.9	330	1934.31	6

Sounding003: efectuado sólo para q=16

16	10300	49.83	433	168.8	429	19	34.62	29
----	-------	-------	-----	-------	-----	----	-------	----

Los correspondientes archivos NumisData xx válidos de cada registro se han combinado en el sondeo “composición”, que es el utilizado para la inversión, junto con los correspondientes ficheros dataxx:

Site: est3 cuadra do 10 016q 64s
 Loop: 2 - 100.0 Date: 8/ 13/20 08 Time: 12:00:00 AM

N	q	e	t2	noise	Udc	freq	phase
0	2 13	5070.8					
0	0	0.00	0	0.0	0	0.00	0
1	70	8.77	1000	194.4	8	1933.97	31
2	122	17.66	331	187.0	10	1933.47	357
3	189	29.51	178	191.3	14	1933.71	25
4	282	31.13	540	133.1	17	1933.85	34
5	440	44.96	273	115.8	23	1933.76	31
6	614	43.40	373	124.4	30	1933.75	31
7	835	39.84	441	135.6	40	1933.88	40
8	1125	40.82	277	143.0	52	1933.64	41
9	1508	50.84	151	122.6	68	1933.57	39
10	1995	42.95	243	131.2	88	1933.78	45
11	2652	32.32	322	132.5	115	1933.87	44
12	3477	38.33	228	144.2	149	1934.24	45
13	4601	42.22	219	129.1	194	1934.43	25
14	5733	43.46	281	109.5	253	1934.52	26
15	7061	46.65	346	130.9	330	1934.31	6
16	10300	49.83	433	168.8	429	1934.62	29

SRM E4: situado en la zona de Ollas, a unos 500-800 m de una mina de Ofitas (diabasas), con campo magnético unas 150 nT inferior al resto de las zonas medidas (frecuencia 7 Hz inferior). El campo magnético presenta un aumento gradual hacia la situación de las ofitas de unas 70 nT (equivalente a una diferencia en frecuencia de 4 Hz). Se adopta el valor medio de 45270 nT (1927.5 Hz), obteniéndose frecuencias de respuesta en la gama 1927 a 1921 Hz, con el siguiente archivo *.inp:

```
Site: Test04 est4 8x75 5q 6s
Loop: 4 - 75.0 Date: 8/14/2008 Time: 12:00:00 AM
N q e t2 noise Udc freq phase
4 16 4622.2
0 0 0.00 0 0.0 0 0.00 0
1 96 193.81 57 215.6 8 1924.46 19
2 152 270.71 62 224.6 10 1926.31 48
3 242 352.57 59 194.7 14 1926.66 53
4 356 417.73 58 208.8 17 1926.02 48
5 504 445.74 54 229.1 23 1925.16 38
6 663 434.68 51 211.1 29 1924.84 36
7 918 395.28 49 225.7 37 1925.05 42
8 1226 312.82 51 257.3 48 1924.98 46
9 1622 272.64 41 227.4 63 1924.84 50
10 2106 195.20 41 281.6 81 1923.57 41
11 2699 111.65 53 351.6 103 1923.48 50
12 2878 88.90 49 238.7 111 1921.59 32
13 4305 39.13 1000 228.0 174 1927.05 288
14 6001 70.46 172 278.2 245 1927.09 312
15 7672 97.51 119 270.3 319 1926.33 308
16 9284 59.21 109 250.6 416 1926.16 271
```

La configuración de condensadores según Prodiviner es de $C1=2$ $C2=1$, con lo que se consiguen 6500 A.ms para $q=16$; se modifica a $C1=3$ $C2=2$ (según tablas de manual antiguo), pasando a emitir 9284 A.ms. El bajo nivel de ruido (215 nV) y la excelente calidad de la señal permite efectuar el SRM con stacking 32.). Sondeo con excelentes curvas $e(t)$, de muy rápido decaimiento

SRM E5: en la misma zona que el SRM E4, se aprovechan las buenas condiciones para efectuarlo con una antena cuadrada de 100 m de lado. Sin incidencias.

SRM E6: iniciado con stacking de 44, se pasa a 64 para $q=15$ y 16, debido a la presencia de un tractor a unos 200 m, que aumenta el nivel de ruido.

SRM E7: no se aprecia señal en el monitor para $q= 8, 9, 10, 14$ y 15. Sin embargo, en la curva $E_0(q)$ se aprecia un importante aumento de E_0 ; se repiten (fichero Sounding 002) los momentos 13 a 16 con stacking de 96 para asegurar la existencia o no de señal del agua (Figura 28), que sí parece existir, aunque muy contaminada por un ruido armónico.

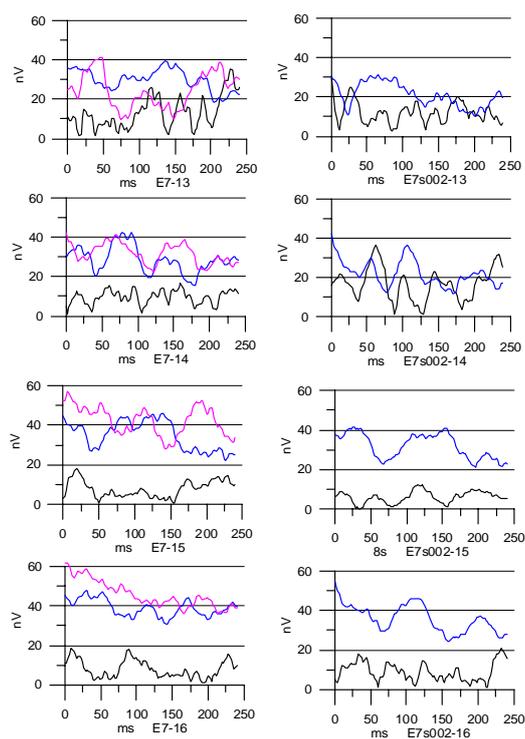


Fig. 28 Curvas de campo $e(t)$ de verificación del SRM 7. Izquierda registro 001; derecha repetición 002. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso.

SRM E8: al utilizar un bucle de menores dimensiones (cuadrado de 50 m), se consigue emitir 15120 A.ms para $q=16$ (para cuadrado de 100 m se emite unos 9000 A.ms). Sin incidencias.

SRM E9: sin incidencias.

SRM E10: se produce un gran número de rechazos en la lectura, lo que aumenta en 50 minutos el tiempo de registro sobre la duración normal (con selección de rechazo para valores superiores a 700 nV). El resultado final es de un nivel de señal máxima de 200 nV con nivel de ruido de 300 nV.

SRM E11: no se activa el selector de rechazo de lecturas. No se aprecia existencia de señal en las curvas del monitor, excepto quizá para $q=4, 5, 6, 12$ y 15 aunque con mucho ruido. Utilizando un stacking inicial de 72 se producen más de 30 rechazos por pulso, siendo total el rechazo para $q=14$, dando error de "Overflow". Se restaura el registro, pasando a $s=54$ para $q=14$, $s=42$ para $q=15$ y $s=34$ para $q=16$. Mientras que el ruido se amortigua claramente con el stacking, la señal+ruido conserva su forma armónica (periodo de unos 50 ms, 20 Hz). Finalizado el registro se efectuó una prueba aumentando en número de condensadores, a pesar de lo cual no disminuyó el número de rechazos.

SRM E12: se utiliza la configuración de condensadores $C1=3$ $C2=2$ (según Manual), en vez de la $C1=2$ $C2=2$ (según Prodiviner). Se sigue observando un ruido con aspecto de señal oscilatoria armónica de 20 Hz. Al finalizar el registro se efectúa el test Sounding002 para $q=16$ con filtro Notch, donde se aprecia una mejora evidente en la eliminación de este tipo de interferencia (Figura 29), que se aplicará en el próximo emplazamiento, situado en este mismo lugar.

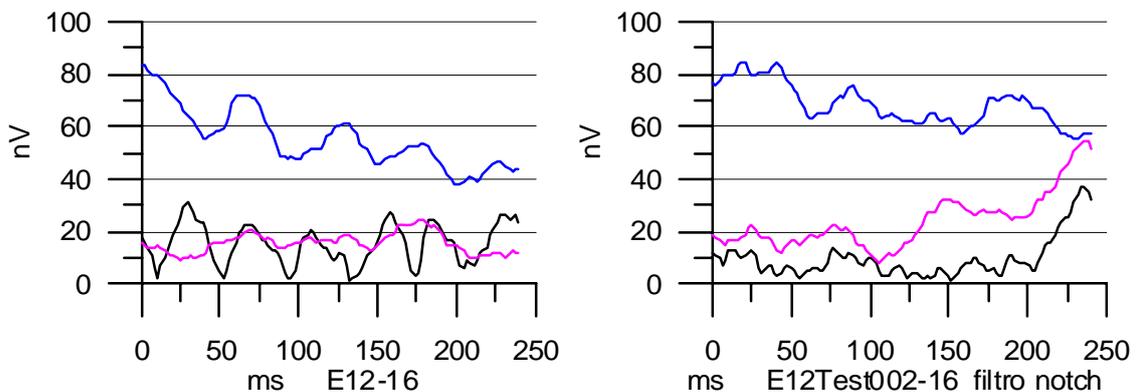


Fig. 29 Curvas de campo $e(t)$ sin y con aplicación del filtro Notch, para $q=16$ del SRM E12. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso.

SRM E13: sigue utilizándose la configuración de condensadores según tablas antiguas. La frecuencia de respuesta es de 1949 Hz, para una teórica de 1933.4 Hz. Se emite con 1949 Hz en el registro test Sounding 002. No se aprecia señal, por lo que el registro se efectúa finalmente con 1933 Hz, aplicando un filtro Notch wide, leyendo sólo T2, para doce pulsos y stacking de 96, reduciéndolo a 64 para $q=16$. No se aprecia señal del agua en el monitor.

SRM E14: el ruido existente obliga a tener que utilizar como antena un bucle en ocho de 50 m, siendo necesario entonces emplear las dos unidades de condensadores, con la configuración C1=2 C2=1 (según Manual), en vez de la C1=1 C2=1 (según Prodiviner), además de todos los condensadores de la segunda unidad. Sin incidencias.

SRM E15: se aplica el filtro Notch wide y stacking de 48 para $q=1$, pasando luego a 64. Para $q=3$ se aprecia señal del agua en el monitor, de poca amplitud y confundida con el ruido.

SRM E16: para $q=1$ y $q=2$ se aplica el filtro Notch wide y stacking de 64, pasando luego a 96. Al utilizar un bucle cuadrado de 150 m se utiliza la configuración de condensadores C1=2 C2=2 (según Manual C1=3 C2=2, y según Prodiviner C1=2 C2=1). Se aprecia buena señal, aunque los tiempos de decaimiento calculados en tiempo real parecen demasiado elevados: a partir de unos 150 ms la curva $e(t)$ aparece muy afectada por el ruido, produciéndose subidas que falsean el tiempo de decaimiento ajustado a los 240 ms.

SRM E17: sin incidencias.

SRM E18: buena señal $e(t)$. El rechazo de lecturas es del orden del 10%, pasando hasta el 25 % para $q=16$.

Todos los ficheros con los datos originalmente registrados están recogidos en el Anexo digital III.



Medición del campo magnético en el interior de un bucle.



Durante el registro de un SRM.



Extensión del cable de antena



Vista de la laguna grande desde el emplazamiento de un SRM

En la Tabla 4 se resumen los parámetros de registro empleados en cada SRM, tiempos, y ruido ambiental.

	registro en campo											
SRM	día	tt h,m	tr h,m	antena	f Hz	B nT	dB nT	filtro reg	Td	q	s	ruido nV
E1b	12/08/2008	9	2,35	ocho-75	1933,8	45405	4	high cut	T1	14	64-32	818
E2	13/08/2008	3,1	2,15	cua-75	1935	45435	9	high cut	T1	16	64	231
E3	13/08/2008	7	6	cua-100	1935	45422	10	high cut	T1	16	64	125
E4	14/08/2008	4	0,45	ocho-75	1927,5	45270	73	high cut	T1	16	32	215
E5	14/08/2008	2	0,45	cua-100	1927	45255	77	high cut	T1	16	32	275
E6	18/08/2008	4,2	1,35	cua-100	1934,5	45431	6	high cut	T1	16	64-44	246
E7	18/08/2008	3,25	1,3	cua-100	1933,5	45408	8	high cut	T1	16	64	260
E8	18/08/2008	2,2	1,2	cua-50	1934	45420	6	high cut	T2	16	64	146
E9	19/08/2008	3,15	1,55	cua-50	1933,4	45406	8	high cut	T1	16	64	107
E10	19/08/2008	3,1	2,2	cua-100	1933,2	45402	4	high cut	T1	16	64	311
E11	19/08/2008	3,5	2,45	cua-50	1933,7	45414	9	high cut	T1	16	72-34	397
E12	20/08/2008	3,1	1,3	ocho-75	1933,5	45408	9	high cut	T1	16	64	280
E13	20/08/2008	3,3	1,3	ocho-75	1933	45410	8	notch	T2	12	96	3986
E14	20/08/2008	2,2	1,35	cua-50	1934,5	45432	8	high cut	T1	16	56	212
E15	21/08/2008	3	1,4	cua-100	1933,9	45418	8	notch	T1	16	64	158
E16	21/08/2008	4,3	2,4	cua-150	1932,5	45386	12	notch	T1	16	96	650
E17	21/08/2008	2,2	1,3	cua-100	1934,3	45428	6	high cut	T1	16	64	335
E18	22/08/2008	3	2	cua-100	1935	45439	2	high cut	T1	16	76	390

Tabla 4. Parámetros de registro utilizados en los SRM de la zona de las lagunas de Estaña

SRM: nombre asignado al emplazamiento

tr: tiempo utilizado en el registro de los datos

f: frecuencia de emisión

dB: diferencia entre el máximo y mínimo valor de B en el área de la antena

Td: tiempo de decaimiento medido

s: número de adición de señales para cada pulso

tt: tiempo total empleado en el emplazamiento

antena: tipo de bucle

B: campo magnético medio medido con el magnetómetro

q: número de pulsos de emisión utilizados

ruido: ruido electromagnético ambiental

La posición X,Y,Z de una de las esquinas de la antena (normalmente en la que se instala el equipo de registro) ha sido determinada mediante GPS, y quedan recogidas en la Tabla 5.

SRM	X31 UTM	Y31 UTM	Z	X30 UTM	Y30 UTM
SRM-E1	294512	4655811	671	791258	4658820
SRM-E2	294992	4656743	672	791672	4659784
SRM-E3	295193	4656582	688	791884	4659638
SRM-E4	295801	4654422	618	792642	4657524
SRM-E5	296178	4654632	622	793004	4657761
SRM-E6	295600	4656495	683	792296	4659579
SRM-E7	295899	4656150	697	792619	4659256
SRM-E8	295853	4655856	678	792593	4658959
SRM-E9	295467	4655799	678	792212	4658875
SRM-E10	295324	4655660	677	792079	4658727
SRM-E11	295149	4655482	677	791917	4658537
SRM-E12	294651	4655997	672	791384	4659016
SRM-E13	294483	4655805	678	791230	4658812
SRM-E14	295276	4656187	676	791994	4659249
SRM-E15	295128	4656037	686	791857	4659089
SRM-E16	294960	4656052	672	791688	4659092
SRM-E17	294843	4656490	687	791541	4659521
SRM-E18	295671	4656247	687	792384	4659337

Tabla 5. Coordenadas UTM en los husos 30 y 31 y cota de las mediciones de SRM

7 ANÁLISIS DE LOS DATOS SRM DE CAMPO

7.1 Análisis individual de cada SRM

Para proceder al análisis de los datos registrados se ha efectuado el cálculo de los valores de señal instantánea. Para ello se ha partido de los ficheros originales *.dat para cada pulso de emisión, creando nuevos ficheros añadiendo las columnas correspondientes a los valores de señal y ruido instantáneo a partir de las componentes real e imaginaria contenidas en los registros originales, por:

$$\text{Ruido } N = (B^2 + C^2)^{1/2}$$

$$\text{Señal FDI1 } O = (F^2 + G^2)^{1/2}$$

$$\text{Señal FDI2 } P = (J^2 + K^2)^{1/2}$$

La letra se refiere a la columna utilizada.

Con estos ficheros se han dibujado las curvas e(t) que son presentadas a continuación.

En el Anexo III se indican los ficheros generados y su formato.

SRM E1

Antena extendida en Cuaternario, posiblemente sobre calizas cretácicas. La máxima amplitud del pulso emitido es de 3200 A.ms, al haber tenido que interrumpir el sondeo tras finalizar la emisión en q=14, lo que ha disminuido la penetración conseguida. En las curvas **e(t)** (Figura 30) la señal no sobrepasa los 40 nV, excepto para q=9, 12, 13 y 14 donde llega a 80 y 120 nV, siendo de la misma o de inferior intensidad que el ruido en casi todos los casos. No se observa tendencia de decaimiento exponencial.

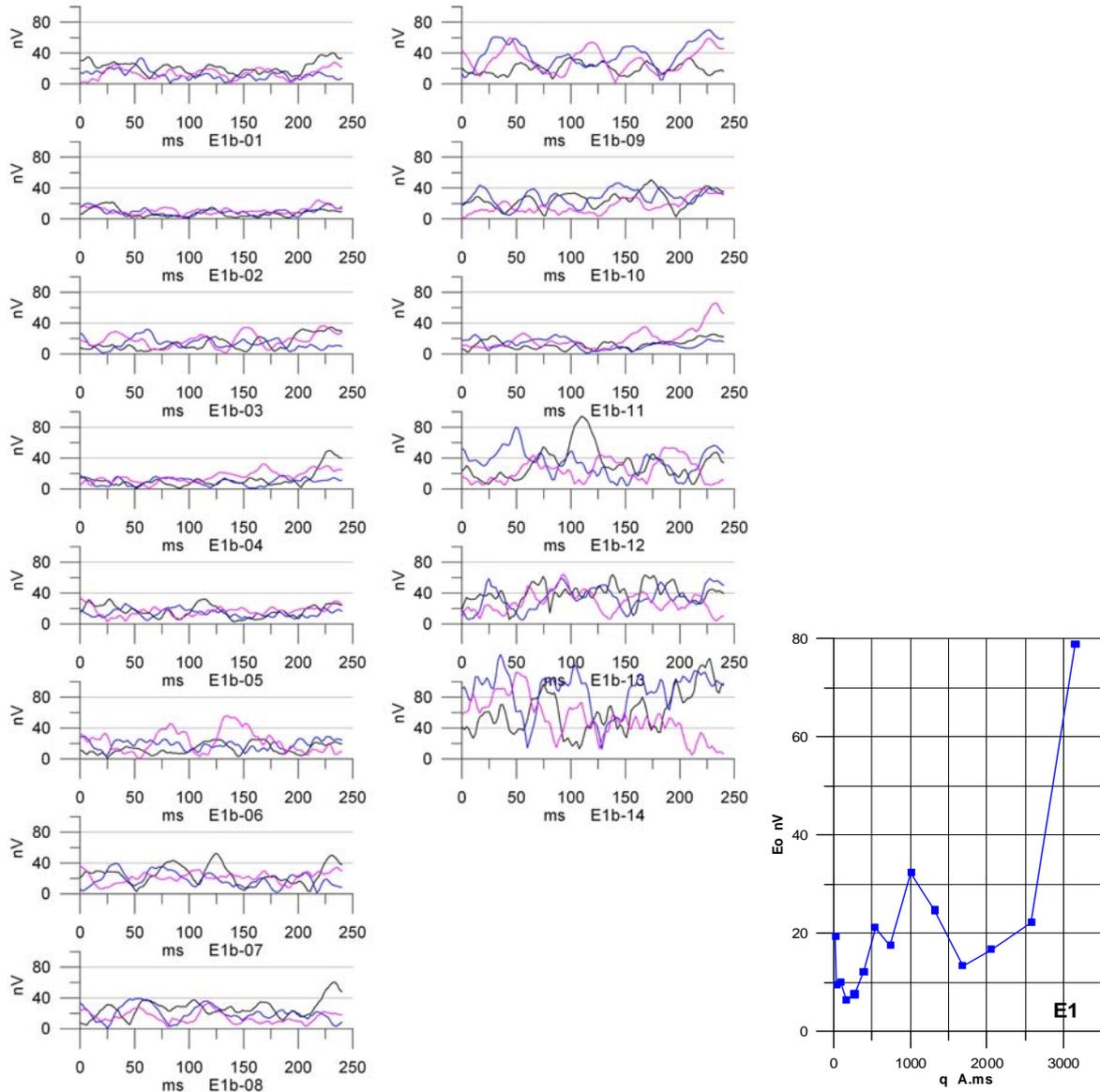


Fig. 30 Curvas de campo **e(t)** del SRM E1. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva **E₀(q)** de campo.

La curva **E₀(q)** es del tipo de un acuífero somero, siendo la gran subida final incompatible con ningún modelo.

El ruido se mantiene entre 300 y 1000 nV. La frecuencia es inestable desde el primer pulso, con variaciones superiores a 3 Hz, que a partir de $q=9$ superan los 15 Hz; la fase también presenta inestabilidad; ambos aspectos son claras indicaciones de la no existencia de señal de resonancia.

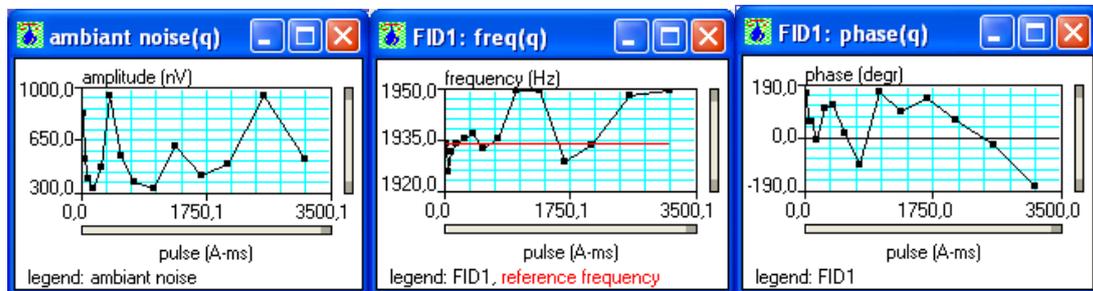


Fig. 31 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E1

Los espectros de frecuencia muestran una dispersión grande, sin un pico notable en la de resonancia para este lugar (1943 Hz), y con gran solape con el espectro del ruido. El espectro de fase es caótico.

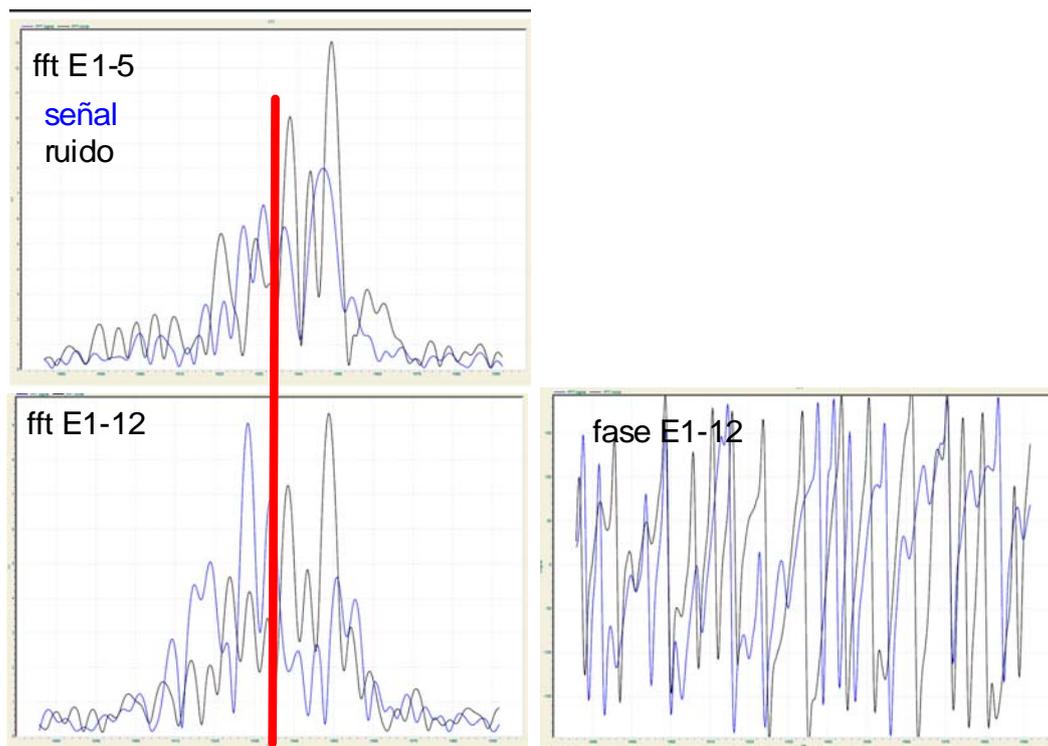


Fig. 32 Espectros de señal y ruido de algunas curvas $e(t)$ del SRM E1. Espectro de fase del SRM E1-12

Estos datos pueden interpretarse como ausencia de agua a la profundidad de investigación, o que ésta existe en una cantidad tan pequeña que su señal no es medible.

SRM E2

Sondeo efectuado sobre materiales del cuaternario-calizas triásicas, al norte de la laguna pequeña. Se han registrado curvas de señal $e(t)$ de más de 200 nV de máxima amplitud, muy superiores al ruido, con clara tendencia de disminución exponencial para ambos pulsos emitidos.

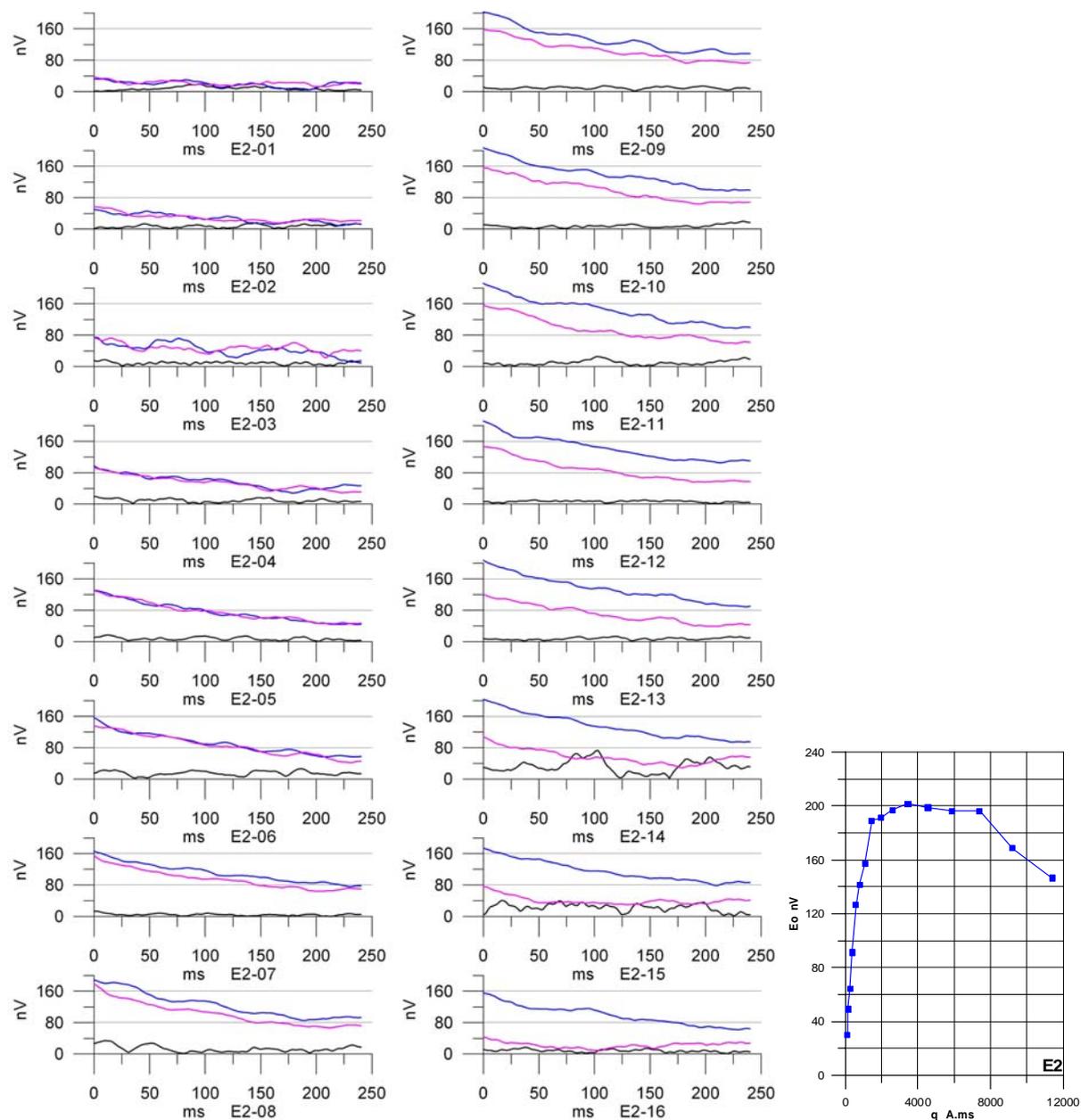


Fig. 33 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E2. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ indica la presencia de un acuífero potente iniciado a relativa poca profundidad, y cuyo fin sólo se ve iniciado en el SRM.

El ruido se mantiene estable, entorno a los 200-250 nV. La frecuencia disminuye menos de 1 Hz a lo largo de toda la medición, con una fase estable.

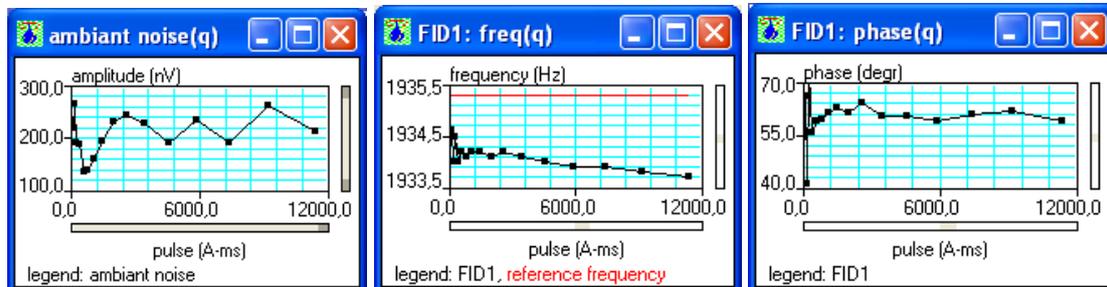


Fig. 34 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E2

El espectro de la señal muestra una perfecta resonancia a la frecuencia de emisión para todos los pulsos, con un total rechazo de ruido en esa banda. El espectro de fase muestra así mismo un cambio neto para la fase de la señal a la frecuencia de resonancia.

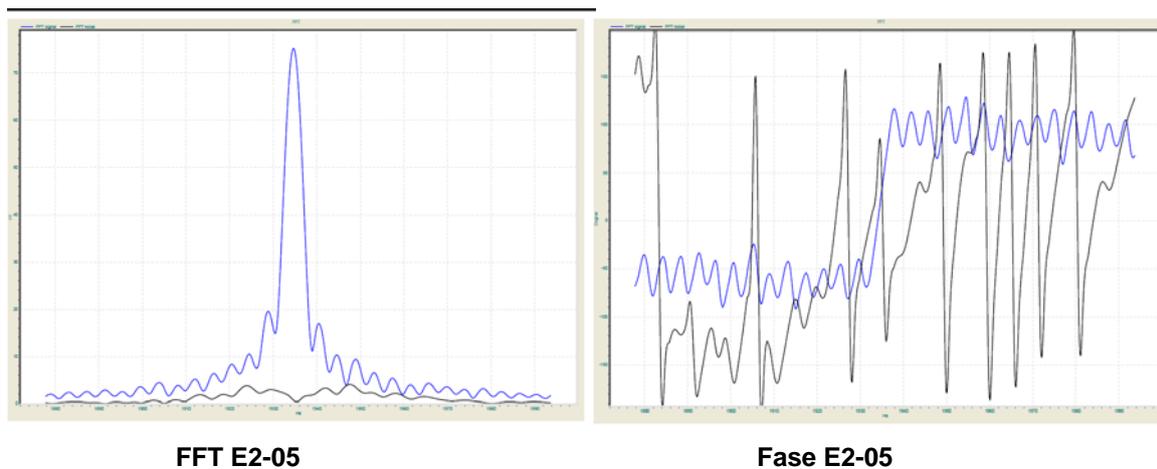


Fig. 35 Espectros de señal y ruido, y fase del SRM E2.

Por lo tanto, para este sondeo se puede dar total fiabilidad a los datos de campo, estimando que existe señal de resonancia del agua.

SRM E3

Situado sobre Keuper, entre las dos lagunas. Señal $e(t)$ inferior a los 60 nV, con carácter de disminución exponencial para ambos pulsos y valores superiores al ruido.

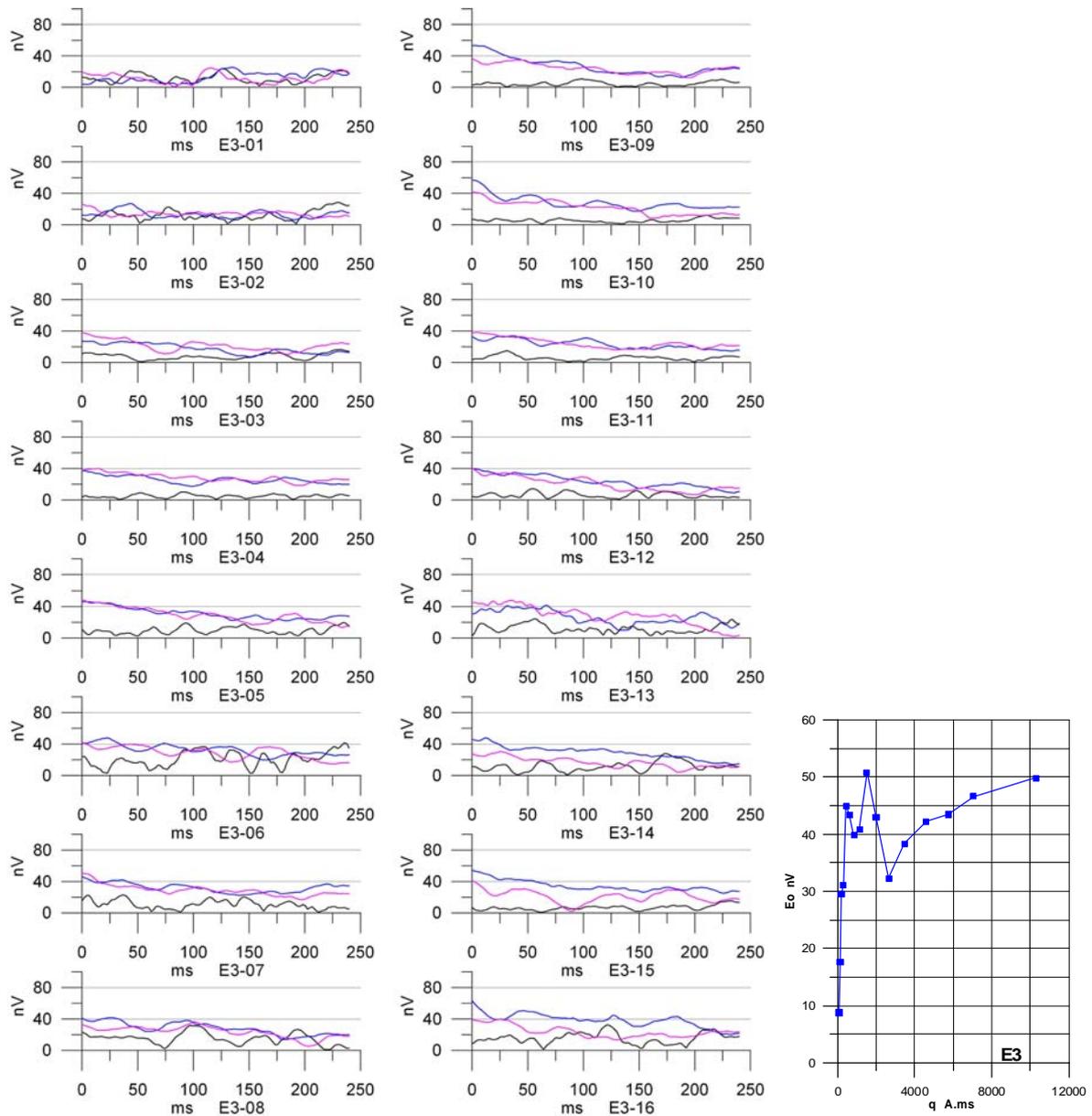


Fig. 36 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E3. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es del tipo de acuífero muy somero, seguido de otro de mayor potencia y profundidad, cuyo fin no se ha detectado.

Ruido estable, inferior a 150 nV; frecuencia con aumento inferior a 1 Hz y fase con ligero decrecimiento.

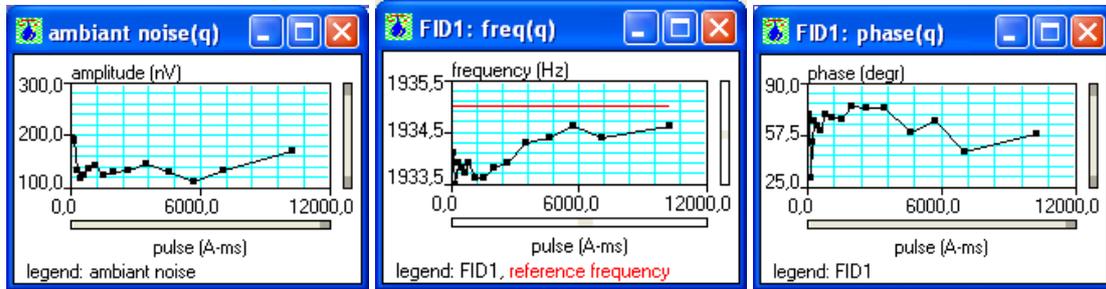


Fig. 37 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E3

El espectro de la señal muestra una perfecta resonancia a la frecuencia de emisión para todos los pulsos, con un buen rechazo de ruido en esa banda, lo que puede apreciarse claramente cuando su nivel es mayor, como es el caso del pulso 6. El espectro de fase muestra así mismo un cambio neto para la fase de la señal a dicha frecuencia.

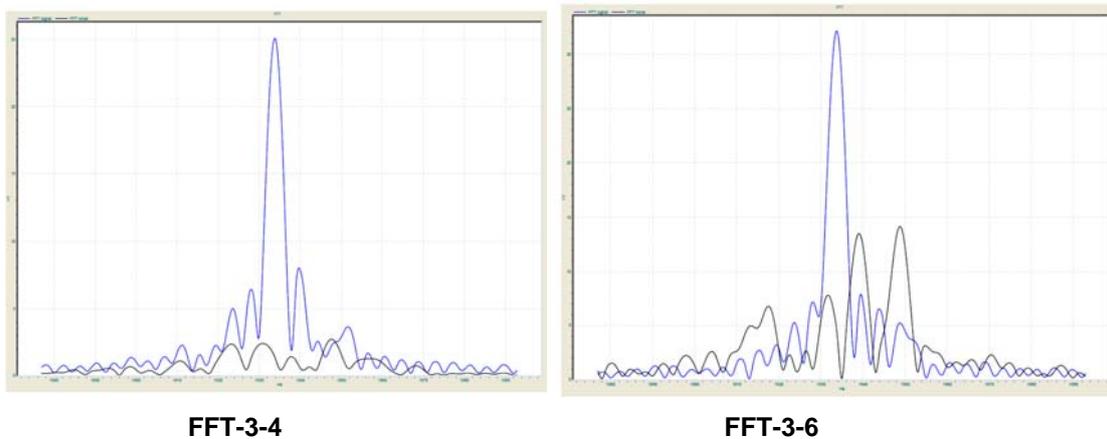


Fig. 38 Espectros de señal y ruido del SRM E3.

Por lo tanto, para este sondeo se puede dar total fiabilidad a los datos de campo, estimando que existe señal de resonancia del agua.

SRM E4

Situado en la zona de las Ollas, sobre Cuaternario suprayacente a Keuper, con presencia de ofitas muy próximas. Excelentes curvas $e(t)$ desde el primer pulso, alcanzando los 400 nV, que se amortiguan completamente a partir de $q=13$. Práctica ausencia de ruido tras el stacking. El rápido decaimiento de las curvas (antes de 100 ms) puede ser indicativo de que se trata de terrenos muy arcillosos, con baja permeabilidad.

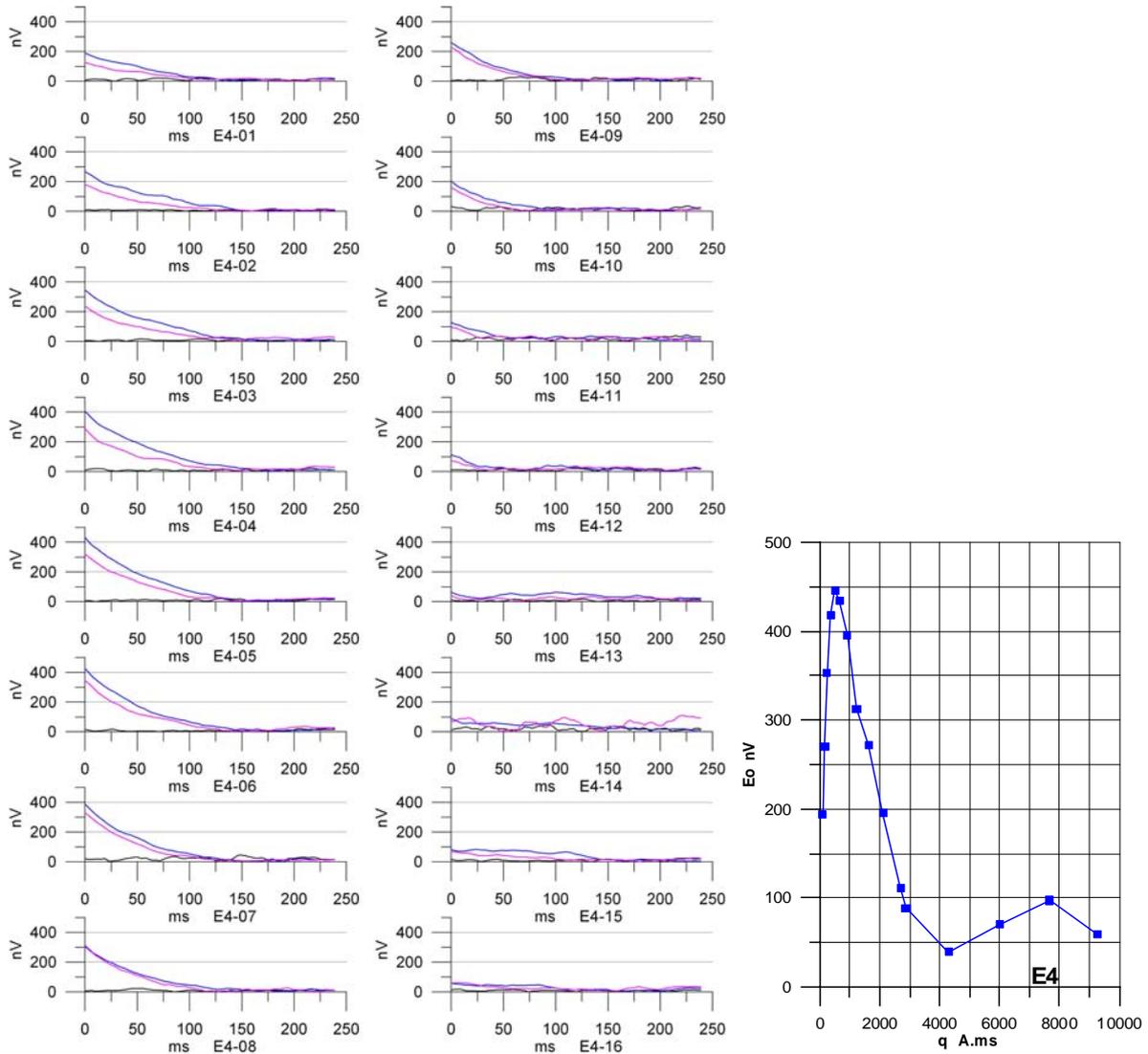


Fig. 39 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E4. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva del sondeo, $E_0(q)$, es del tipo de acuífero muy somero, siendo la elevación final posiblemente debida al efecto de eliminación de armónicos en el tratamiento de la señal (acuífero fantasma).

El ruido ambiente se mantiene estable en unos 200 nV; la frecuencia sufre una constante variación, disminuyendo primero unos 5 Hz, para aumentar bruscamente a partir del pulso 12, para los que ya no existe señal de resonancia (Figura 39). Este mismo comportamiento sigue la fase. Ambas cosas pueden deberse al cambio de litología en profundidad, que en este emplazamiento puede verse acompañado de un cambio notable de susceptibilidad magnética o al menos de intensidad de campo magnético, como se comentará más adelante.

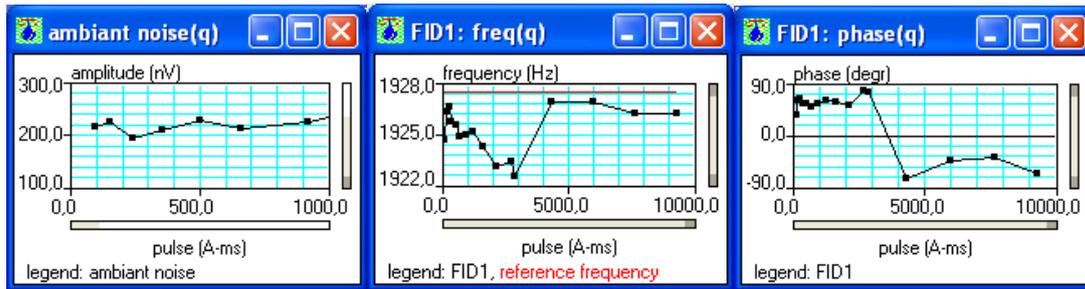


Fig. 40 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E4

El espectro de la señal muestra una perfecta resonancia a la frecuencia de emisión para todos los pulsos, con un buen rechazo de ruido en esa banda; su anchura explica la presencia de señal a pesar de la variación de frecuencias, y sugiere la posible conveniencia de aplicar un filtro pasa banda. El espectro de fase tiene cambio neto para la frecuencia de resonancia, aunque se aprecia que la banda de esta frecuencia es de mayor anchura que en otros entornos, mostrando en ocasiones varios picos de resonancia (p.e. para el pulso 12, en donde la curva e(t) es sólo de unos 25 ms).

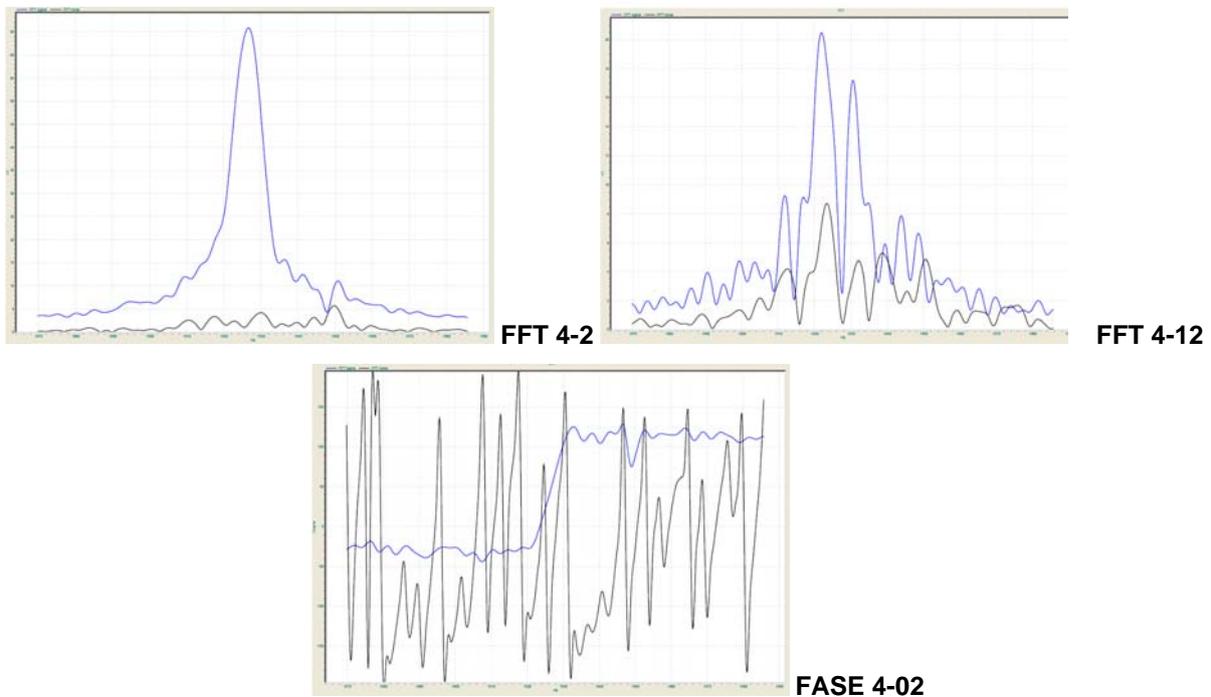


Fig. 41 Espectros de señal y ruido, y fase del SRM E4.

SRM E5

Realizado próximo al SRM E4, al noroeste. Las curvas $e(t)$ presentan idénticas características al E4, no existiendo señal a partir del pulso 13.

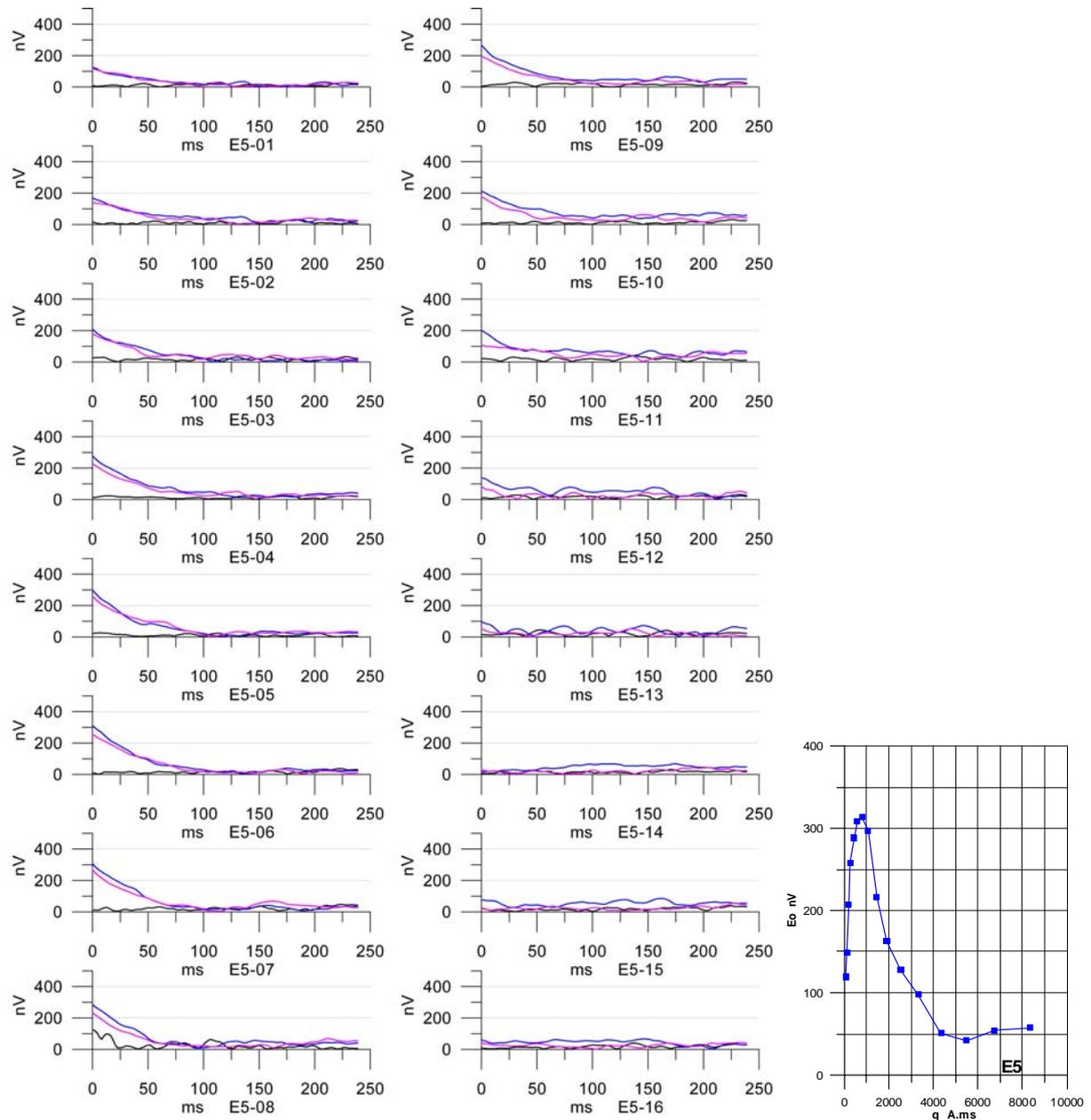


Fig. 42 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E5. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es del tipo de acuífero muy somero, ligeramente más potente que en el E4, siendo la elevación final posiblemente debida al efecto de eliminación de armónicos en el tratamiento de la señal (acuífero fantasma).

El ruido ambiente varía entre 200 y 350 nV; la frecuencia sufre una constante variación, disminuyendo primero unos 5 Hz, para aumentar de nuevo a partir del pulso 12, para el que ya no existe señal de resonancia. Este mismo comportamiento sigue la fase. Ambas cosas pueden deberse al cambio de litología en profundidad, que en este emplazamiento puede verse acompañado de un cambio notable de susceptibilidad magnética o al menos de intensidad de campo magnético, como se comentará más adelante.

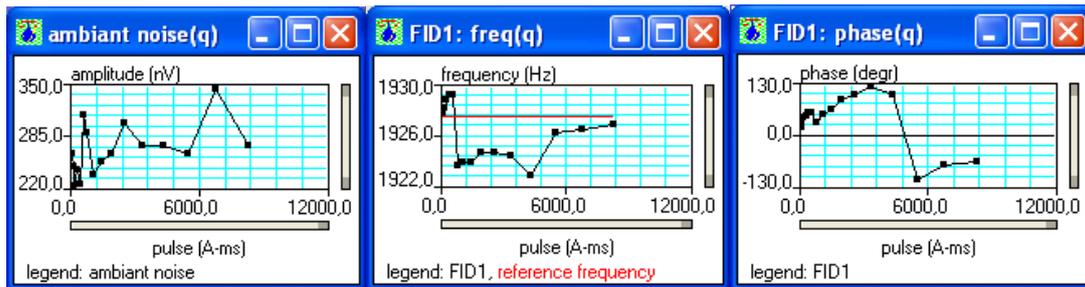


Fig. 43 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E5

El espectro de la señal muestra una buena resonancia a la frecuencia de emisión para todos los pulsos, con una anchura que explica la buena señal a pesar de la variación de frecuencias. El ruido en esa banda ha sido bien rechazado tras el stacking. El espectro de fase tiene cambio neto para la frecuencia de resonancia, aunque se aprecia que la banda de resonancia es de mayor anchura que en otros entornos, como ocurre en el SRM E4, mostrando en ocasiones varios picos de resonancia, por lo que puede ser conveniente aplicar un filtro pasa banda.

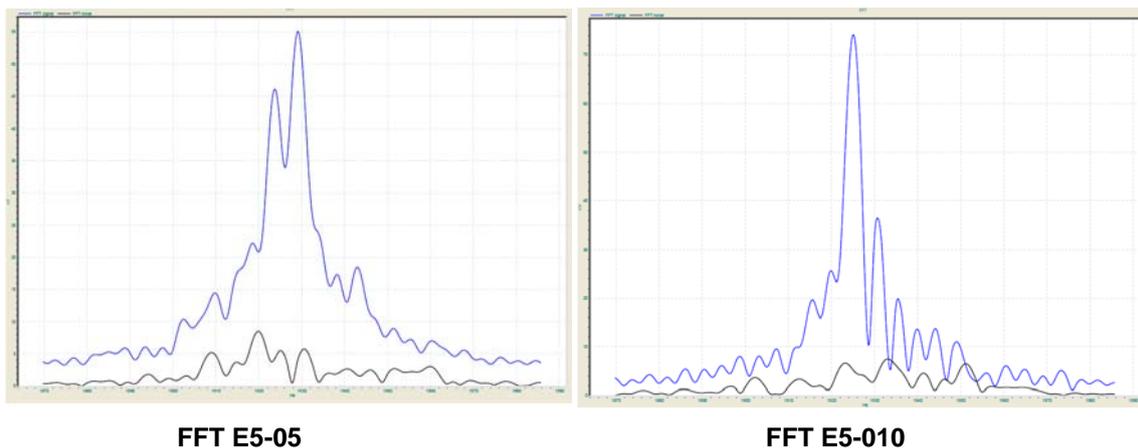


Fig. 44 Espectros de señal y ruido del SRM E5.

Por lo tanto, para los sondeos E4 y E5 se puede dar total fiabilidad a los datos de campo, estimando que existe señal de resonancia del agua en ambos emplazamientos.

SRM E6

Sondeo realizado junto a la laguna pequeña, en el noroeste de la misma, sobre Cuaternario posiblemente suprayacente a calizas triásicas. Curvas $e(t)$ con amplitud máxima que llega a unos 300 nV, con práctica eliminación del ruido tras el stacking. Tiempo de decaimiento de muy suave pendiente, indicativo de gran permeabilidad.

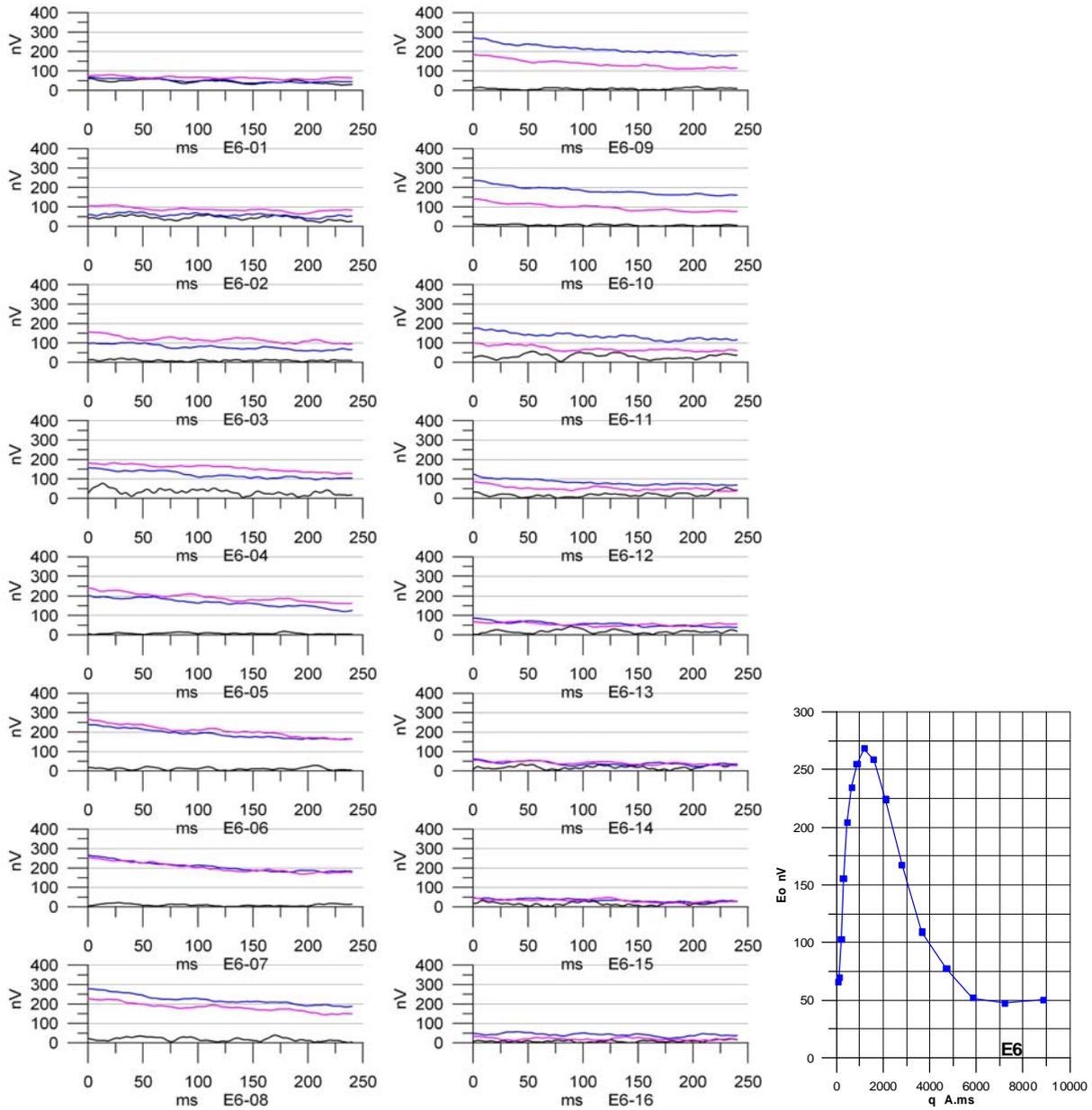


Fig. 45 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E6. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es del tipo de acuífero somero, con cierta potencia.

El ruido ambiente es bastante estable entorno de 300 nV; la frecuencia se mantiene con variación inferior a 1 Hz, y la fase presenta una suave variación, todo ello indicativo de buena calidad del registro.

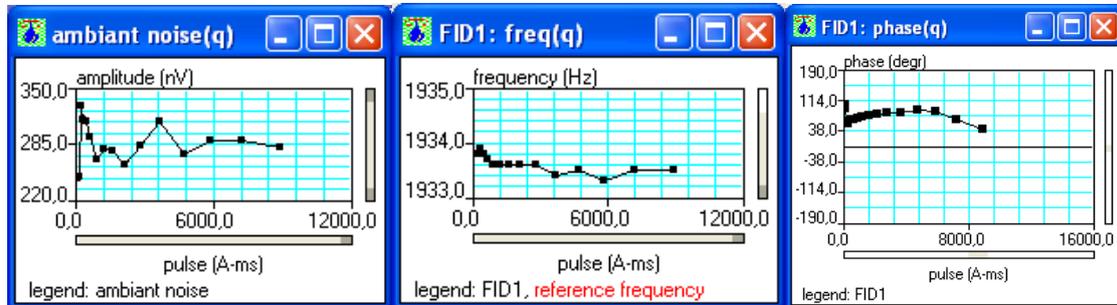
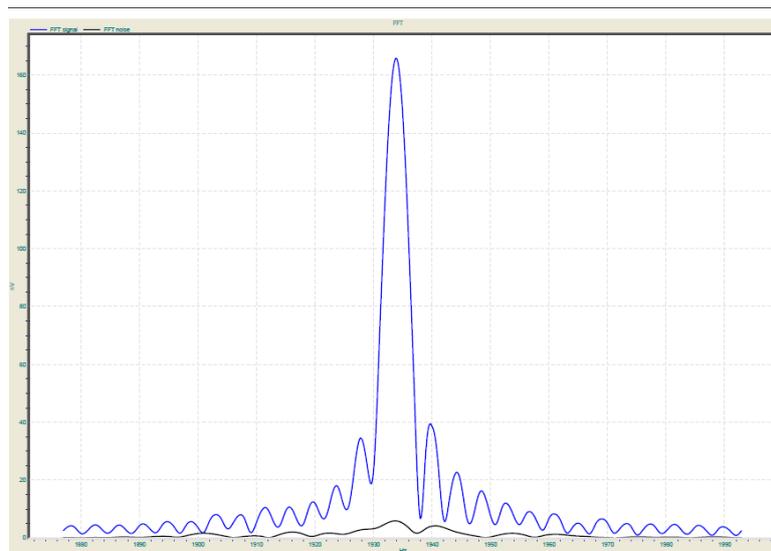


Fig. 46 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E6

El espectro de la señal muestra una buena resonancia a la frecuencia de emisión para todos los pulsos, con un buen rechazo de ruido tras el stacking en esa banda. El espectro de fase tiene cambio neto para la frecuencia de resonancia.



FFT E6-05

Fig. 47 Espectro de señal y ruido del SRM E6.

Para este sondeo se puede dar total fiabilidad a los datos de campo, estimando que existe señal de resonancia del agua.

SRM E7

Efectuado al noroeste de la laguna grande, sobre Keuper rodeado de calizas triásicas y en un entorno donde se cartografía el cruce de varias fallas. No se aprecia prácticamente señal de resonancia, que parece más evidente a partir del pulso 11, con amplitud inferior a 40 nV, aumentando con la profundidad.

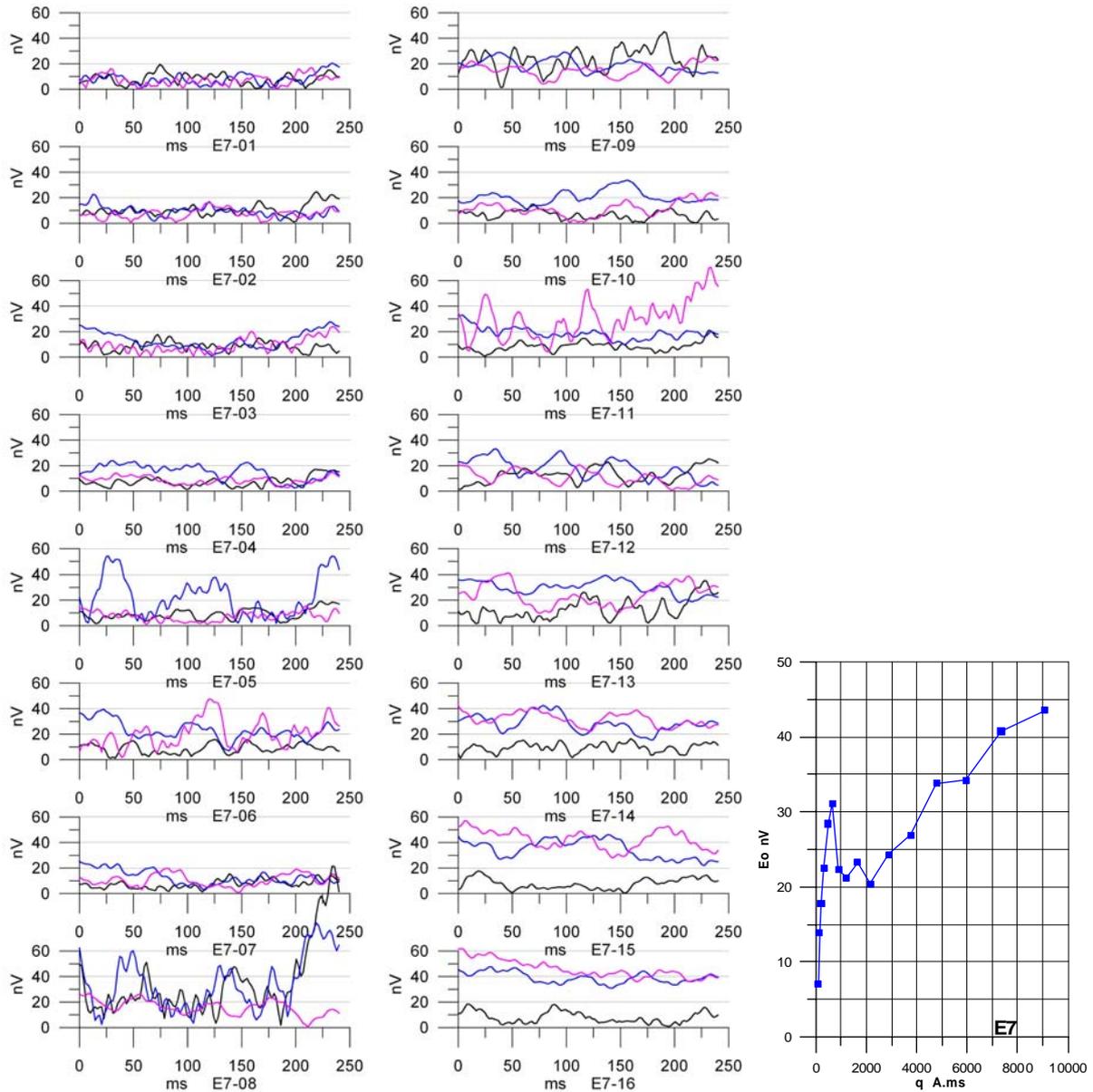


Fig. 48 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E7. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva final del sondeo, curva $E_0(q)$, es indicativa de acuífero muy somero y con poco agua, seguido de un acuífero mucho más potente, cuyo fin no ha sido detectado por el SRM.

El ruido ambiente es algo inestable, situándose entre 350 y 200 nV; la frecuencia se mantiene con variación inferior a 1 Hz, salvo para $q=5$ y $q=8$, que presentan curvas $e(t)$ más irregulares. La fase presenta una suave variación; estos datos son indicativos una calidad aceptable del registro, a pesar de la poca evidencia de señal de resonancia.

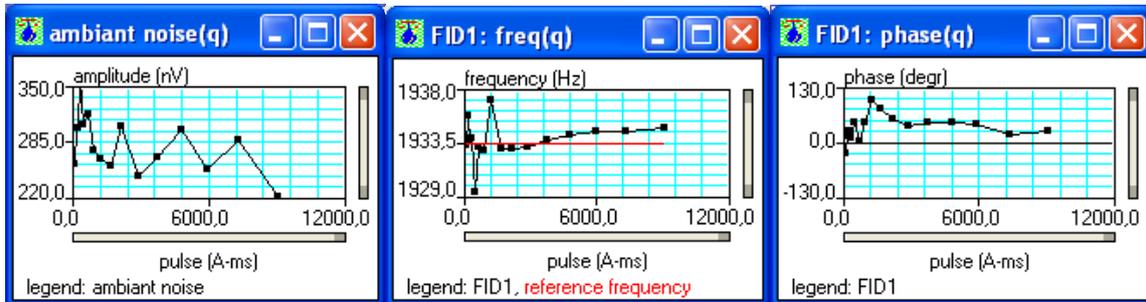


Fig. 49 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E7

Los espectros de la señal evidencian la falta de resonancia al menos hasta el pulso 8, siendo sin embargo existente para los pulsos superiores.

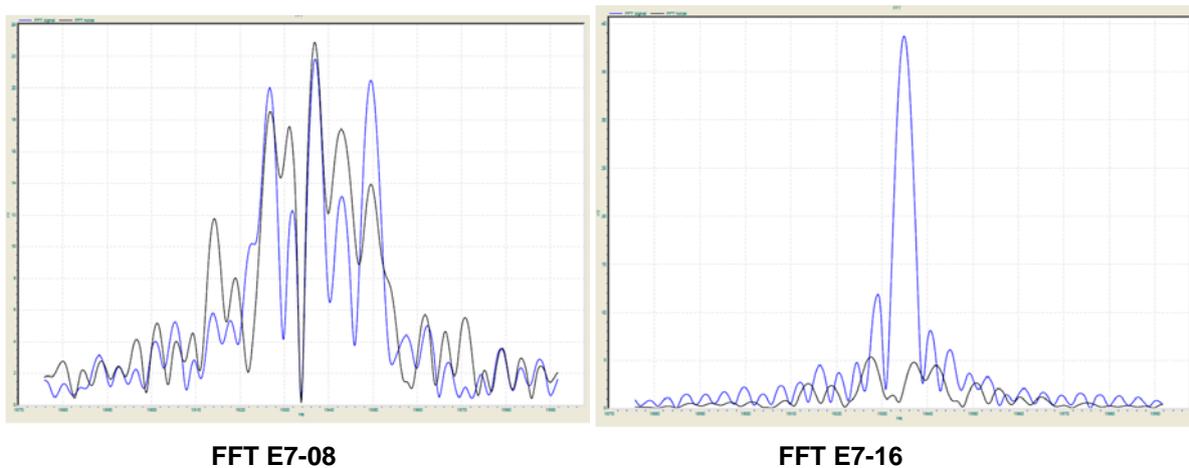


Fig. 50 Espectros de señal y ruido del SRM E7.

En consecuencia puede considerarse que en este emplazamiento existe agua en el subsuelo, aunque a bastante profundidad, sin que quede detectado el fin del acuífero.

SRM E8

Registrado en el extremo suroeste de la laguna grande, sobre Cuaternario posiblemente suprayacente a calizas triásicas. Las curvas $e(t)$ presentan una amplitud máxima de 60 nV, con decaimiento de largo periodo. En este emplazamiento sólo se registro con emisión de un pulso. El ruido, bien por debajo de la señal, presenta cierto carácter oscilatorio, que en ocasiones se transmite a la señal.

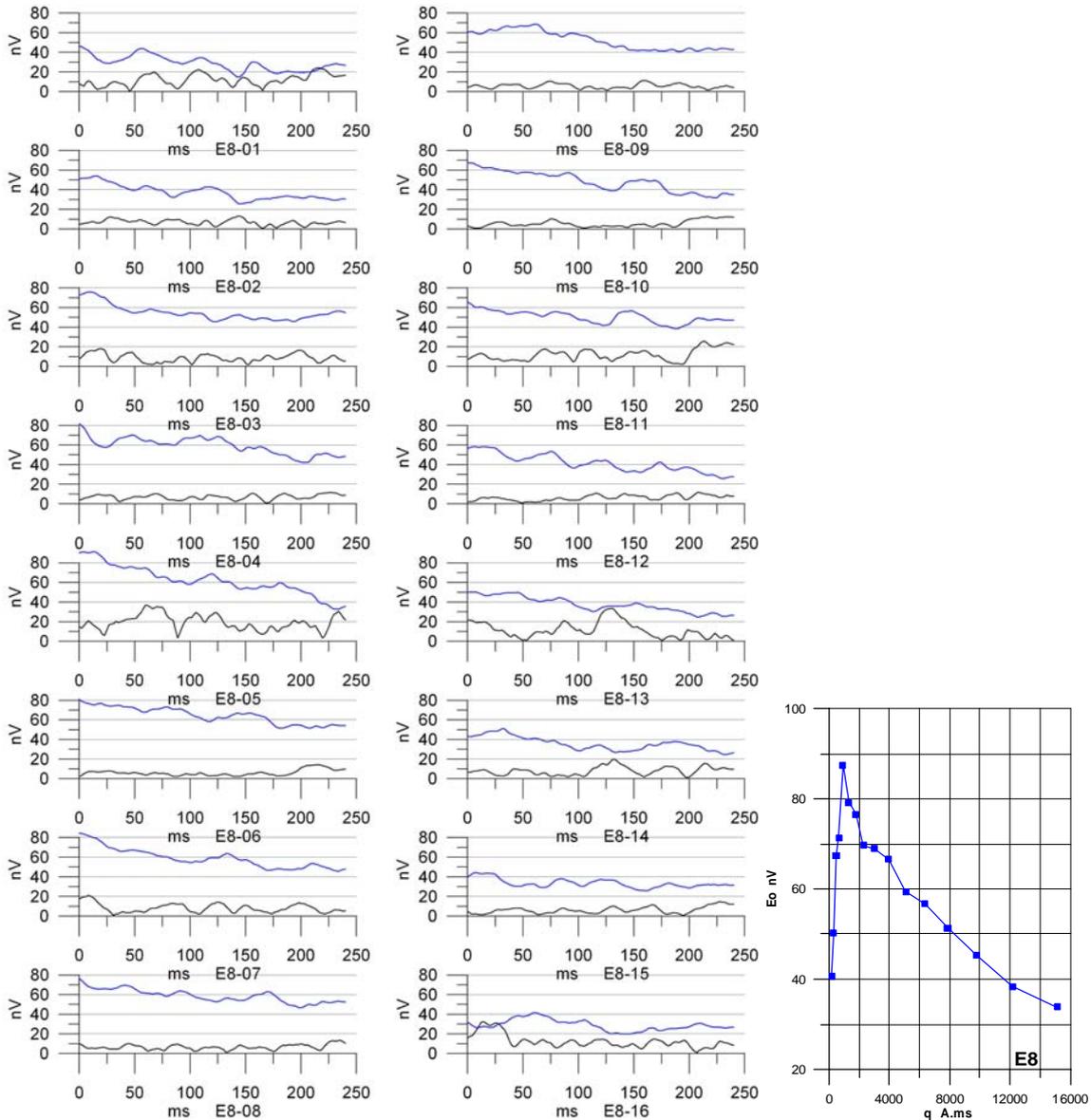


Fig. 51 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E8. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

El resultado del sondeo, curva $E_0(q)$, es indicativo de acuífero superficial potente, o acuífero superficial muy delgado, con otro más potente y profundo prácticamente unido al anterior y cuyo fin se localiza.

El ruido ambiental se mantiene muy estable entorno de los 150 nV; la frecuencia oscila menos de 1 Hz y la fase se mantiene constante, todo ello indicativo de registro de buena calidad, con curvas de resonancia fiables.

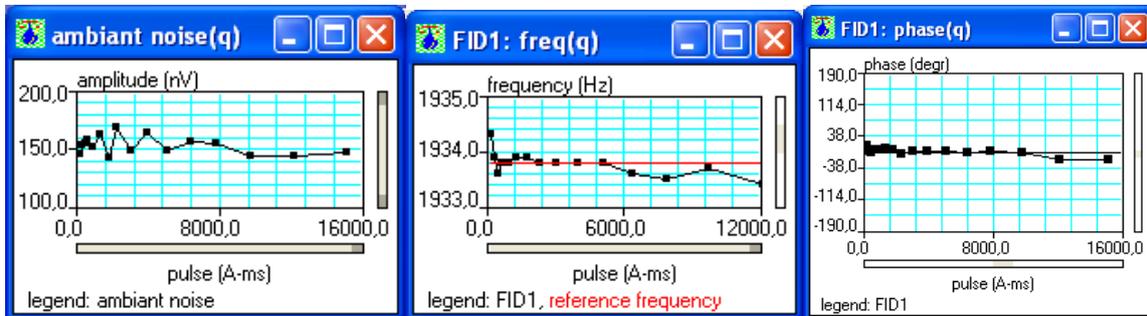
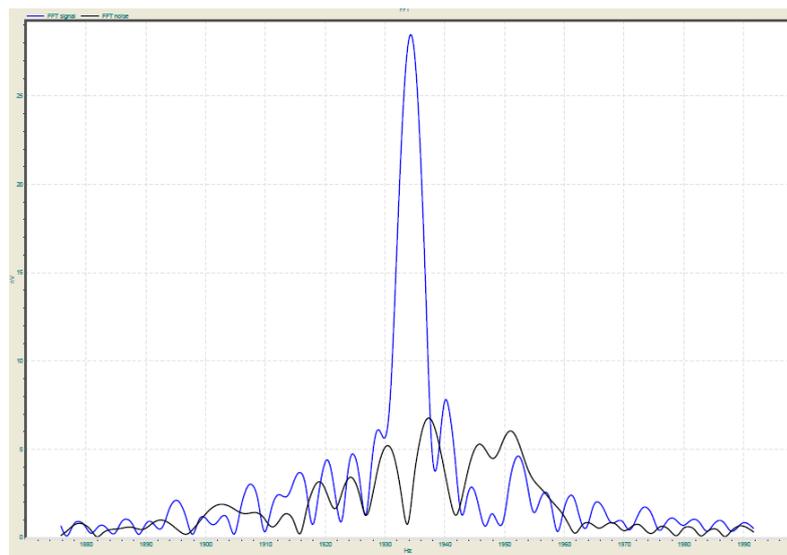


Fig. 52 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E8

El espectro de la señal muestra una buena resonancia, así como el de fase.



FFT E8-01

Fig. 53 Espectro de señal y ruido del SRM E8.

En consecuencia puede considerarse que el registro es indicativo de la existencia de agua en este entorno.

SRM E9

Situado en el borde sureste de la laguna grande, directamente sobre terrenos de calizas triásicas. Las señales $e(t)$ son de amplitud inferior a 40 nV, con decaimiento exponencial, aunque afectado por el ruido, debido a su baja amplitud.

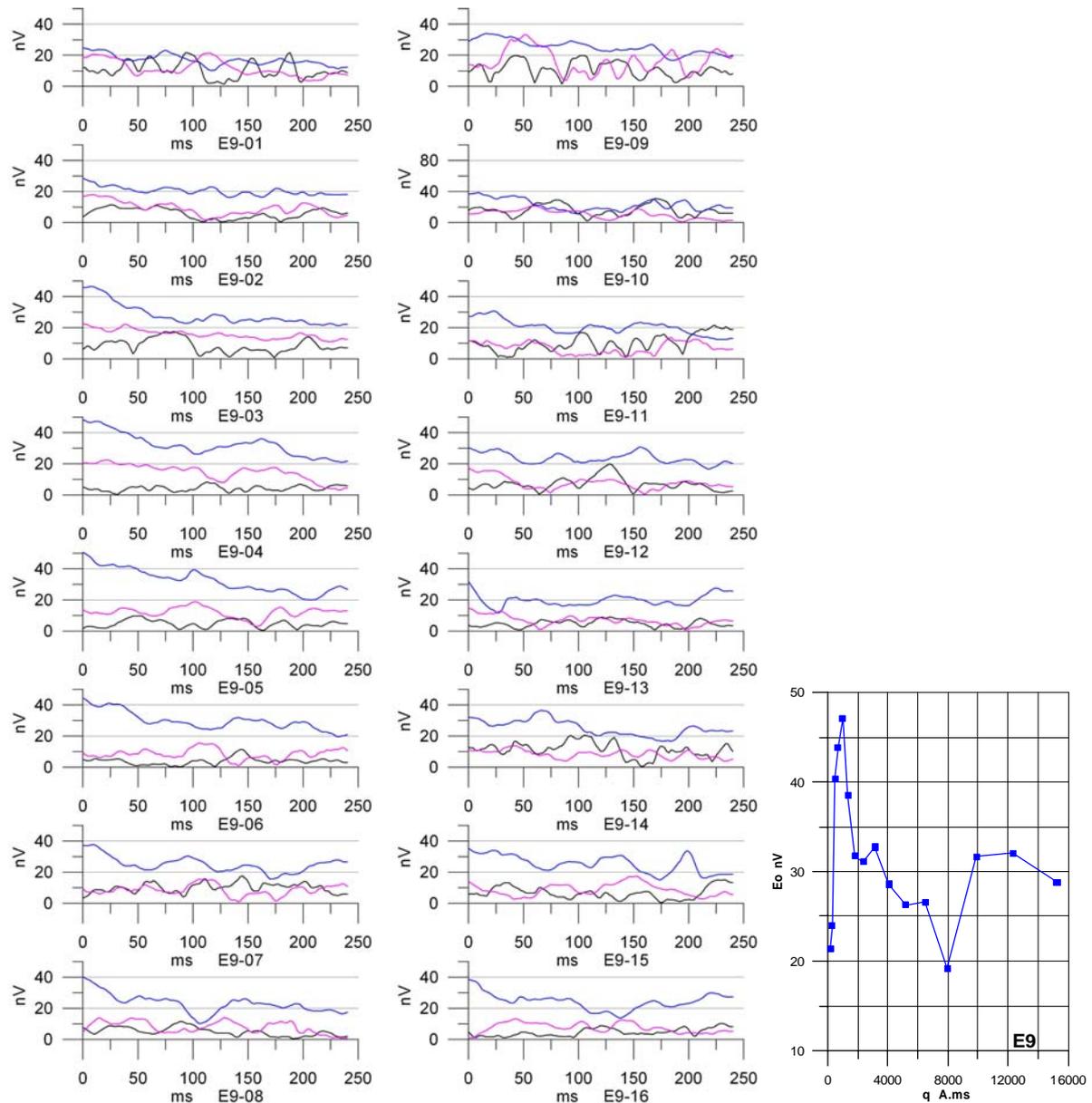


Fig. 54 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E9. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es indicativa de un acuífero muy superficial, con otro, bien separado del anterior, más profundo y poco potente, ya que se aprecia el inicio de la disminución de valores.

El ruido ambiental es muy estable y pequeño (inferior a 100 nV), excepto para $q=11$, donde la curva $e(t)$ muestra que tiene un carácter de inducción de armónico. La frecuencia oscila menos de 1 Hz y la fase es muy estable, pudiendo considerar este registro como de buena calidad.

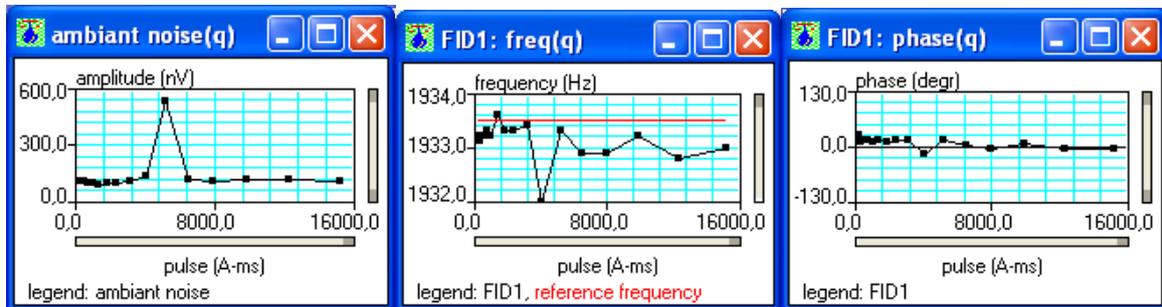


Fig. 55 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E9

El espectro de la señal muestra claramente la existencia de resonancia, siendo en ocasiones visible la existencia de un ruido en frecuencias que no afectan a la señal.

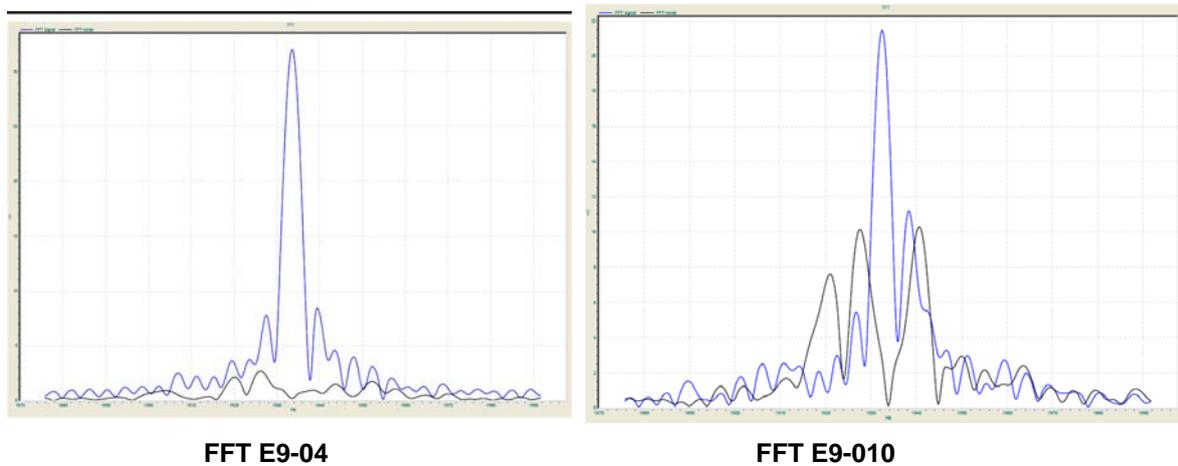


Fig. 56 Espectros de señal y ruido del SRM E9.

Se considera por tanto que el sondeo evidencia la existencia de agua en este lugar.

SRM E10

Situado al sur del E9, junto al pequeño humedal sobre Cuaternario, presumiblemente sobre calizas triásicas. Presenta curvas $e(t)$ con amplitud máxima de hasta 250 nV, buen decaimiento exponencial, sin estar prácticamente afectadas por el ruido tras el stacking.

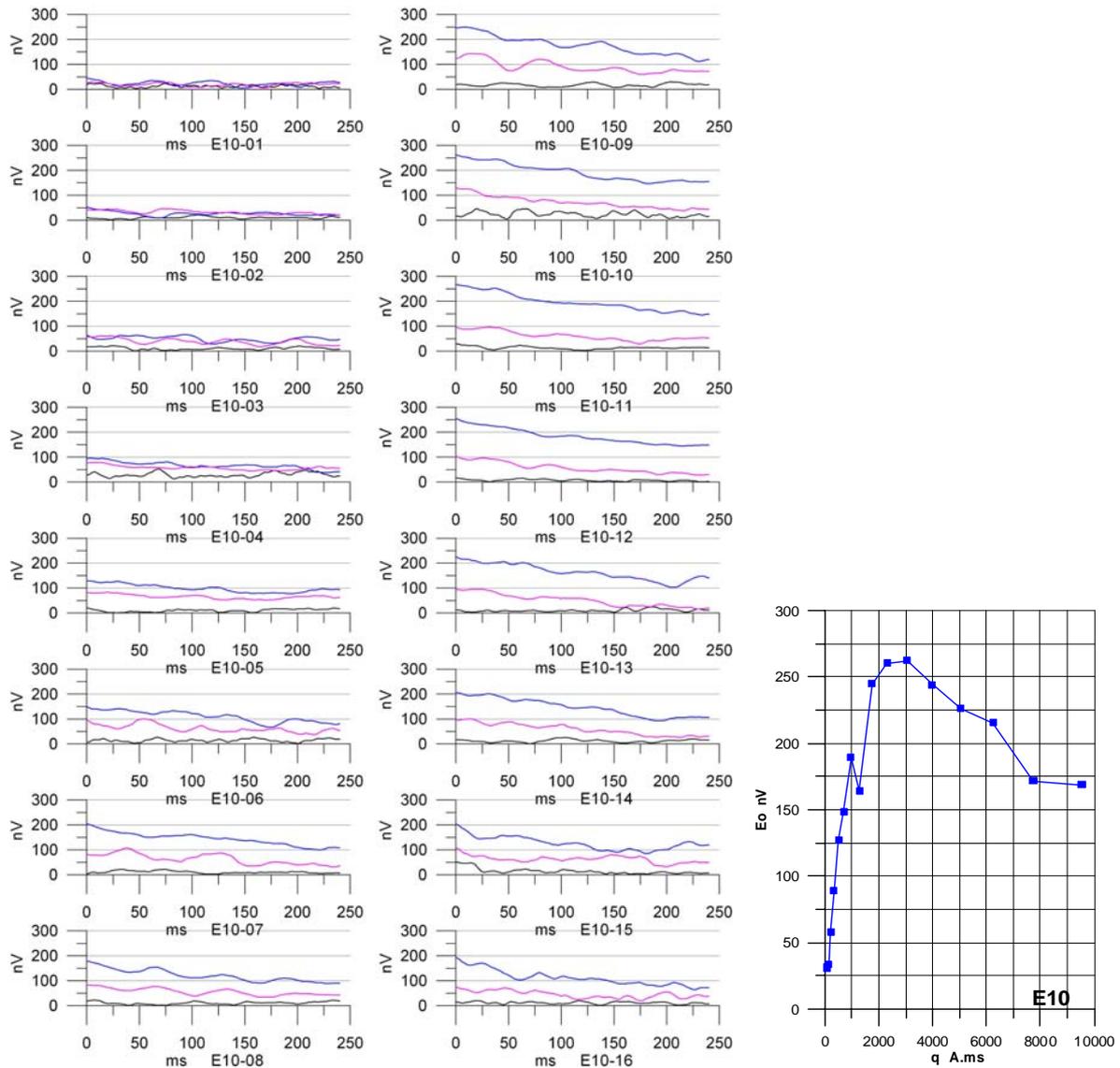


Fig. 57 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E10. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La morfología de la curva resultado del sondeo $E_0(q)$ denota la presencia de un acuífero no somero y de cierta potencia, bajo el que puede existir otro, indicado por el aumento iniciado para $q=16$, con una curva $e(t)$ fiable.

El ruido ambiental es de unos 200 nV, presentando momentos de picos de mucha mayor amplitud (1000 a 2000 nV), que no afectan al registro tras el stacking. La frecuencia oscila menos de 1 Hz y la fase presenta un suave decaimiento, todo ello índice de registro de buena calidad.

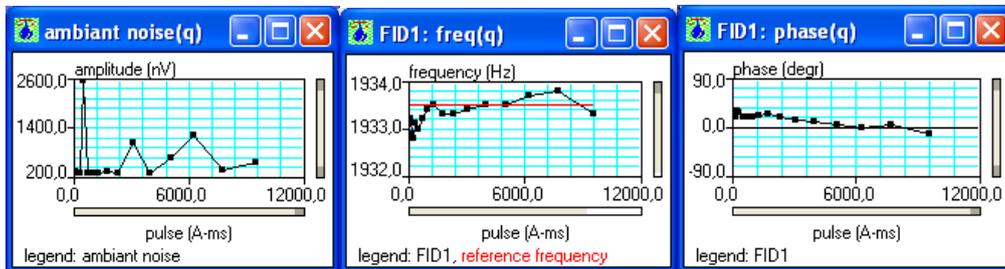


Fig. 58 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E10

El espectro de la señal demuestra claramente la existencia de resonancia. El ruido presenta un pico en el espectro que no afecta a la señal.

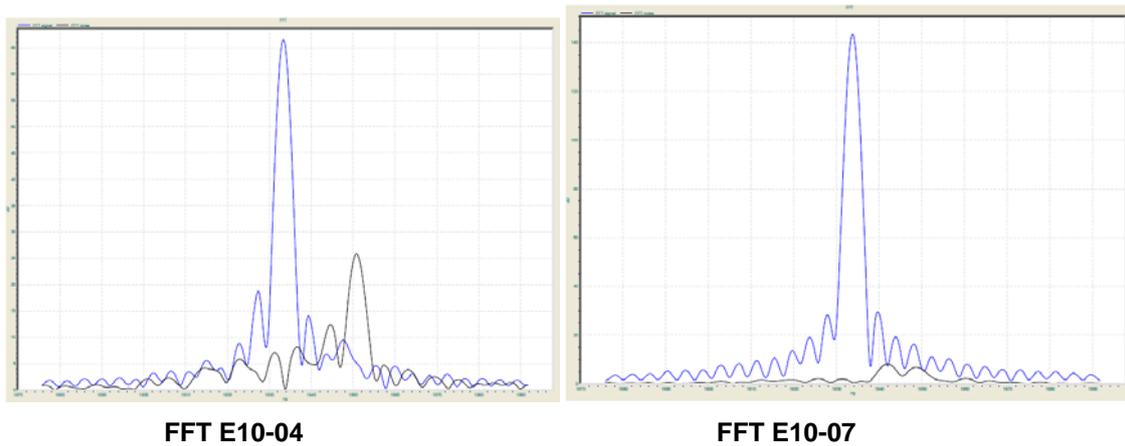


Fig. 59 Espectros de señal y ruido del SRM E10.

En consecuencia, en este emplazamiento puede asegurarse la existencia de agua.

SRM E11

Situado sobre una estrecha franja de Keuper, entre calizas cretácicas y triásicas. La amplitud inicial máxima de las curvas $e(t)$ no supera los 30 nV, con valores en general inferiores a los del ruido. Sólo se aprecia un posible decaimiento exponencial para $q=10, 11$ y 12 , con oscilaciones de gran amplitud relativa que no se observan también en el ruido tras el stacking.

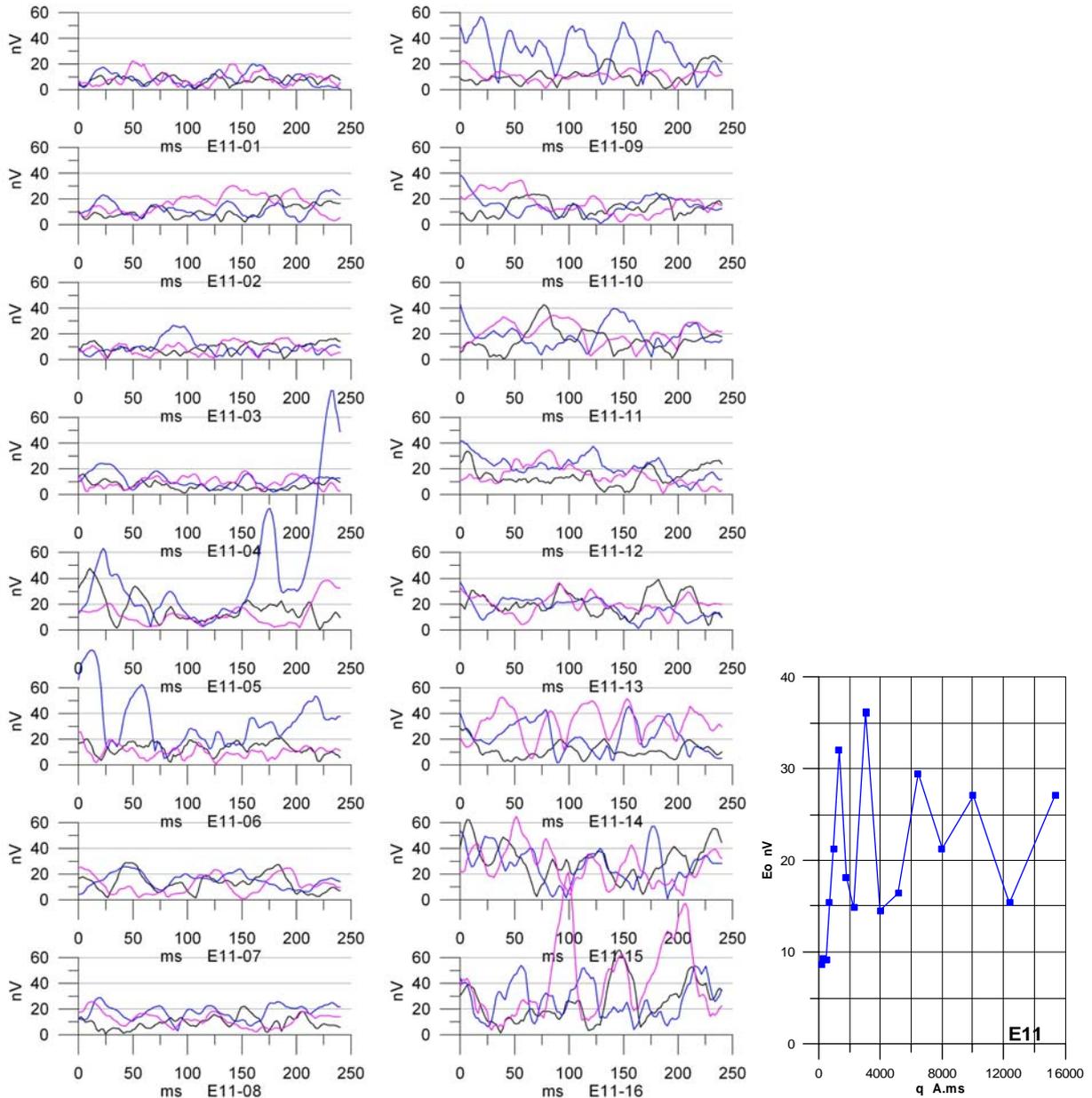


Fig. 60 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E11. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es caótica.

El ruido ambiental oscila entre 250 y 400 nV. La frecuencia sólo se mantiene en la de resonancia para unos pocos pulsos, mostrando variaciones superiores a los 20 Hz. La fase también presenta unas oscilaciones irregulares, todo ello indicativo de la ausencia de señal de resonancia.

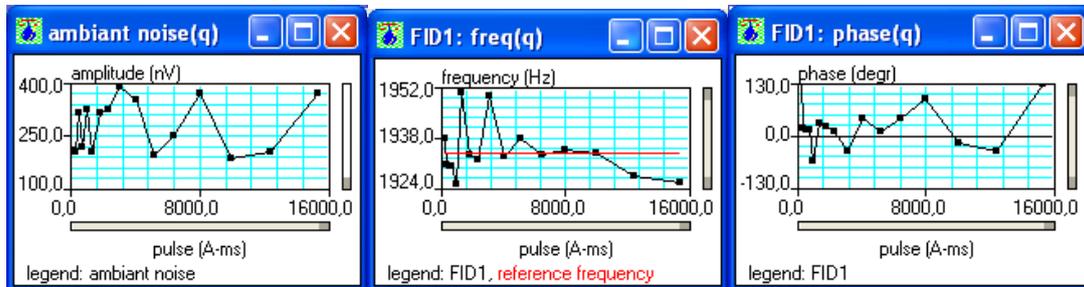


Fig. 61 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E11

Los espectros de señal y fase corroboran la ausencia de resonancia, explicando así mismo las oscilaciones de alta amplitud de los valores de $e(t)$, que son debidos a ruido.

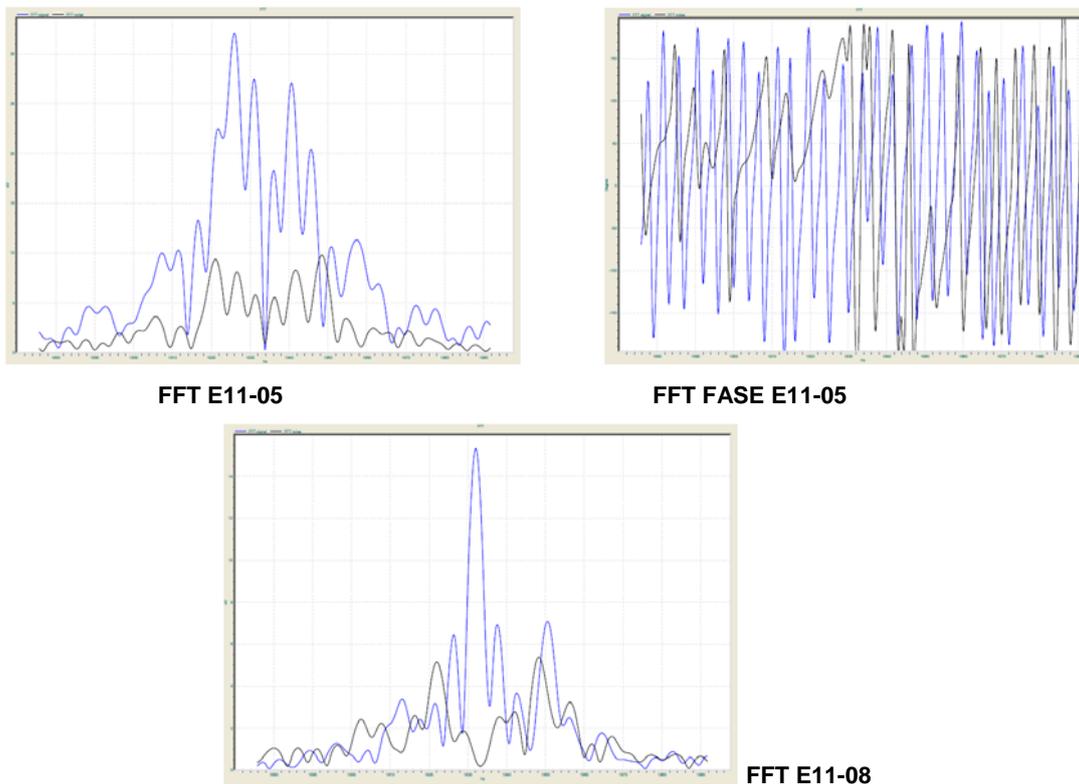


Fig. 62 Espectros de señal y ruido de algunas curvas $e(t)$ del SRM E11. Espectro de fase del SRM E11-05

En conclusión, en este emplazamiento puede considerarse la no existencia de agua a la profundidad de investigación.

SRM E12

Situado a menos de 200 m al Norte del SRM E1, sobre Cuaternario suprayacente al Keuper. Curvas $e(t)$ de amplitud máxima de unos 100 nV, con claro decaimiento exponencial de amplio periodo. En ocasiones, se percibe un ruido armónico superpuesto a la señal (p.e. para $q=11$).

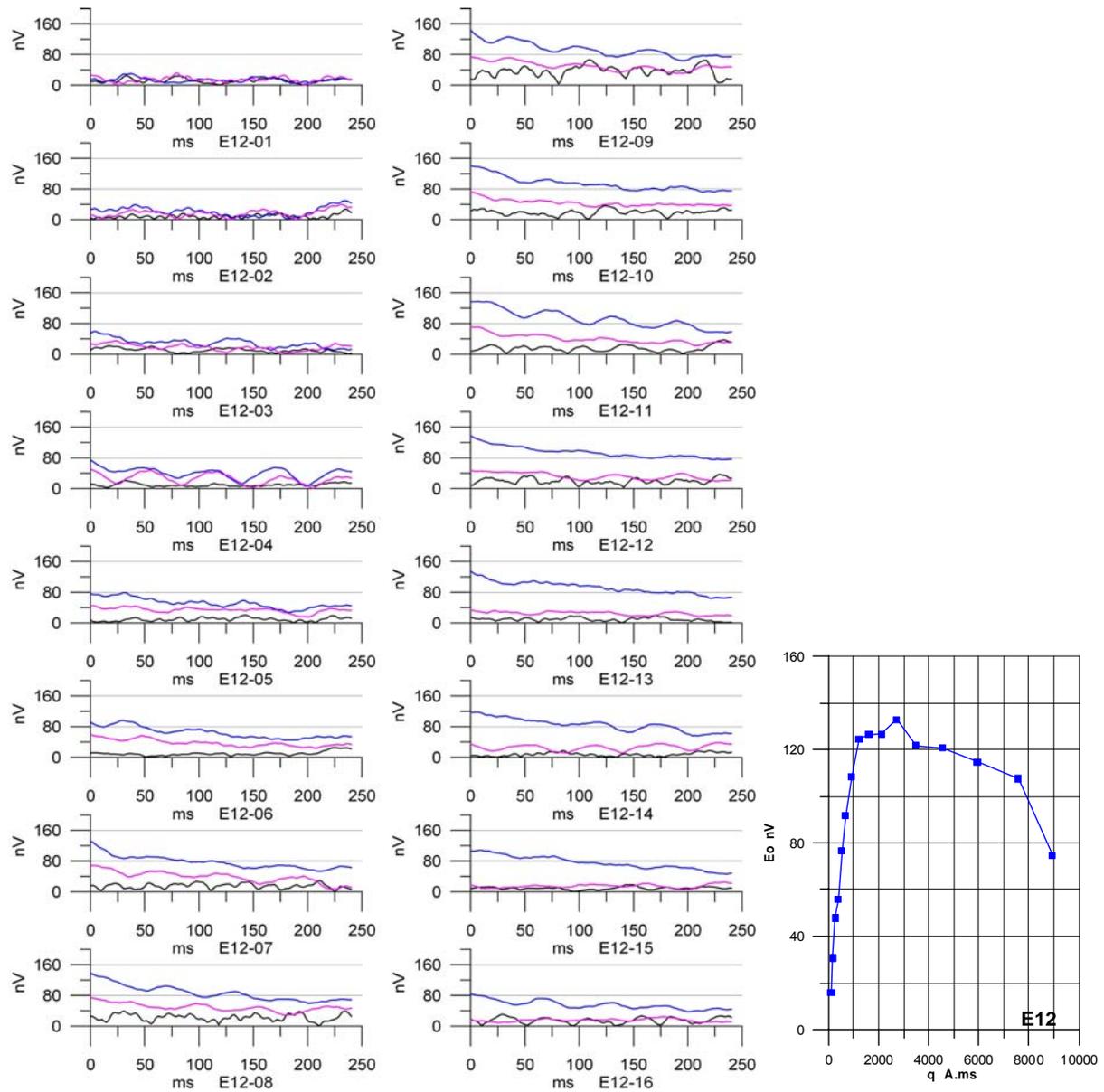


Fig. 63 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E12. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

El resultado del sondeo, curva $E_0(q)$, indica la presencia de un acuífero potente, cuyo fin queda bien localizado.

El ruido ambiente se sitúa entre 200-350 nV. La fase se mantiene con variación inferior a 1 Hz y la fase presenta una suave disminución, todo ello indicativo de presencia de resonancia y buena calidad de las curvas obtenidas.

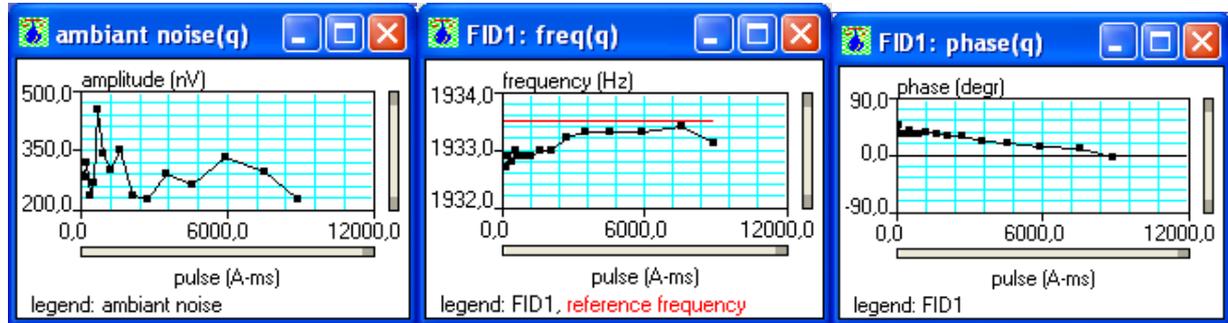
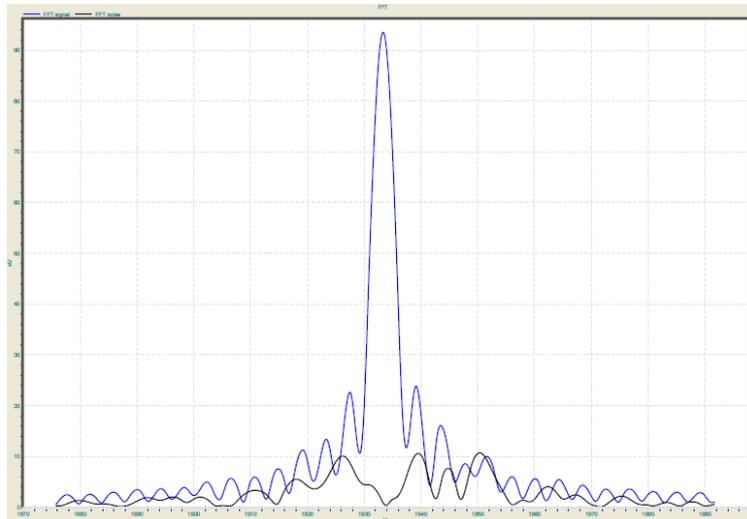


Fig. 64 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E12

El espectro de la señal corrobora la existencia de resonancia, así como el buen rechazo del ruido tras el stacking.



FFT E12-10

Fig. 65 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E12

En conclusión, en este emplazamiento puede garantizarse la presencia de agua.

SRM E13

Efectuado en el mismo emplazamiento que el SRM E1, a fin de ratificar los resultados de dicho sondeo. No se aprecia señal $e(t)$, pudiendo considerarse un cierto decaimiento de duración inferior a los 50 ms para algunos pulsos ($q=2,3,7$). La amplitud del ruido es igual o superior a la de la señal.

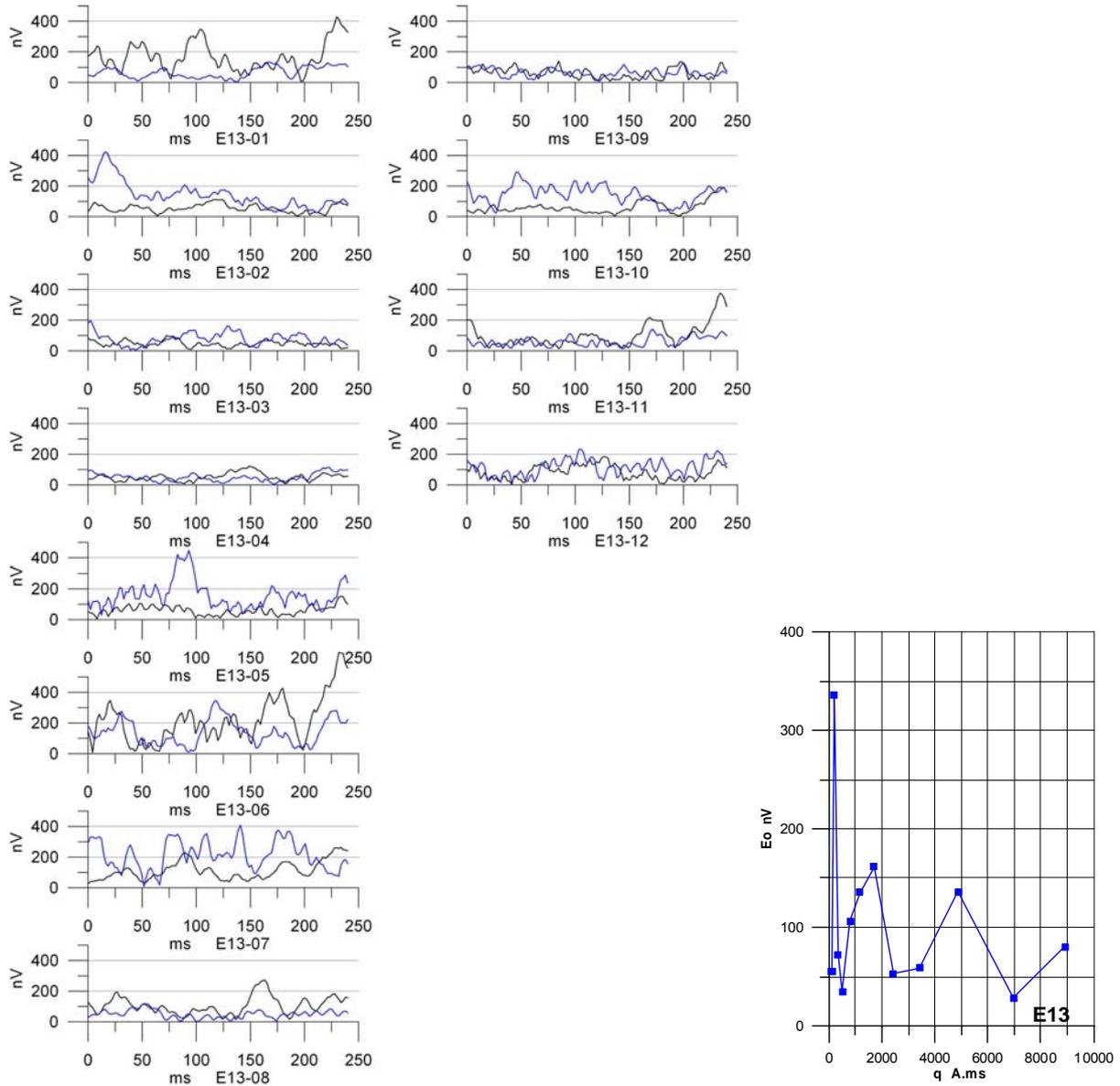


Fig. 66 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E13. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ es caótica.

El ruido ambiente es del orden de 2000 a 4000 nV. La fase presenta variaciones superiores a los 15 Hz y la fase es aleatoria, ratificando la ausencia de señal de resonancia.

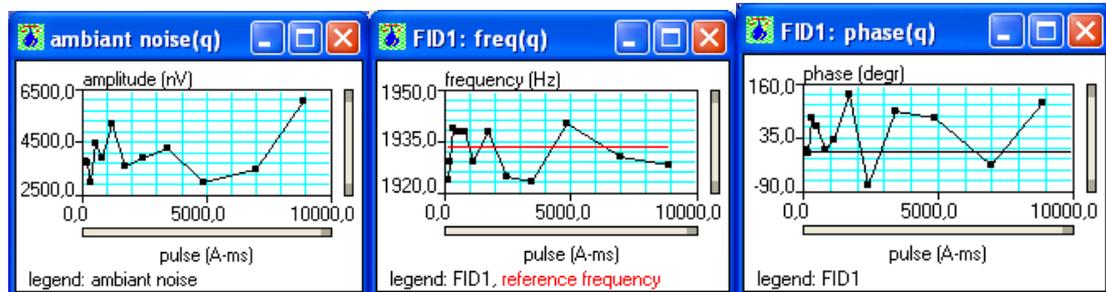
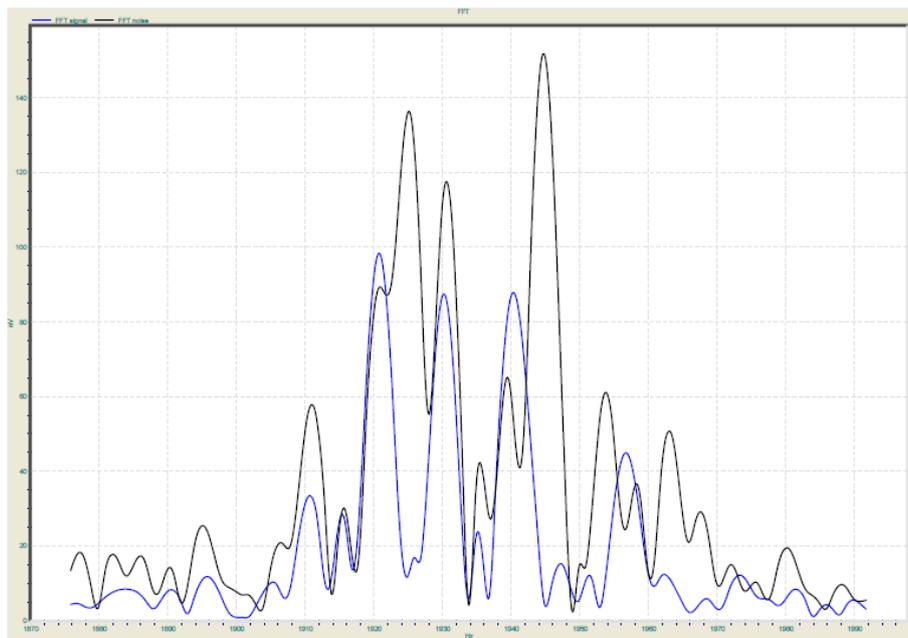


Fig. 67 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E13

Los espectros de la señal indican la preponderancia del ruido, tanto a la frecuencia de resonancia, como en toda la banda de registro.



FFT E13-06

Fig. 68 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E13.

Este sondeo ratifica el resultado obtenido en el E1, indicando por tanto que los registros efectuados no permiten afirmar que exista agua en este entorno.

SRM E14

Situado junto a la laguna grande, en su borde noroccidental, sobre Cuaternario y Keuper. La señal $e(t)$ alcanza valores iniciales máximos de unos 100 nV, con suave decaimiento indicativo de tiempos de relajación muy grandes. El ruido tras el stacking es muy inferior a la señal.

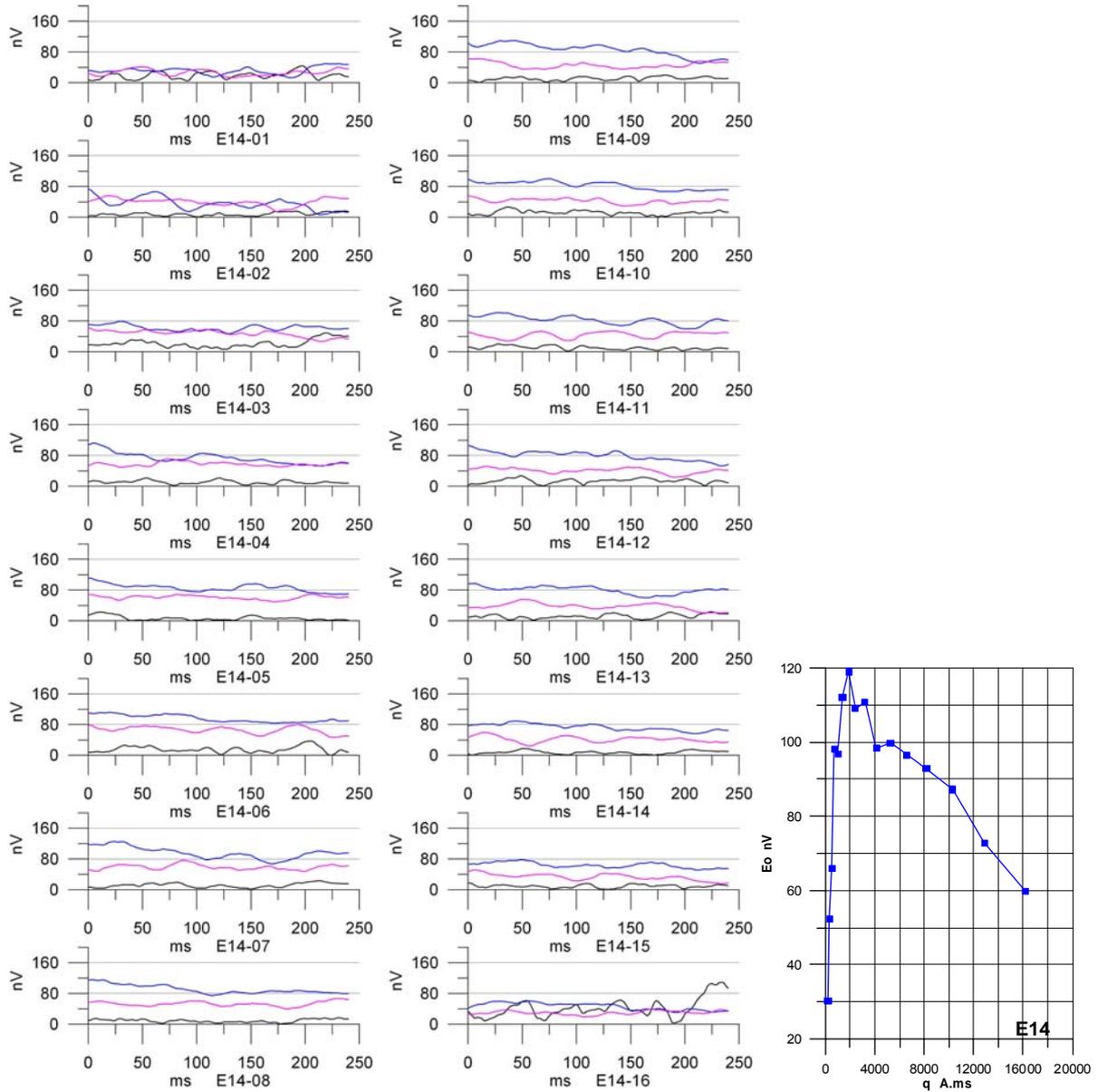


Fig. 69 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E14. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La función $E_0(q)$, resultado del sondeo, indica la presencia de un acuífero muy somero, inmediatamente seguido de otro más potente y profundo, cuyo fin queda bien registrado en el sondeo.

El ruido se mantiene estable entorno de 200 nV, salvo un ligero incremento para $q=12$, que ha sido bien eliminado en el stacking. La frecuencia es muy estable, con variación inferior a 1 Hz, así como la fase, todo ello indicativo de presencia de señal de resonancia y buena calidad de los registros.

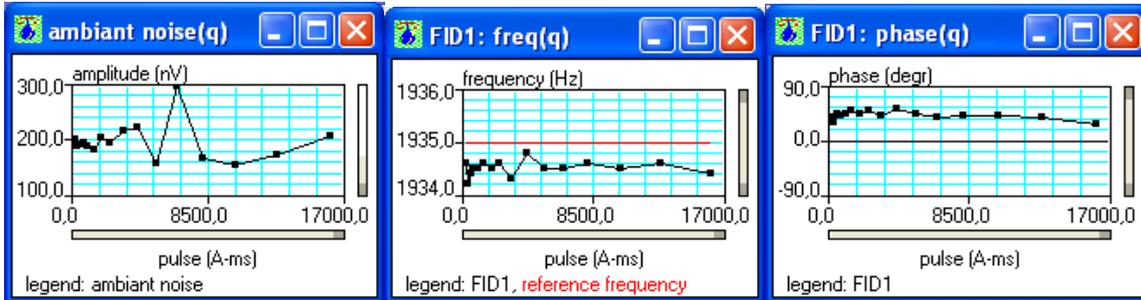
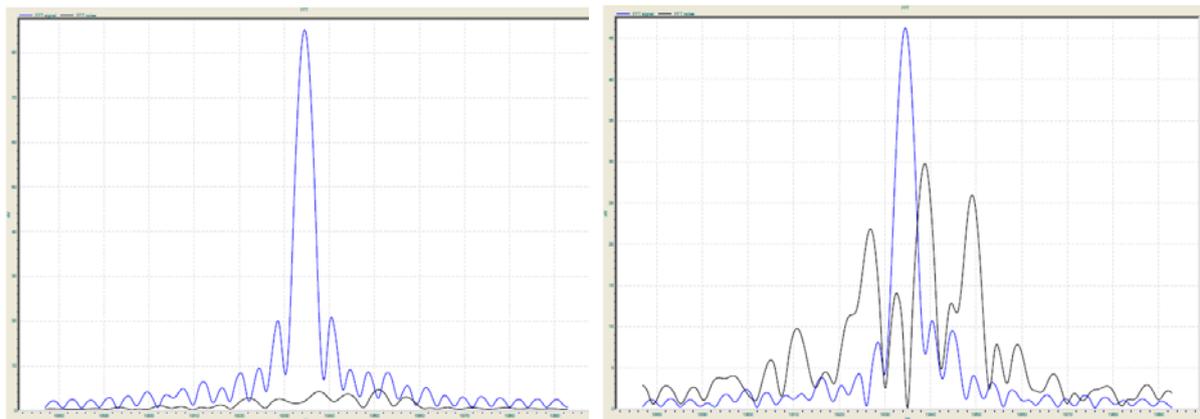


Fig. 70 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E14

Los espectros de la señal corroboran lo anterior. Se muestra, además, que el ruido se establece en frecuencias diferentes de la de resonancia, como puede verse en el espectro correspondiente al pulso $q=16$, que es el más afectado por el ruido.



FFT E14-05

FFT E14-16

Fig. 71 Espectros de señal y ruido de algunas curvas $e(t)$ del SRM E14.

Se trata por lo tanto de un emplazamiento donde puede asegurarse la presencia de agua.

SRM E15

Situado unos 200 m al suroeste del SRM E14, sobre Keuper. No se aprecia señal $e(t)$ para pulsos inferiores a $q=6$, pero a partir de este pulso la amplitud señal es creciente, llegando a más de 80 nV, y con un tiempo de decaimiento muy grande.

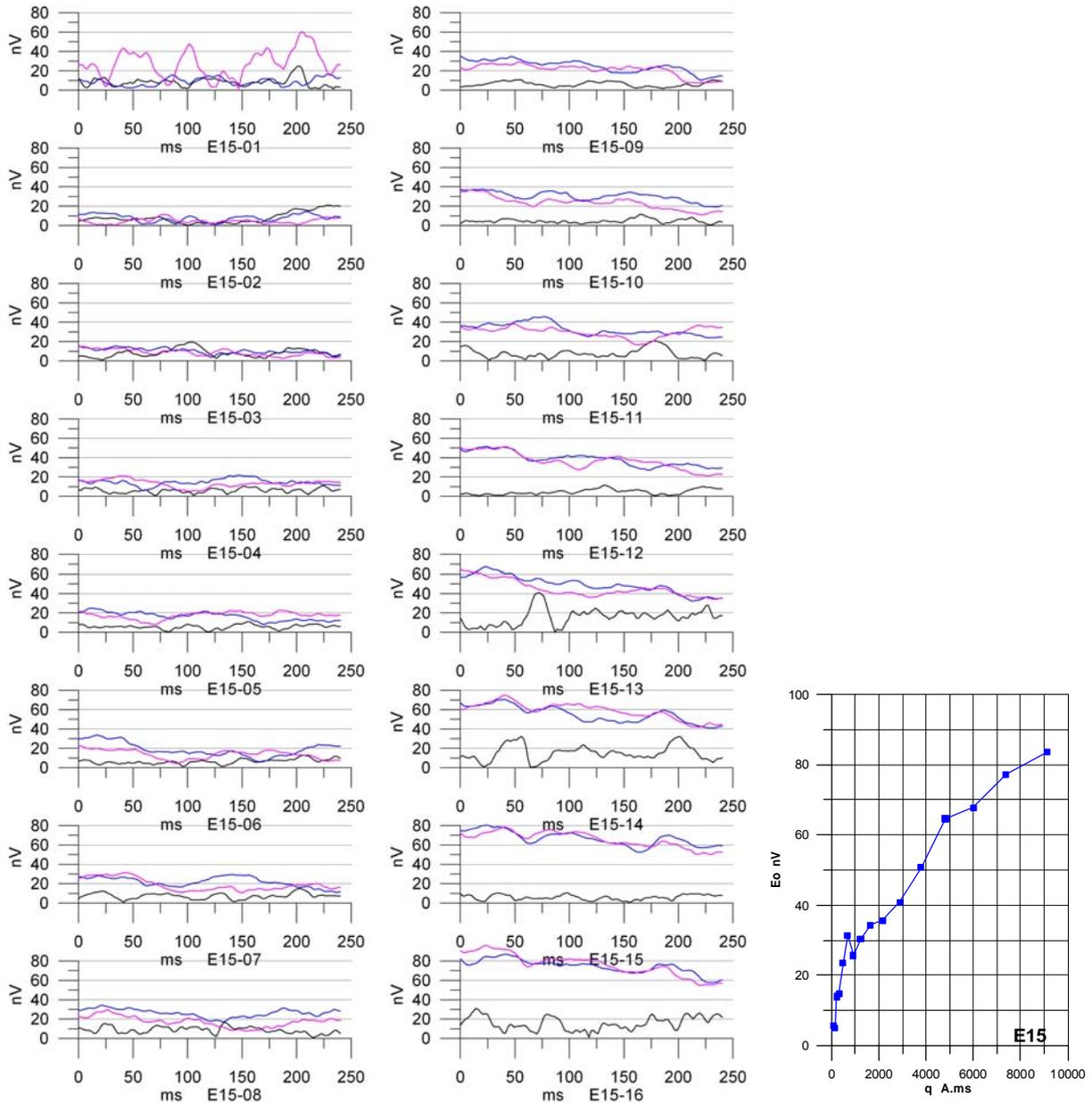


Fig. 72 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E15. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ indica la presencia de un acuífero potente, que se inicia a gran profundidad y cuyo fin no ha sido detectado por el SRM.

El ruido ambiental es estable, entorno a unos 150 nV. La frecuencia se mantiene con variación inferior a 1 Hz y la fase presenta un suave aumento, indicando estos parámetros la buena calidad de la señal registrada.

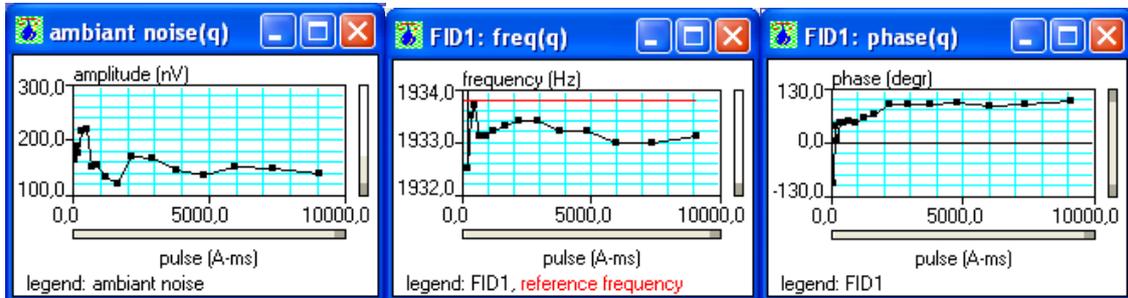
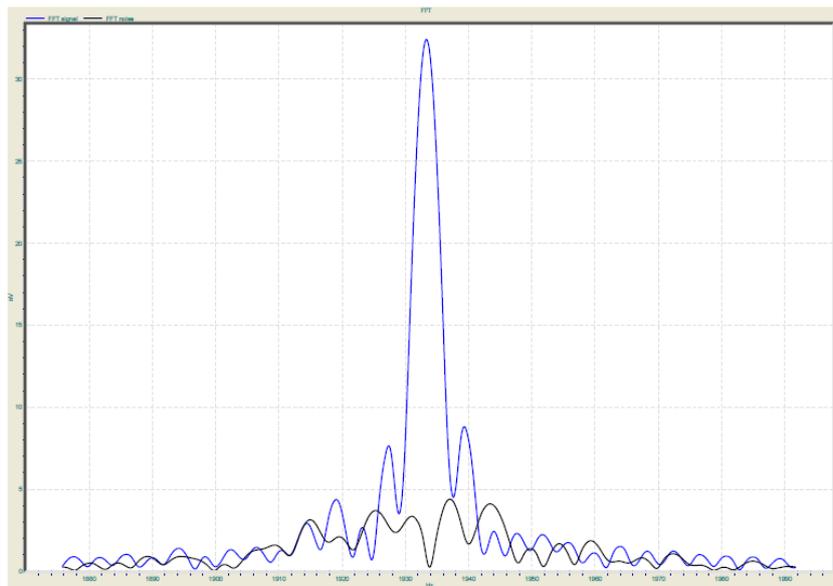


Fig. 73 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E15

Todos los espectros de la señal indican la presencia de resonancia, sin verse afectada por el ruido.



FFT E15-011

Fig. 74 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E15

En consecuencia, en este emplazamiento puede asegurarse la presencia de agua.

SRM E16

Situado a unos 200 m al Este del SRM E12, en Cuaternario sobre Keuper. Es muy análogo al E12, con curvas $e(t)$ de amplitud máxima de unos 400 nV (debido al uso de antena de 150 m, en vez de los 75 m usados en el E12), con claro decaimiento exponencial de amplio periodo. El ruido tras el stacking queda totalmente amortiguado.

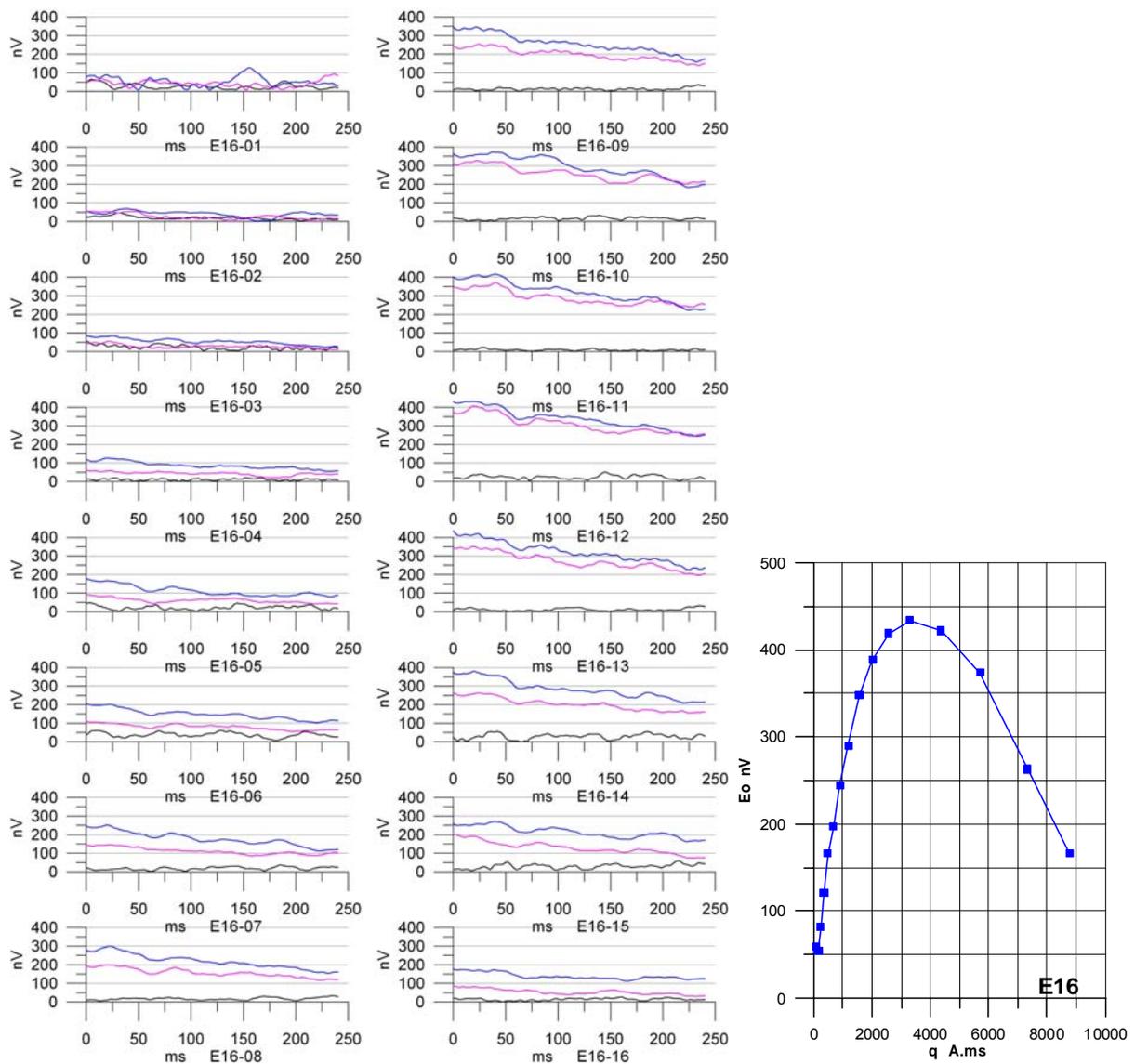


Fig. 75 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E16. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La función $E_0(q)$, resultado del sondeo, es indicativa de la presencia de un acuífero potente de profundidad media, cuyo fin queda bien localizado.

El ruido ambiental se mantiene en unos 600 nV. La frecuencia oscila menos de 1 Hz y la fase presenta suave tendencia a disminuir, indicando todo ello la buena calidad de los registros.

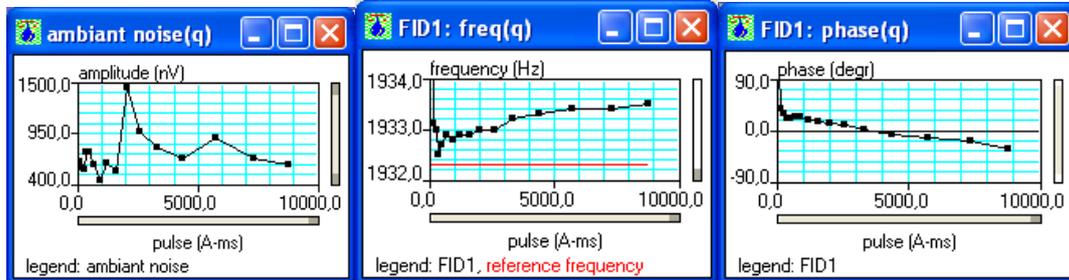
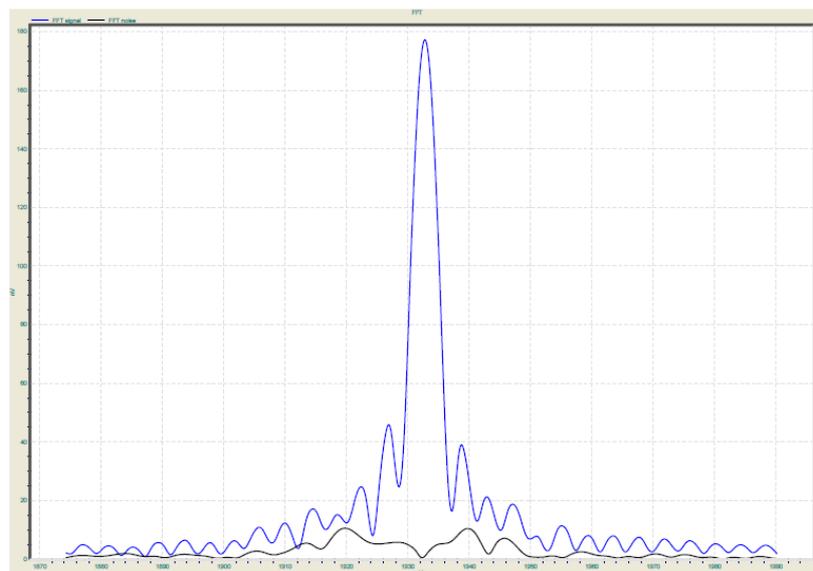


Fig. 76 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E16

Los espectros de la señal indican claramente la presencia de resonancia, con nula influencia del ruido.



FFT E16-07

Fig. 77 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E16

Se concluye por tanto que los registros son fiables y puede garantizarse la presencia de agua en este entorno.

SRM E17

Situado en el borde suroeste de la laguna pequeña, sobre Cuaternario suprayacente al Keuper. La amplitud máxima inicial de las curvas $e(t)$ llega a 200 nV, con clara apreciación de decaimiento exponencial de largo periodo. Se aprecia la superposición de un ruido armónico.

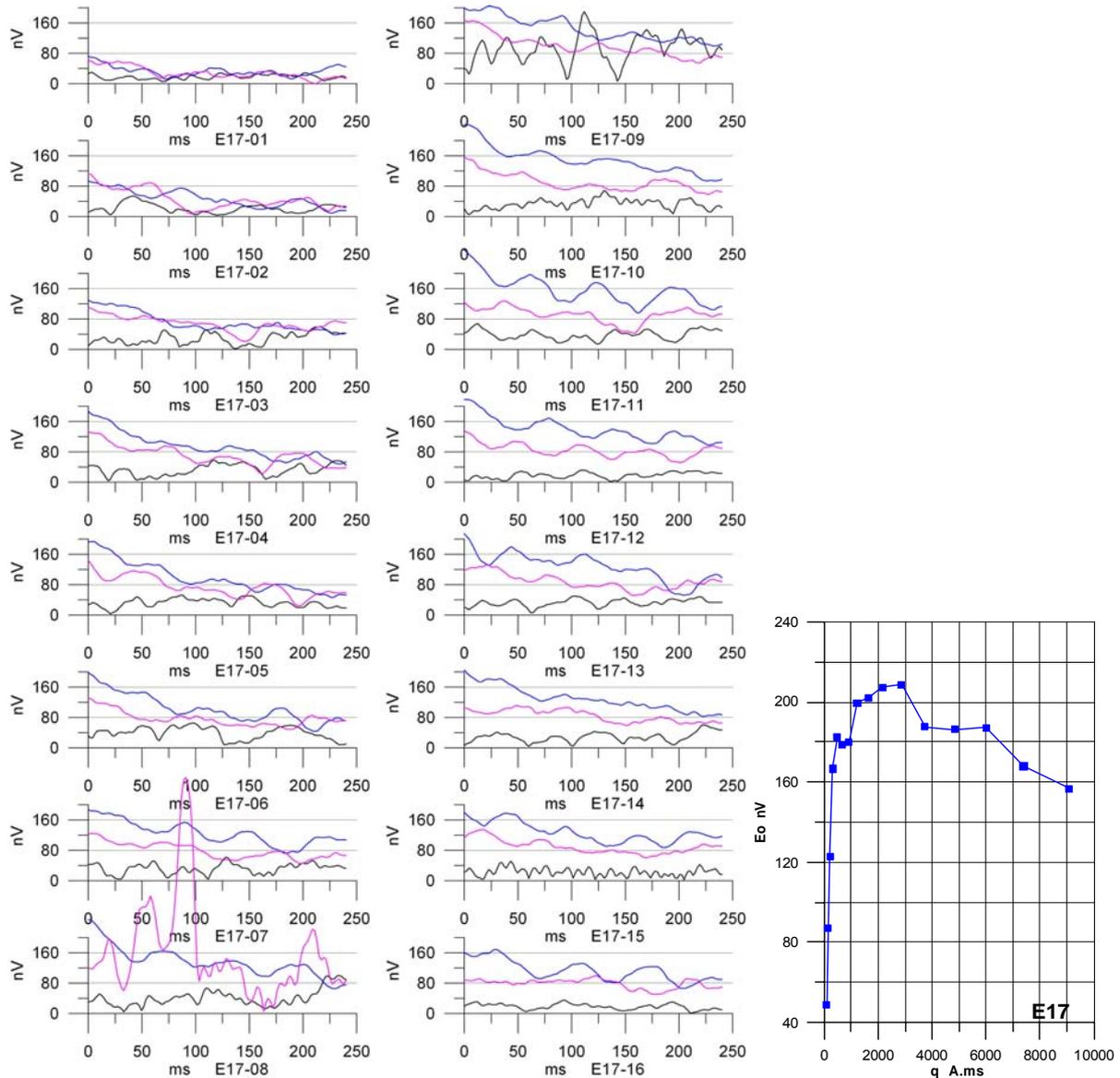


Fig. 78 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E17. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La curva $E_0(q)$ indica la presencia de un acuífero potente, cuyo inicio es muy superficial, sin que haya quedado adecuadamente registrado su límite inferior.

El ruido ambiente está entorno de los 400 nV. La frecuencia es muy estable, con variación inferior a 1 Hz y la fase presenta una variación suave, por lo que estos registros pueden considerarse de buena calidad.

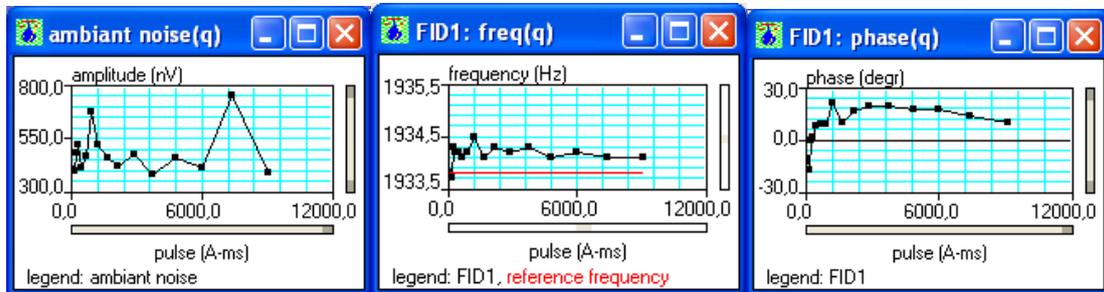
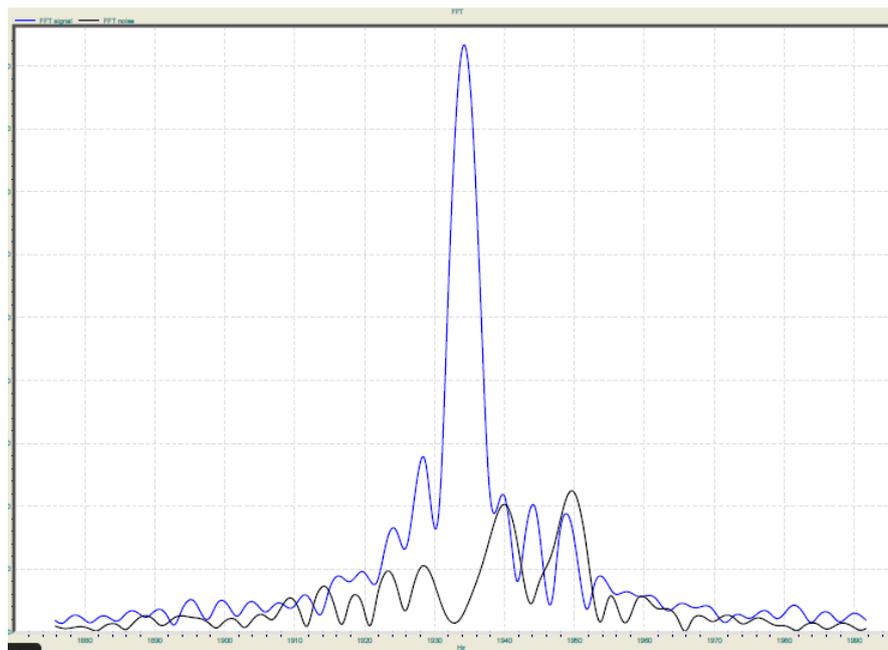


Fig. 79 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E17

Los espectros de la señal indican claramente la presencia de resonancia, así como la posible incorporación de un armónico de 50 Hz, por lo que convendría someterlo a un filtro Notch en proceso.



FFT E17-04

Fig. 80 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E17.

En este emplazamiento puede asegurarse por lo tanto la existencia de agua en el subsuelo.

SRM E18

Situado en el borde norte del estrechamiento de la laguna grande, sobre Cuaternario posiblemente suprayacente a calizas triásicas. Excelentes curvas $e(t)$, con valores iniciales máximos que llegan a los 400 nV y clara tendencia de decaimiento exponencial de amplio periodo. El ruido tras el stacking ha quedado totalmente amortiguado.

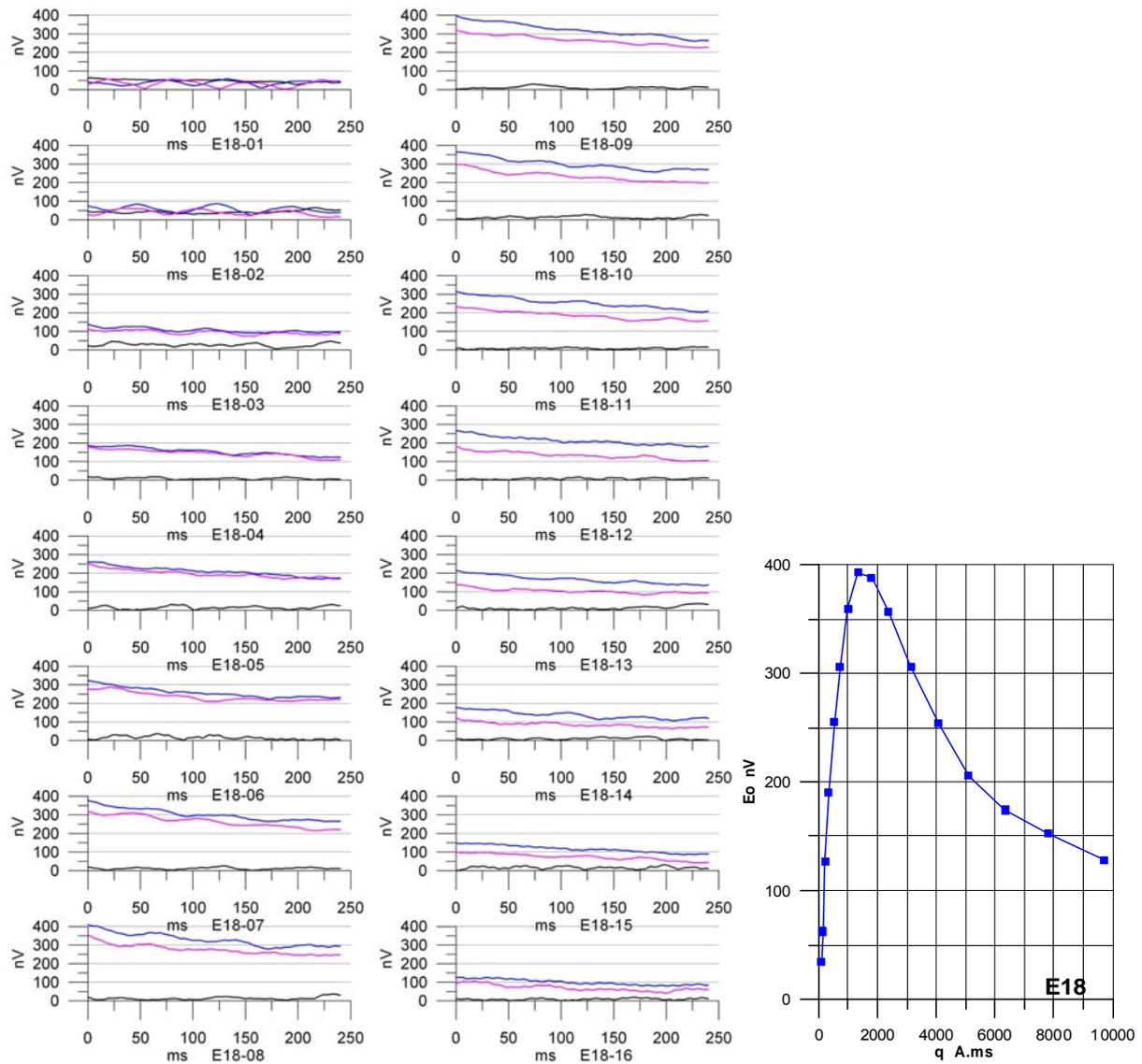


Fig. 81 Curvas de campo $e(t)$ del SRM E18. Línea negra: ruido; azul: señal del agua primer pulso; rosa: señal del agua segundo pulso. Curva $E_0(q)$ de campo.

La función $E_0(q)$ es indicativa de un acuífero que se inicia próximo a la superficie y alcanza una profundidad media, bien registrada en el sondeo, aunque el tramo final puede interpretarse como debido a la presencia de un segundo acuífero más profundo.

El ruido ambiental oscila entre 300 y 500 nV. La frecuencia varía menos de 1 Hz y la fase presenta un suave aumento, todo ello índice de curvas de buena calidad.

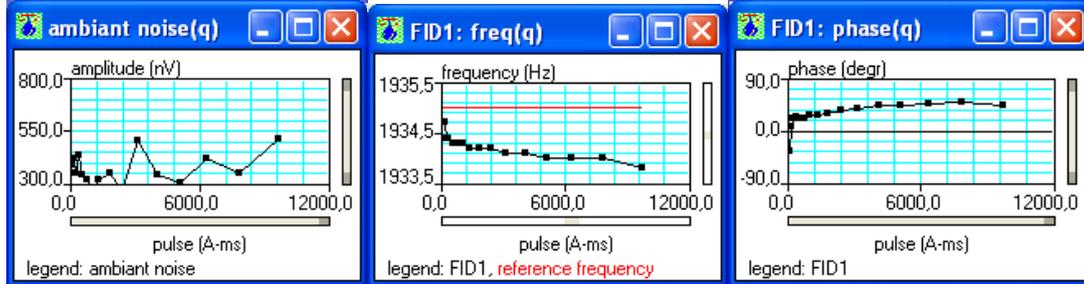
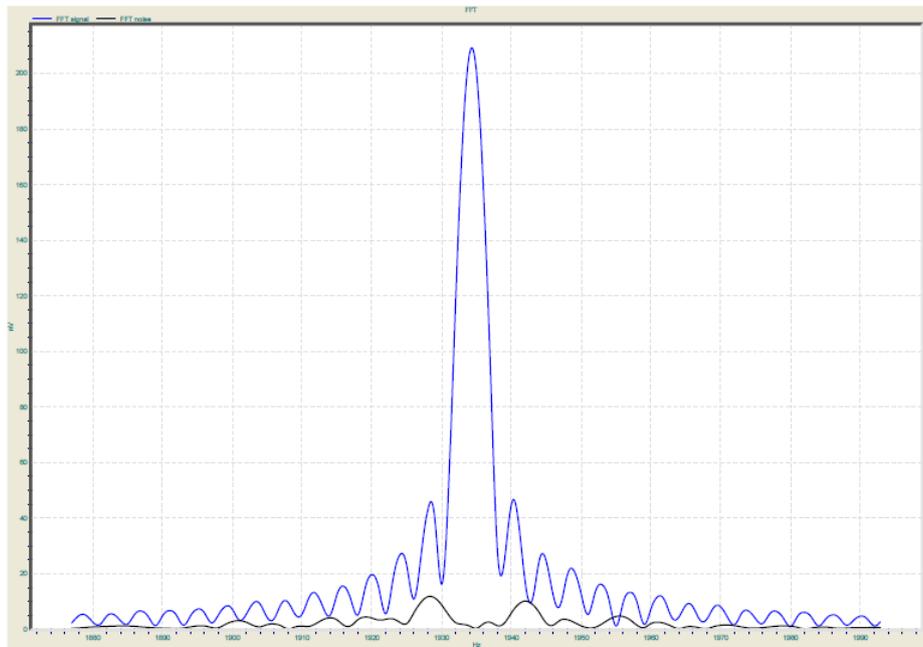


Fig. 82 Curvas de ruido, frecuencia y fase en función de la amplitud del pulso. SRM E18

Los espectros de la señal indican claramente la presencia de resonancia.



FFT E18-05

Fig. 83 Espectro de señal y ruido de alguna curva $e(t)$ del SRM E18

Puede concluirse que en este emplazamiento es segura la presencia de agua en el subsuelo.

7.2 Visión conjunta de los SRM

En la Figura 84 se muestra la “mejor” curva de decaimiento $e(t)$ de cada uno de los SRM efectuados entorno a las lagunas de Estaña y en el paraje de las Ollas (E4 y E5), empleando la escala de amplitud más adecuada de acuerdo con cada sondeo.

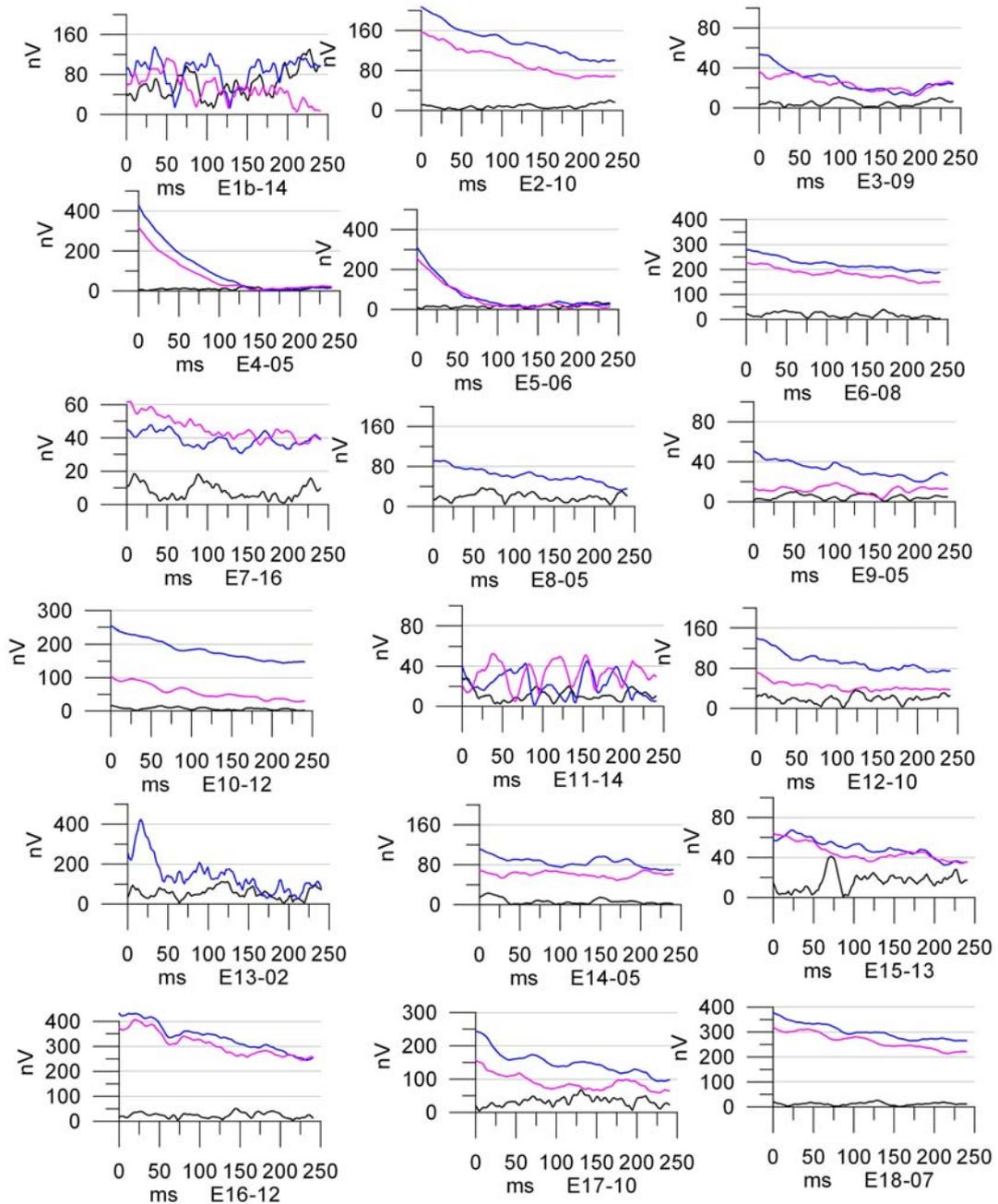


Fig. 84 Selección de las mejores curvas $e(t)$ de los SRM, con escala vertical variable.

Como se ha comentado en el análisis detallado de cada SRM, puede asegurarse la existencia de agua en el subsuelo en todos los emplazamientos, excepto en los E1-E13 (en el mismo lugar) y E11. A pesar del efecto del tamaño de la antenna sobre la amplitud de la señal, resulta evidente que la cantidad de agua (máximo valor de amplitud inicial E_0) varía notablemente con el emplazamiento, lo que puede apreciarse mejor al utilizar una escala única para todas las curvas de decaimiento (Figura 85).

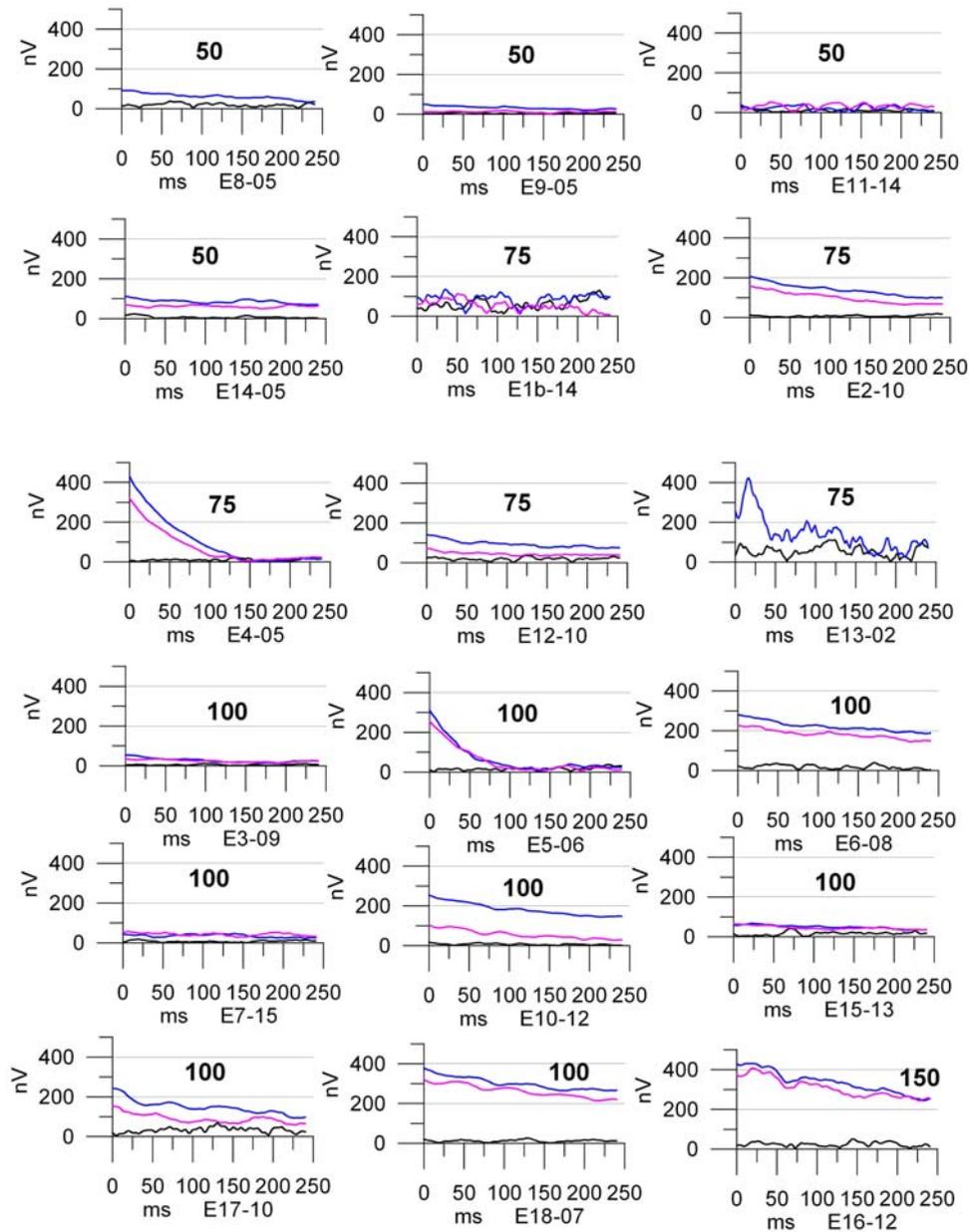


Fig. 85 Selección de las mejores curvas $e(t)$ de los SRM, con escala vertical única y clasificados por orden creciente de dimensiones de la antenna.

Aunque la mayor amplitud se ha registrado en el E16, con antena de 150 m, dentro de los registrados con antena de 100 m, 75 m o 50 m existen diferencias notables. Ello indica claramente que no se trata de un acuífero homogéneo; es también evidente que los SRM E4 y E5 reflejan una situación del agua subterránea totalmente diferente del resto de la zona, con un tiempo de decaimiento muy inferior, siendo la característica del resto el tener dicho tiempo muy elevado (decaimiento muy lento de la curva). La presencia de agua en los SRM E3, E7 y E15 es muy pequeña, al comparar sus curvas con otras obtenidas también con antena de 100 m de lado.

La frecuencia de la señal es el mejor parámetro para apreciar la existencia de resonancia. Su valor es de 1934 Hz para toda la zona, excepto para la de Ollas (SRM E4 y E5), donde es de 1927 Hz. La oscilación de la frecuencia con la profundidad (expresada por el momento del pulso en A.ms) se representa en las Figuras 86 y 87; ha sido muy buena, inferior a 1 Hz, para todos los sondeos, excepto para los E1-E13 y E11, que son los que se localizan más próximos al contacto con las calizas cretácicas (Figura 24), y para los registrados en la zona de Ollas, que muestran una oscilación superior a los 4 Hz.

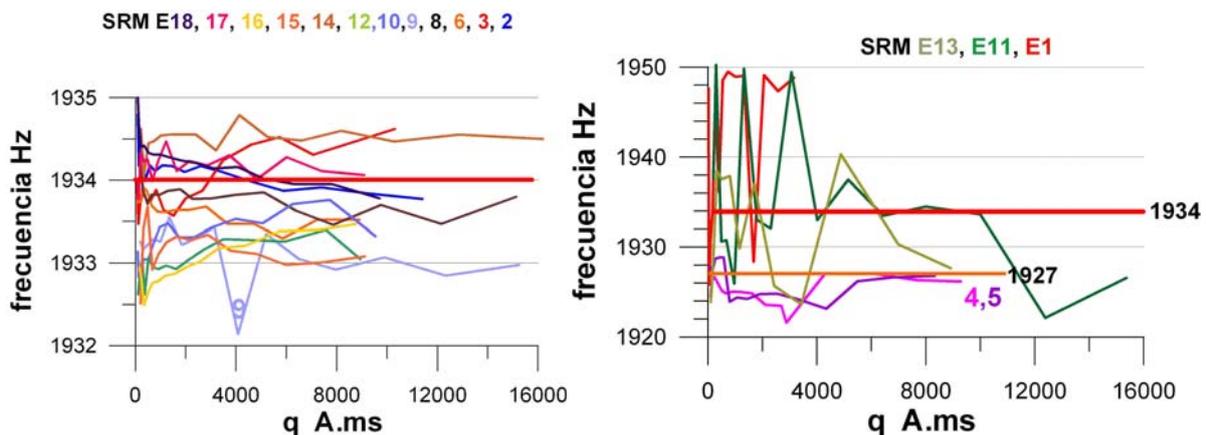


Fig. 86 Variación de la frecuencia para todos los SRM efectuados entorno de las lagunas de Estaña, en función del momento del pulso de excitación.

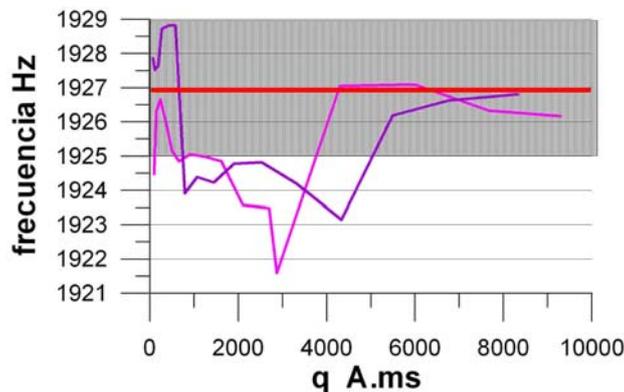


Fig. 87 Variación de la frecuencia para los SRM efectuados en la zona de Ollas

Mientras que en los emplazamientos E1-E13 y E11 la pérdida de frecuencia se debe casi con toda seguridad a la ausencia de señal de resonancia (no hay agua), en el caso de los E4 y E5 no puede decirse lo mismo, por lo que es posible que se debe a la variación del campo magnético, cuestión que será estudiada con mayor detalle en el capítulo 8 del presente Informe.

Respecto de la idoneidad de los emplazamientos en cuanto al ruido electromagnético ambiental (Figura 88), el peor ha resultado el E13-E1, debido a la proximidad de una línea eléctrica, dándose la circunstancia de que el día 20 (registro del E13) el ruido fue mucho más elevado que el día 12 (registro del E1), habiéndose empleado en ambos caso una antena en forma de "ocho" de 75 m de lado. Precisamente por la existencia de este ruido es por lo que se ha querido verificar, en la medida de lo posible, que la mala calidad de las curvas se debe a la no existencia de agua, con independencia del ruido. Según nuestra experiencia, con los parámetros de registro empleados (antena en ocho y 64-72 adiciones por pulso), de existir agua en el subsuelo se hubieran obtenido curvas de decaimiento a la frecuencia de resonancia, a pesar del ruido en este lugar

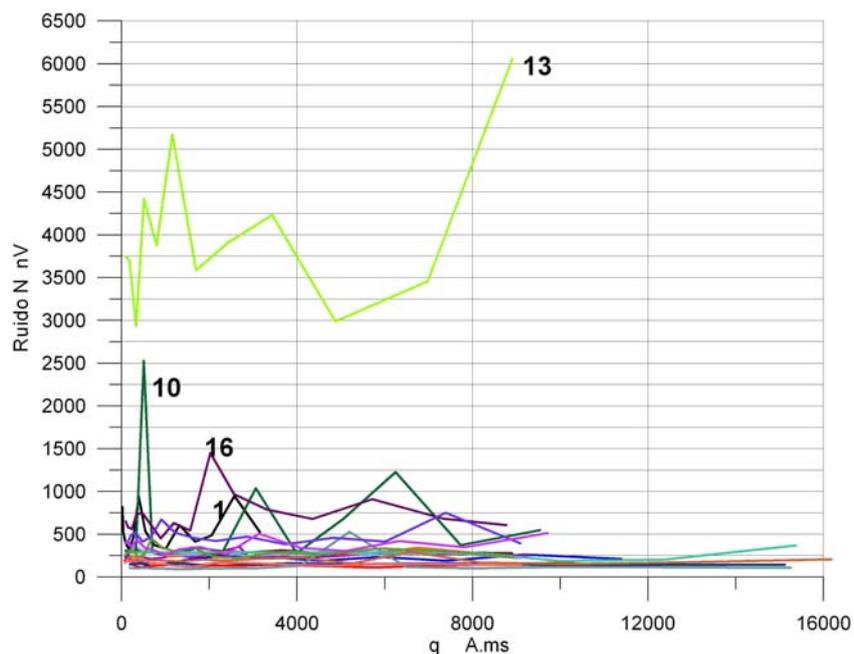


Fig. 88 Ruido ambiental de los SRM durante el tiempo de registro (expresado por el momento del pulso de excitación q)

En el resto de los emplazamientos el ruido ha sido inferior a 300 nV, salvo picos ocasionales.

Finalmente, otro parámetro de análisis de calidad y fiabilidad de los datos es la relación señal ruido, que se obtienen en el proceso de inversión de los mismos. Para su evaluación inicial se ha procedido a efectuar una inversión en campo, utilizando una matriz para un modelo geoelectrico único formado por

una capa de 40 m de potencia y 100 ohm.m, seguida de una capa de 40 ohm.m, obteniéndose los estimadores S/N y EN/IN mostrados en la Figura 89.

El valor de S es el valor medio de la señal, tras haber sido sometida a los filtros seleccionados en el proceso de datos, y extrapolada al origen $t=0$, y no siempre coincide con el valor calculado con los datos brutos durante el registro. Valores de S inferiores a 10 nV no son fiables con el equipo NUMIS PLUS utilizado. El valor de N es el promediado del ruido ambiental tras el proceso de stacking. Se consideran registros válidos para una interpretación cuantitativa los que se tienen un valor de la relación S/N superior a 2.

La relación EN/IN es un estimador del ruido ambiental externo tras el stacking y filtrado, respecto del ruido instrumental (del orden de 5 nV). Para valores de EN/IN=1 el SRM puede considerarse válido desde el punto de vista instrumental, incluso en ausencia de señal de resonancia. Si $EN/IN \geq 1$ y $S/N \leq 1$ no es seguro que se haya detectado señal (la amplitud de la señal es igual o inferior al nivel de ruido ambiental) y en este caso no es posible efectuar nada más que una interpretación cualitativa, sin garantía de que exista agua en el subsuelo. Si $S/N > 2$ no es necesario que EN/IN sea superior a 1 para poder efectuar una interpretación cuantitativa.

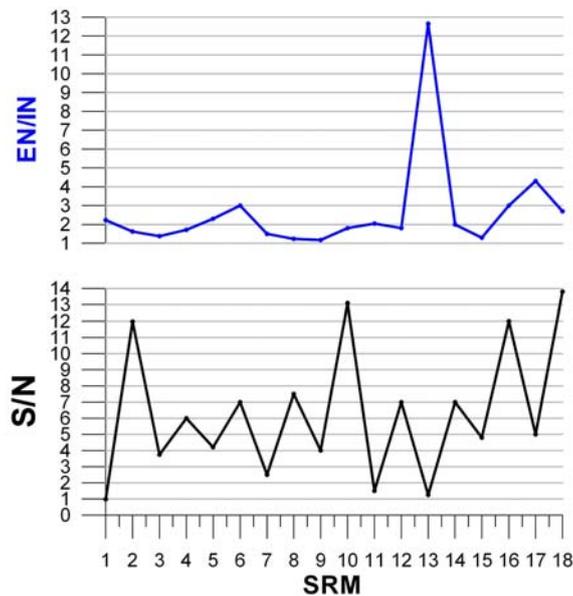


Fig. 89 Relación S/N y EN/IN de todos los SRM medidos.

Como puede apreciarse en la Figura 89, excepto los SRM E1, E11 y E13, todos los demás tienen un valor de S/N bastante elevado, incluso excelente (superior a 10) para los E2, E10, E16 y E18. El valor del indicador EN/IN es superior a 1 para todos los casos.

8 ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO

Para el cálculo de la frecuencia de resonancia se ha medido el campo magnético terrestre en cada emplazamiento de los SRM, efectuando para ello una pequeña prospección en el área de la antena utilizada. Para que la frecuencia de resonancia pueda considerarse única es necesario que en dicha área no existan variaciones o anomalías magnéticas superiores a 25 nT, ya que ello significaría un cambio en la frecuencia superior a 1 Hz, lo que podría dar lugar a que, a pesar de existir agua, los protones de Hidrógeno no fueran capaces de ser excitados por la frecuencia del pulso de emisión. En la Figura 90 se representa la amplitud de campo magnético total para todos los SRM, que oscila entorno de las 45420 nT, excepto en el E4 y E5, donde disminuye a unas 45260 nT.

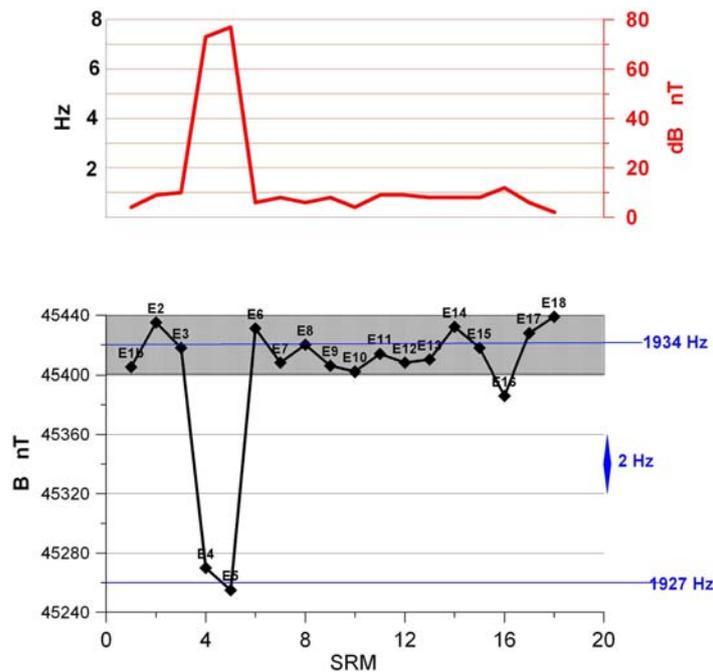


Fig. 90 Campo magnético terrestre B y su variación dB en los lugares de medición de los SRM

Las variaciones observadas dentro de cada zona (Figura 90, gráfico dB) son inferiores a 10 nT, excepto nuevamente en los SRM E4 y E5 donde llega a casi 80 nT, lo que dará lugar a variaciones en la frecuencia de hasta 7 Hz.

En el área de SRM E4 el campo magnético varía desde un valor mínimo al Sur de unas 45220 nT (equivalente a 1925.5 Hz) hasta 45300 nT (1929 Hz) en el extremo nororiental. (Figura 91), habiéndose adoptado el valor de 45270 nT para toda la zona, y emitiendo por tanto un campo de excitación de 1927.6 Hz.

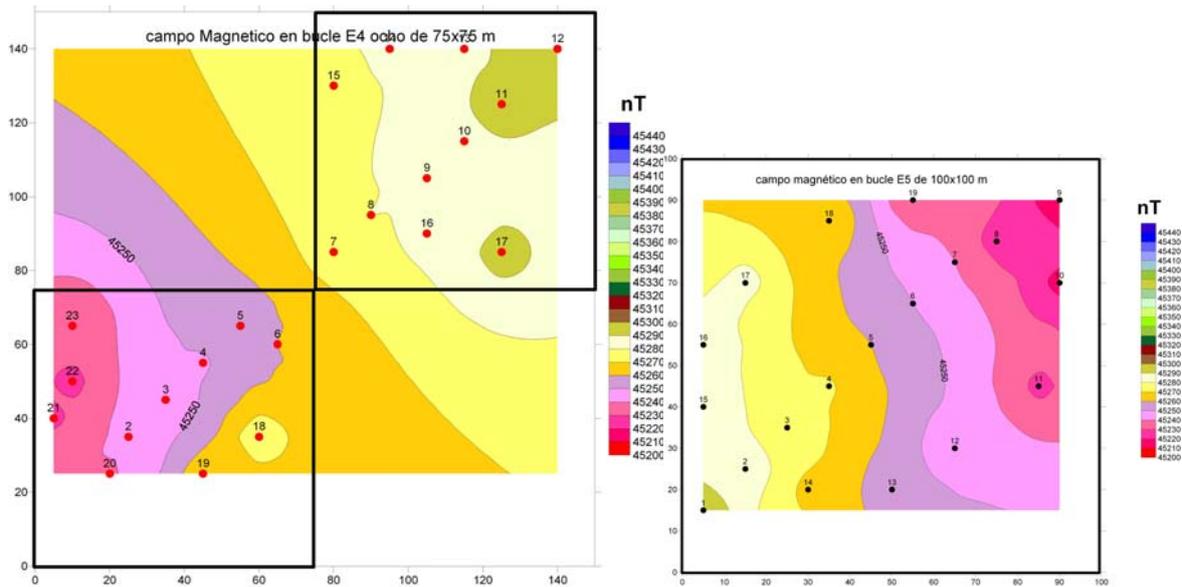


Fig. 91 Esquema del campo magnético en el interior de las antenas de los SRM E4 y E5.

En el área de SRM E5 el campo magnético varía desde un valor máximo al Sur de unas 45290 nT (equivalente a 1928.5 Hz) hasta 45213 nT (1925 Hz) en el extremo nororiental. (Figura 91), habiéndose adoptado el valor de 45255 nT para toda la zona, y emitiendo por tanto un campo de excitación de 1927 Hz. En el conjunto de la zona de Ollas, en el área comprendida por ambas antenas se localiza una anomalía de unas 80 nT, con su máximo entre ambas antenas.

Dada la presencia de rocas magnéticas en el área (ofitas o diabasas), se ha hecho un pequeño estudio de mayor detalle para conocer si la diferencia de campo entre el entorno de las lagunas y la zona de Ollas, así como la anomalía de esta última zona puede ser motivada por la presencia de ofitas. En la Figura 92 se representa un esquema (dados los pocos puntos de medición no puede ser considerado un mapa de anomalías) de la situación del campo magnético en la totalidad del área prospectada, basado en los valores medios de las lecturas del magnetómetro efectuadas en cada emplazamiento. La zona de las lagunas se caracteriza por un ligero máximo en las estaciones E2, E14, E6 y E18, con variaciones suaves hacia el Sur, que se convierten en un fuerte gradiente para poder trazar el mínimo de las estaciones E4-E5, próximas a un afloramiento de ofitas. La presencia de rocas magnéticas debería de producir la situación opuesta, es decir: la zona de las estaciones E4 y E5 debería de suponer un máximo o incremento de campo magnético respecto de la zona de las lagunas.

Para verificar el comportamiento de las ofitas se ha medido un perfil de magnetometría sobre un afloramiento situado al noreste de las lagunas (Figura 93). El campo magnético en dicha zona se sitúa entre las 45200 nT y las 45350 nT, es decir, dentro del mismo rango que la zona de Ollas, y por lo tanto

por debajo del campo magnético en la zona de las lagunas, pero es evidente que las ofitas producen una notable anomalía de más de 1000 nT.

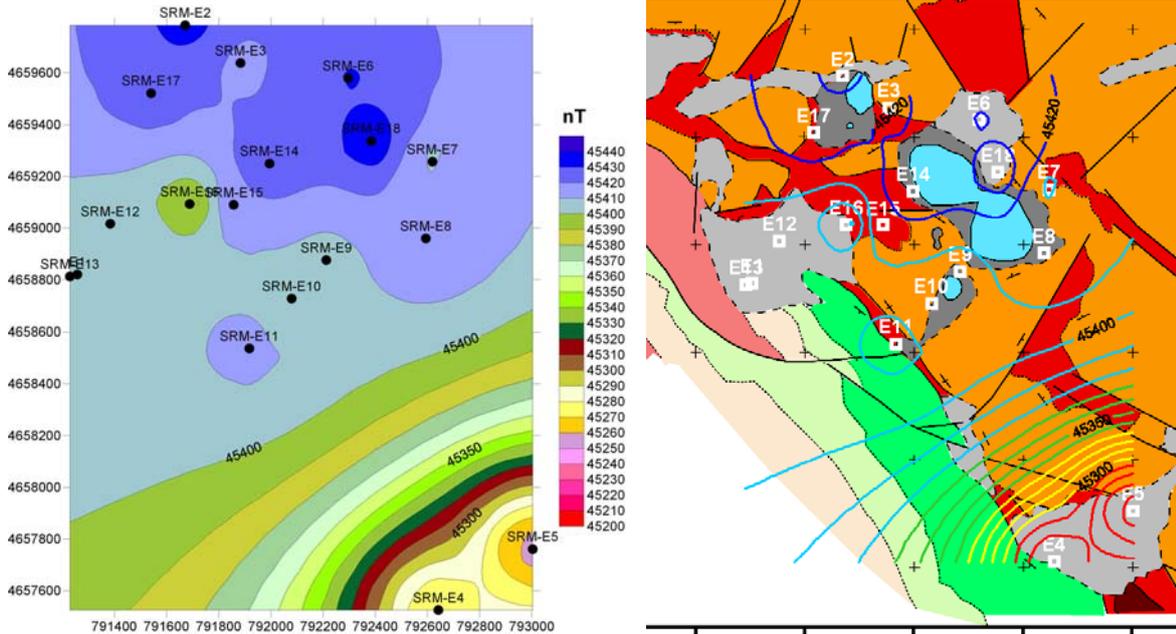


Fig. 92 Esquema del Campo magnético en la zona de las mediciones y su superposición al mapa geológico.

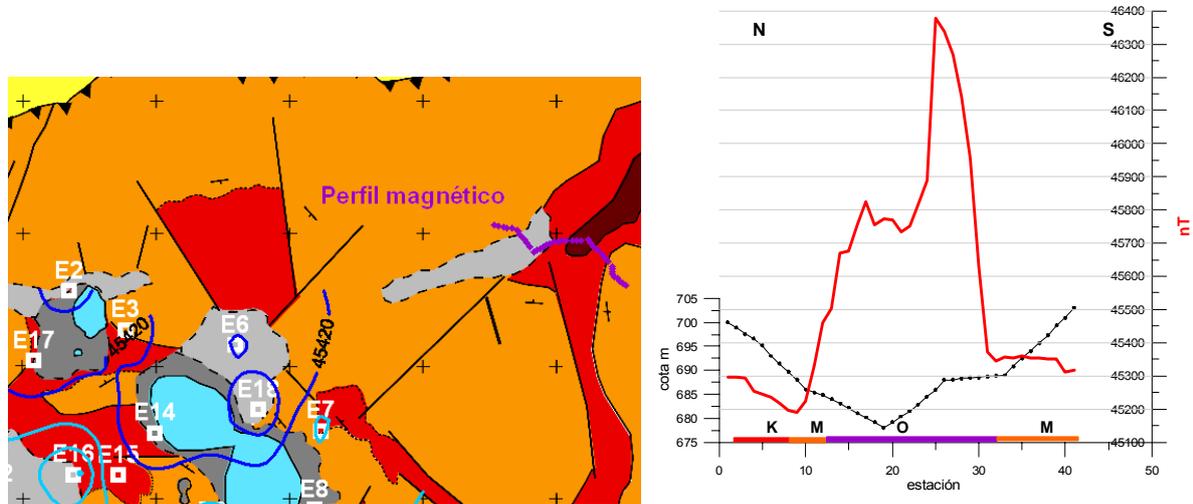


Fig. 93 Perfil magnético medido sobre un afloramiento de ofitas situado al noreste de las lagunas. La litología indicada en el perfil se basa en el reconocimiento de campo efectuado durante su medición.

Estos resultados ponen de manifiesto que, por una parte, en la zona de las lagunas el campo geomagnético es unas 160 nT superior al resto del área considerada, y por otra que el máximo de 80 nT de la zona de Ollas no es muy probable que se deba a la presencia de Ofitas, que producen anomalías de mucha mayor amplitud. (Estas anomalías serán nuevamente estudiadas en el capítulo 15.2).

9 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE INVERSIÓN

Como ya se ha indicado en el capítulo 5 (Introducción al método SRM), el proceso de inversión tiene la finalidad de convertir los resultados finales de las mediciones de campo de un SRM, funciones $E_0(\mathbf{q})$ y $T_d(\mathbf{q})$, en los valores $w(\mathbf{z})$, $T_d(\mathbf{z})$, $k(\mathbf{z})$ y $T(\mathbf{z})$, donde

- E_0 es la amplitud máxima inicial de la señal exponencial del agua $e(t)$ en nV
- T_d es el tiempo de decaimiento de $e(t)$ en ms
- \mathbf{q} es el momento del pulso en A.ms
- w es el % de agua libre
- k es la permeabilidad
- T es la transmisividad
- \mathbf{z} es la profundidad

Para ello, se parte de las funciones $e(t)$ medidas en campo, siendo necesario definir una serie de parámetros (ver Figura 19):

- matriz de inversión
- tiempo a tomar de la función $e(t)$
- filtros a aplicar para mejorar la relación Señal/Ruido (S/N)
- eliminación de lecturas dudosas
- parámetro de regularización
- número de capas del subsuelo
- constante de calibración para obtención de la permeabilidad

9.1 Parámetros determinados a partir del análisis de los datos

El objetivo fundamental del empleo de los Sondeos de Resonancia Magnética en el presente estudio entorno de las lagunas de Estaña es el diagnóstico lo más fiable posible de la existencia de agua en el subsuelo (interpretación cualitativa) a fin de establecer los límites hidrogeológicos y confirmar el origen subterráneo de las lagunas; sin embargo, para poder cumplir el objetivo conjunto de las actividades geofísicas de determinar el grado de conexión (hidráulica) existente entre los materiales triásicos y el acuífero principal del Sinclinal de Estopiñan (Cretácico), es también necesario efectuar una evaluación fiable de la distribución del agua en el subsuelo.

Para el primer objetivo se ha llevado a cabo en el capítulo 7 (Análisis de los datos de campo de los SRM) un minucioso análisis de los datos de campo: ruido ambiental y tras el stacking, comportamiento de la frecuencia $f(q)$, comportamiento de la fase, comportamiento de las curvas $e(t)$ y de sus transformadas

FFT al dominio de las frecuencias (espectros) y tipología de las curvas $E_0(q)$, a fin de garantizar la calidad de los datos de campo y poder deducir la existencia de señal proveniente del agua del subsuelo. Esto ha permitido además evaluar el alcance previsible de la interpretación cuantitativa de los SRM medidos.

Del análisis de los datos de campo se ha deducido para cada SRM los parámetros de proceso:

- Tiempo a tomar para el proceso de la función $e(t)$
- Tipo de filtro a aplicar
- Eliminación de valores $E_0(q)$ dudosos

Otros parámetros han sido objeto del estudio específico que se describe a continuación.

9.2 Influencia del modelo geoelectrico en los resultados de la inversión

Cómo ya se mencionó anteriormente, para efectuar la inversión se precisa calcular previamente una matriz (equivalente al modelo inicial del subsuelo) basada en los siguientes datos:

- tipo y dimensiones de la antena utilizada
- inclinación e intensidad del campo geomagnético
- profundidad máxima de investigación estimada
- máximo momento de los pulsos de emisión
- modelo geoelectrico del emplazamiento

El tipo y dimensiones de antena para cada SRM efectuado, así como la inclinación e intensidad de campo magnético son datos conocidos. La profundidad máxima de investigación puede hacerse igual al lado de la antena utilizada, a falta de otro criterio fundamentado en la experiencia del lugar de trabajo. La máxima amplitud del momento de emisión puede conocerse de los datos de campo. Para establecer un modelo geoelectrico se precisa disponer de las adecuadas mediciones, habiendo utilizado en ese caso la información obtenida en los Perfiles Eléctricos.

A fin de evaluar el error cometido en caso de que alguno de estos parámetros esté lejos de su valor real, se han calculado diversas matrices y se han aplicado a la inversión de datos reales de campo de esta campaña.

En primer lugar van a utilizarse datos muy extremos, reflejados en las matrices A, B y C de la Tabla 6. Se ha elegido el SRM E18 (con valores de calidad $S/N=14$ $EN/IN=2.7$), cuyas condiciones reales de medición y modelo se parecen más a los indicados para la matriz C, siendo las otras dos matrices desviaciones importantes de la situación real. Los datos de campo de este sondeo se han invertido

tomando 200 ms, filtro RA de 15 ms, parámetros de regularización fijos a 1000 y 3 respectivamente. Los resultados de aplicar las diferentes matrices se indican en la Figura 94. El empleo de los parámetros C consiguen el mejor ajuste de la curva teórica a las mediciones (errores del 2.6 % y 8 % para FDI1 y FDI2 respectivamente), aunque los errores utilizando los casos A y B no son mucho mayores (4 % y 10%). Sin embargo las distribuciones de agua en el subsuelo si que presentan diferencias.

matriz	B nT	f Hz	i °	antena	Prof. max. m	Q max. A.ms	modelo
A	44622	1900	65	Cuadr.100	500	5000	500m-2000ohm.m
B	44622	1900	65	Cuadr.100	100	5000	100m-2000 ohm.m
C	45420	1934	55	Cuadr.100	100	16000	100m-30 ohm.m

Tabla 6. Matrices A y B con parámetros muy alejados de los realmente aplicables al SRM E18

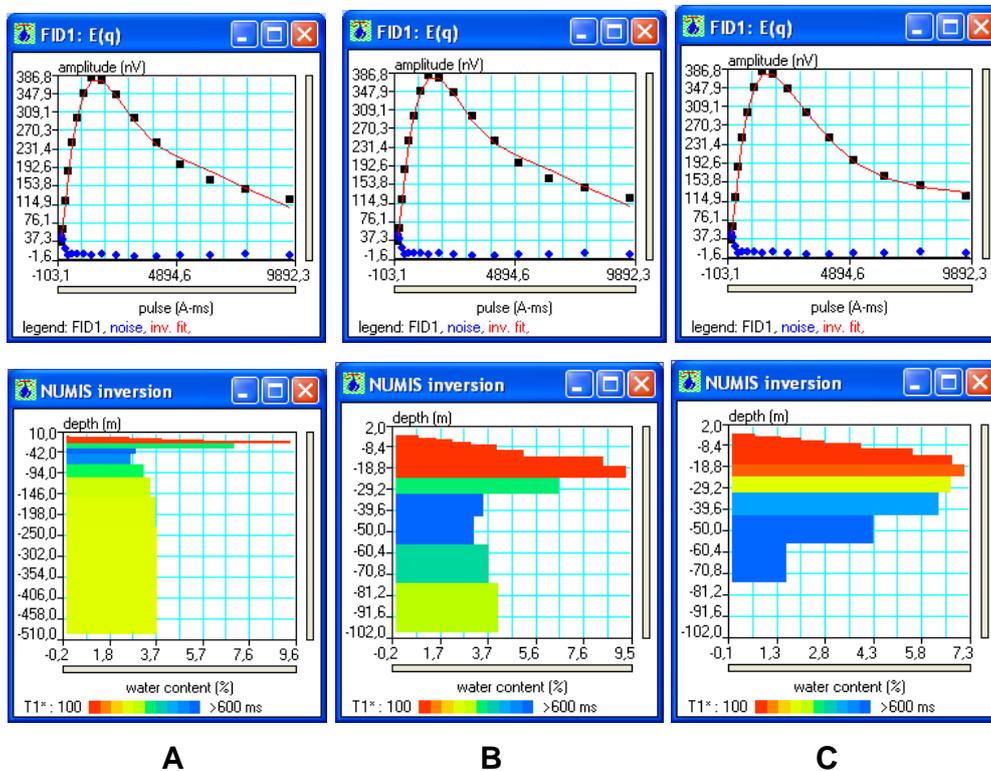


Fig. 94 Resultado de aplicar matrices de inversión con grandes desviaciones (A y B) respecto de la más adecuada (C).

El dar un valor exagerado a la profundidad de exploración (caso A) lo único que consigue es dar a la última capa una potencia que será irreal; a no ser que se disponga de experiencia anterior en el lugar, no debe hacerse este parámetro mayor que la longitud del lado de la antena utilizada. Respetando la profundidad máxima razonable (caso B) las modificaciones exageradas de los otros parámetros, sobre todo del modelo de resistividad (pasar de 30 ohm.m a 2000 ohm.m) suponen también diferencias importantes en la profundidad supuestamente alcanzada y distribución del agua, que es mayor en

terrenos resistivos. Sin embargo, aparte de estas diferencias, la solución dada a los primeros 70-80 m de profundidad es prácticamente la misma en las tres inversiones.

Para analizar más en detalle las desviaciones producidas por diversos modelos geoelectricos que puedan ser razonables para un sitio determinado, se han calculado otras matrices de inversión con los datos de la Tabla 7 (para todas ellas se ha tomado como profundidad máxima 100 m, lado de la antena):

	frec. Hz	inc.º	Qmax A.ms	antena	modelo
a	1934	55	10000	cuadrado-100	30 ohm.m
b	1934	55	16000	cuadrado-100	30 ohm.m
c	1927	55	16000	cuadrado-100	30 ohm.m
d	1934	55	16000	cuadrado-100	20-100ohm.m+30ohm.m
e	1934	45	10000	cuadrado-100	40-100ohm.m+40ohm.m
f	1934	55	10000	cuadrado-100	50-100ohm.m+30ohm.m
g	1934	55	16000	cuadrado-100	60-30ohm.m+5ohm.m

Tabla 7. Matrices con parámetros poco desviados respecto de los aplicables al SRM E18 (modelo a)

Todas ellas se han aplicado a la inversión del SRM E18, procesadas con $t=200$ ms, filtro RA=15 ms, $pr_1=1000$, $pr_2=3$, 16 capas, cuyos resultados se encuentran en la Figura 95. El error de ajuste ha sido en todos los casos el mismo (2.6-2.9 % para FDI1 y 8% para FDI2).

- Entre las matrices a y b sólo se ha modificado la amplitud del momento máximo, lo que no repercute nada en el resultado.
- Entre las matrices b y c sólo se ha modificado la frecuencia, en 7 Hz, sin que se aprecie ninguna diferencia.
- Entre las matrices b y d sólo se ha modificado el modelo geoelectrico en los primeros 20 m, introduciendo un resistivo de 100 ohm.m; el resultado es prácticamente el mismo (insignificativa disminución de la porosidad) que el del modelo a.
- Las matrices siguientes, e y f, suponen aumentar la potencia del resistivo inicial a 40 m y 50 m respectivamente. Se observa que mientras el modelo e produce variaciones (aunque muy pequeñas) en el contenido en agua, en la profundidad y en la constante de tiempo (permeabilidad), la matriz f, con mayor potencia de resistivo produce un resultado análogo al modelo a. En consecuencia, la variación en el modelo e es posible que se deba a la modificación de la inclinación de campo en 10° , y no a la variación de resistividad de 30 a 100 ohm.m.
- Finalmente, la matriz g introduce un terreno muy conductor a partir de los 60 m, lo que tampoco varía los resultados.

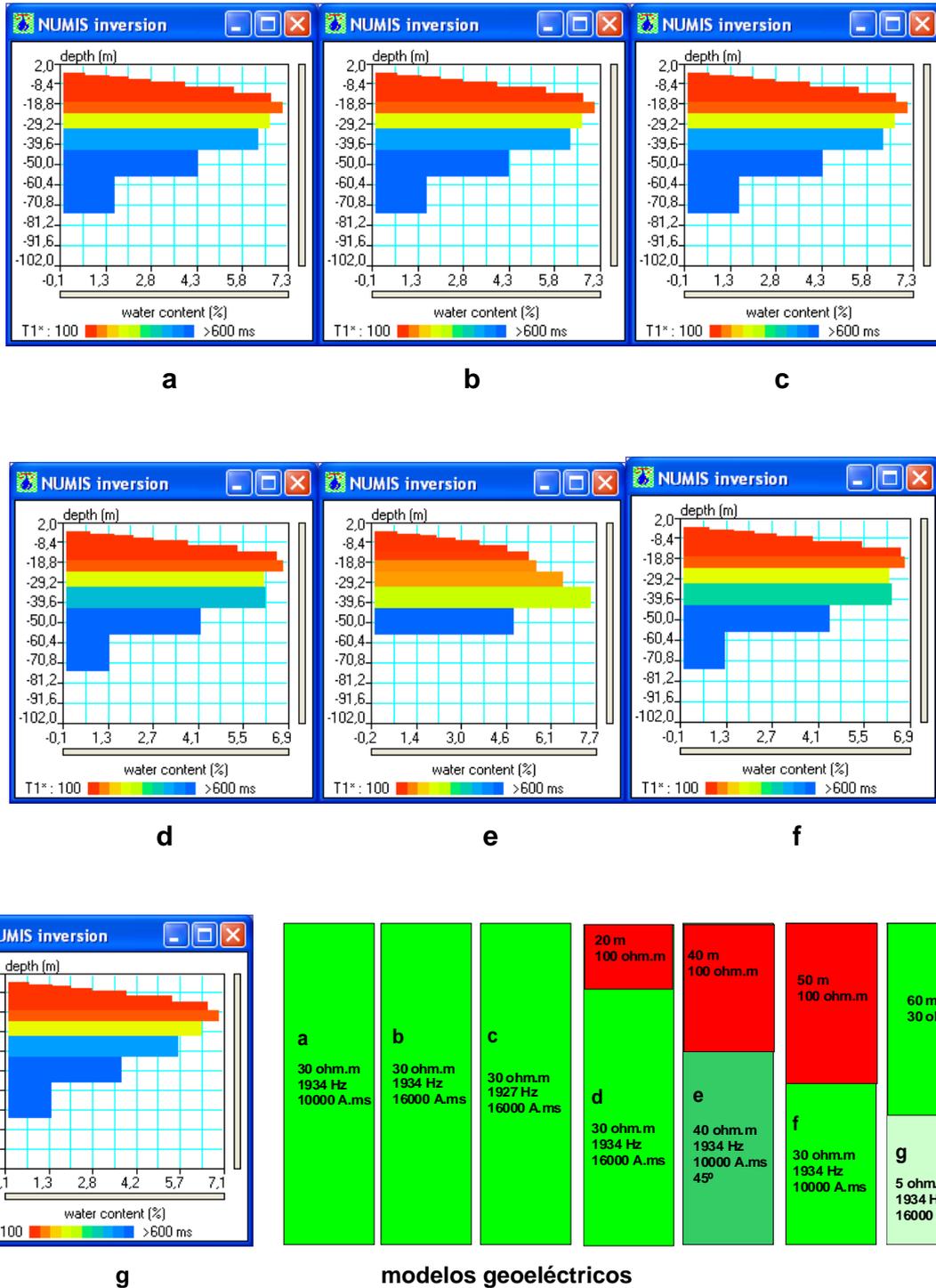


Fig. 95 Resultado de utilizar diferentes modelos geoelectricos en la inversion del SRM E18

Otro ejemplo se da el la Figura 96, donde se presentan los resultados de la inversion del SRM E2 utilizando un modelo geoelectrico de una sola capa de 100 ohm.m (izquierda), e introduciendo una segunda capa de 40 ohm.m a partir de los 40 m de profundidad (derecha).

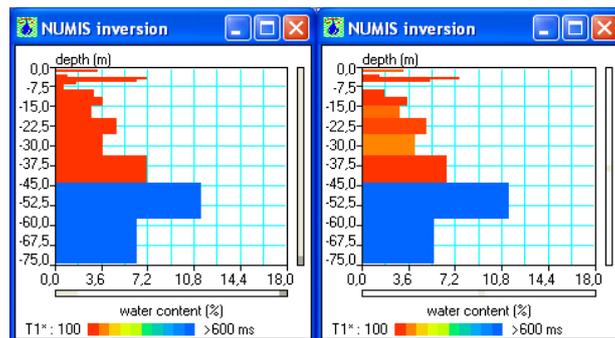


Fig. 96 Resultado de aplicar dos modelos geoelectricos ligeramente distintos al SRM E2

En conclusión, hemos querido demostrar que el modelo geoelectrico adoptado en el cálculo de la matriz de inversión no produce modificaciones significativas en la distribución de agua en el subsuelo y en el valor de la constante de tiempo que se obtienen en la inversión de los datos, siempre que no se apliquen parámetros muy erróneos (absurdos), y que por lo tanto no es un elemento crítico en la solución encontrada. Es decir, que posibles desviaciones en la inversión de los Perfiles Eléctricos no van a repercutir en la calidad de la inversión de los SRM.

9.3 Cálculo de las matrices de inversión para los SRM de Estaña

De acuerdo con la situación de los SRM sobre los Perfiles Eléctricos (Figuras 12 a 15) se han definido cinco modelos geoelectricos:

Modelo 1: SRM 7, 11, 12, 15,16, 17

Possible Cuaternario	20 m	100 ohm.m
Possible Keuper		30 ohm.m

Modelo 2: SRM 1, 13

Possible Cuaternario	20 m	50 ohm.m
Possible Cretácico		200 ohm.m

Modelo 3: SRM 2

Possible Cuaternario o Muschelkak	100 ohm.m
-----------------------------------	-----------

Modelo 4: SRM 4, 5, 6, 8, 9, 10,14, 18

Possible Cuaternario, Keuper o Muschelkalk	30 ohm.m
--	----------

Modelo 5: SRM 3

Possible Keuper	60 m	30 ohm.m
		5 ohm.m

La inclinación de campo magnético se ha tomado igual a 55°; la amplitud máxima para el pulso se ha hecho igual a 16000 A.ms; la máxima profundidad se ha tomado igual a lado de la antena considerada en cada caso, y la frecuencia (intensidad de campo magnético) se ha hecho igual a la medida en cada entorno. Puesto que se han empleado diversos tipos de antenas, su combinación con los modelos geoelectricos ha dado lugar a las siguientes matrices para la inversión:

matrices inversión SRM Estaña

modelo geoelectrico	Frecuencia Hz	antena	Nombre de la matriz	SRM
1	1934	ocho-75	1-8-75.mrm	E12
1	1934	cuadrado-50	1-C-50.mrm	E11
1	1934	cuadrado-100	1-C100.mrm	E7, E15, E17
1	1934	cuadrado-150	1-C150.mrm	E16
2	1934	ocho-75	2-8-75.mrm	E1, E13
3	1934	cuadrado-75	3-C75.mrm	E2
4	1934	cuadrado-50	4A-C50.mrm	E8, E9, E14
4	1934	cuadrado-100	4A-C100.mrm	E6, E10, E18
4	1927	ocho-75	4B-8-75.mrm	E4
4	1927	cuadrado-100	4B-C100.mrm	E5
5	1934	cuadrado-100	5-C100.mrm	E3

Tabla 8. Matrices calculadas para la inversión

9.4 Efecto del parámetro de regularización

El parámetro utilizado para optimizar el ajuste entre modelo teórico y datos medidos, o parámetro de regularización pr , puede dar lugar a modificaciones importantes en la solución de distribución de agua con la profundidad. En el siguiente ejemplo (Figura 97), aplicado también al SRM E18 se muestra el efecto de su variación entre límites amplios:

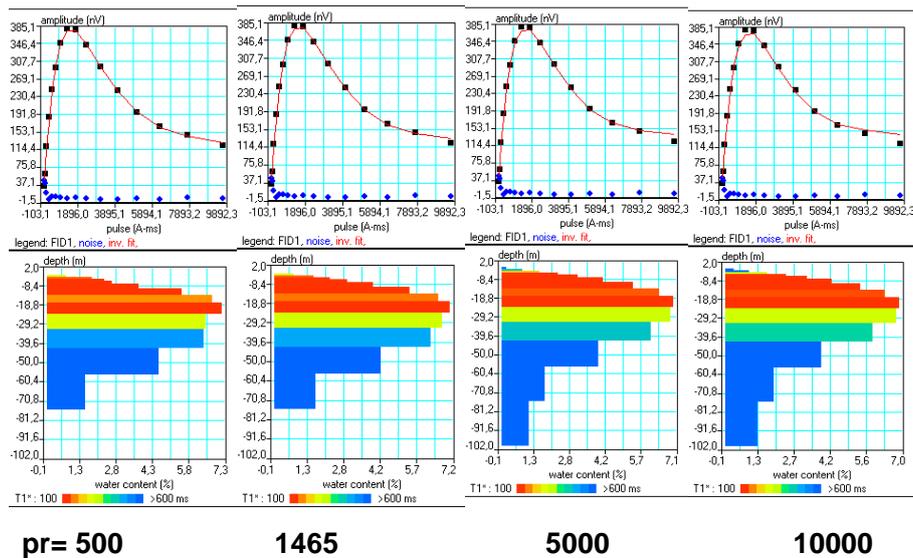


Fig. 97 Efecto del valor del parámetro de regularización pr en la solución del SRM. El valor 1465 es el adoptado automáticamente en los cálculos de inversión, con criterios de optimización matemática.

Los errores de ajuste son los mismos en todos los casos, pero el aumento de pr produce una suavización o menores diferencias entre el contenido en agua de las sucesivas capas, que se reparte en mayor número de capas, aunque con menor porosidad, produciendo los efectos de equivalencia y dando soluciones con agua a cada vez mayor profundidad (no obstante, este aumento de la profundidad no es siempre el mismo, dependiendo del sondeo considerado). Al no disponerse de mayor información sobre la geometría de los acuíferos, el parámetro de regularización de los valores de señal de ambos pulsos (FDI1 y FDI2) se ha dejado en ajuste automático, que optimiza la solución matemática, como es el caso del valor 1465 de la Figura 97, donde se puede apreciar que la existencia de agua a mayor profundidad ($pr=5000$ o mayor) ajusta peor los últimos puntos de la curva $E_0(q)$, lo que significa que las medidas no reproducen tan fidedignamente la existencia de agua a esas profundidades.

9.5 Efecto del número de capas

Debido al principio de equivalencia, la solución $w(z)$ obtenida en un proceso de inversión de SRM no es única, sino que varias combinaciones de contenido en agua w y de potencia de capas dz dan lugar al mismo ajuste entre mediciones y modelo. En cualquier caso, la cantidad de agua total permanece constante. En la Figura 98 se da un ejemplo de las diferentes distribuciones de agua según se aumenta este parámetro.

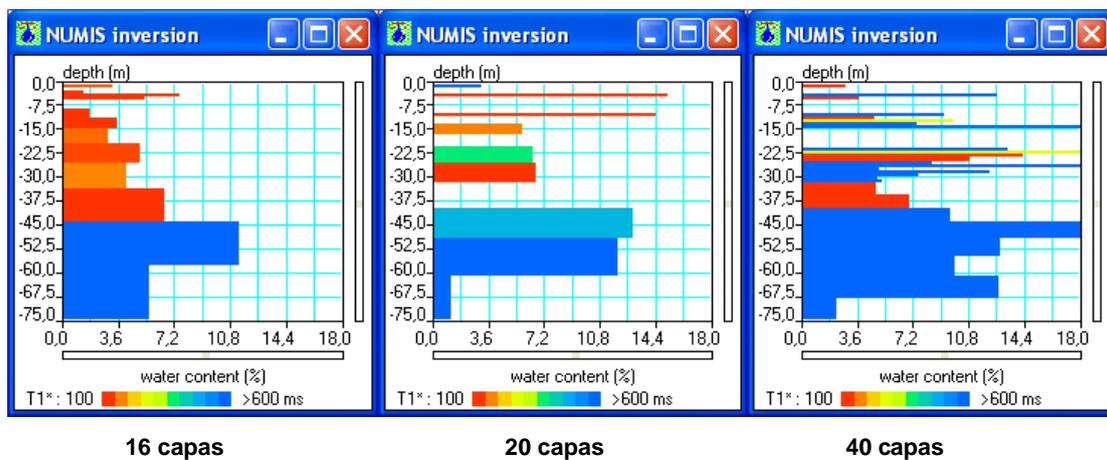


Fig. 98 Resultado de la inversión del SRM E2 para 16, 20 y 40 capas.

En ausencia de información previa sobre la geometría de los acuíferos se adopta la solución de tomar un número de capas igual al número de pulsos emitidos durante la medición del SRM, normalmente 16, cuya distribución de potencias es creciente con la profundidad, según se comentó en el capítulo 5, Figura 18.

Respecto de la constante C_p para el cálculo de la permeabilidad, ante la ausencia de ensayos de bombeo que permitan una calibración en la zona, se ha tomado un valor estándar de $7E-09$, lo que sólo permite establecer comparaciones relativas entre la transmisividad calculada para los diferentes SRM.

9.6 Parámetros de proceso adoptados

En la Tabla 9 se resumen los parámetros de proceso finalmente adoptados:

SRM	Td	q	parámetros proceso				
			geo	matriz	tiempo	filtro	E ₀ eliminado
E1b	T1	14	2	2-8-75	240	BP10 Hz	Q12,13,14
E2	T1	16	3	3-C75	240	RA15ms	
E3	T1	16	5	5-C100	240	RA15ms	
E4	T1	16	4	4B-8-75	150	BP10 Hz	
E5	T1	16	4	4B-C100	150	BP10 Hz	
E6	T1	16	4	4A-C100	240	RA15ms	
E7	T1	16	1	1-C100	240	BP10 Hz	
E8	T2	16	4	4A-C50	240	RA20ms	
E9	T1	16	4	4A-C50	240	RA20ms	
E10	T1	16	4	4A-C100	240	RA15ms	
E11	T1	16	1	1-C-50	100	BP10 Hz, Notch	Q15
E12	T1	16	1	1-8-75	240	RA15ms	
E13	T2	12	2	2-8-75	240	BP10 Hz	Q2, Q10
E14	T1	16	4	4A-C50	240	RA15ms	
E15	T1	16	1	1-C100	240	RA15ms	
E16	T1	16	1	1-C150	240	RA15ms	
E17	T1	16	1	1-C100	240	RA15ms,Notch	
E18	T1	16	4	4A-C100	240	RA15ms	

Td: tiempo decaimiento en registro

geo: modelo geoelectrico

q: nº de pulsos

tiempo: tomado para proceso

Tabla 9. Parámetros de proceso de los SRM de Estaña

Los parámetros de regularización se han dejado en cálculo automático (optimización numérica), así como el valor de la constante de calibración (7E-09). El número de capas se ha hecho igual en cada caso al número de pulsos emitidos q.

10. PRESENTACIÓN GENERAL DEL RESULTADO DE LA INVERSIÓN DE LOS SRM

Los resultados completos del proceso de inversión quedan expresados en la colección de gráficos del ANEXO I, donde se recogen las curvas $e(t)$ filtradas en el proceso, el sondeo $E_0(q)$ obtenido con dichas curvas, el resultado $w(z)$ y $T_1(z)$, así como los datos de calidad de campo: ruido, frecuencia y fase en función del momento de cada pulso q . Se han incluido también las distribuciones de permeabilidad y transmisividad acumulada $k(z)$ y $T(z)$ calculadas con un coeficiente de calibración de 7E-09, por lo que su valor solo se puede utilizar para comparaciones relativas. En la Tabla 10 se sintetizan los principales datos del resultado del proceso:

- relaciones S/N, EN/IN
- errores de ajuste entre el modelo (curva de color rojo de los gráficos $E_0(q)$) y los datos (cuadros negros) para la señal de ambos pulsos
- los valores de los parámetros de regulación
- valor del contenido máximo de agua detectado (en una capa de la inversión)
- valor máximo del tiempo de decaimiento calculado (en una capa de la inversión)

RESULTADO DE PROCESO SRM ESTAÑA

SRM	prof. m	Tiempo ms	S/N	EN/IN	err. FID1 %	err. FID2%	pr E-T2	pr T1	Max.agua %	T1max ms
1	75	208,9	1,11	3,69	38	49	1129	0,24	3	500
2	75	208,8	11,98	1,62	2,4	17	47,7	2,1	11	3000
3	100	208,8	3,74	1,37	5,8	15,5	366	0,9	2	500
4	75	149,4	7,7	1,95	3,7	9,4	198	3,6	21	3000
5	100	149,4	4,7	2,6	4,7	25,4	91,6	0,7	30	3000
6	100	208,8	7,5	3,1	4,3	35	175	1,1	5	3000
7	100	208,9	2,4	1,7	5,3	31,1	244	0,7	1,5	2000
8	50	208,9	8,2	1,1	2,1	solo T2	91,6		6	
9	50	208,9	4,4	1	14,1	34,3	137	2,1	4,5	1000
10	100	208,9	13,1	1,8	6	14,6	335	1,1	6	2000
11	50	99,3	1,7	1,8	26,1	38,9	213,6	1,7	4,5	3000
12	75	208,9	7	1,8	4,4	12,2	129,7	14,7	4,5	3000
13	75	208,9	1	15,5	26,4	solo T2	3387		4,5	
14	50	208,8	7,2	2	4,7	15,5	87,7	5,9	15	800
15	100	208,9	4,8	1,3	4,8	13,8	732,4	1,1	3	300
16	150	209	12,3	3	1,1	30,7	267	3	8	3000
17	100	208,9	6,4	3,3	2,9	18,4	274,7	1,7	7	3000
18	100	208,8	13,8	2,7	2,7	8,8	1465	0,7	7,5	900

Tabla 10. Resumen de resultados de la inversión de los SRM de Estaña

El valor del parámetro EN/IN es siempre igual o superior a la unidad, indicando que todos los sondeos son válidos desde el punto de vista instrumental (la señal exterior ha sido más de cinco veces superior al ruido instrumental). Los valores de la relación S/N de los sondeos 1, 13 y 11 es inferior a 2, indicando la poca fiabilidad de existencia de señal en los mismos, no pudiendo efectuarse más que una interpretación cualitativa. El resto de los SRM presentan una buena, incluso excelente, relación S/N, lo que da fiabilidad a la señal registrada y hace posible aceptar una interpretación cuantitativa de la misma.

Estos resultados serán comentados detalladamente para cada sondeo en el capítulo siguiente. La escala utilizada en las figuras del Anexo I para la distribución $w(z)$ permiten una mejor visualización que la utilizada en la siguiente descripción, en la que se emplea la misma escala para todos los casos, a fin de facilitar la comparación entre SRM. Para el mejor seguimiento de la descripción efectuada, se sugiere utilizar simultáneamente los gráficos del Anexo I.

11. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVERSIÓN DE LOS SRM

SRM E1

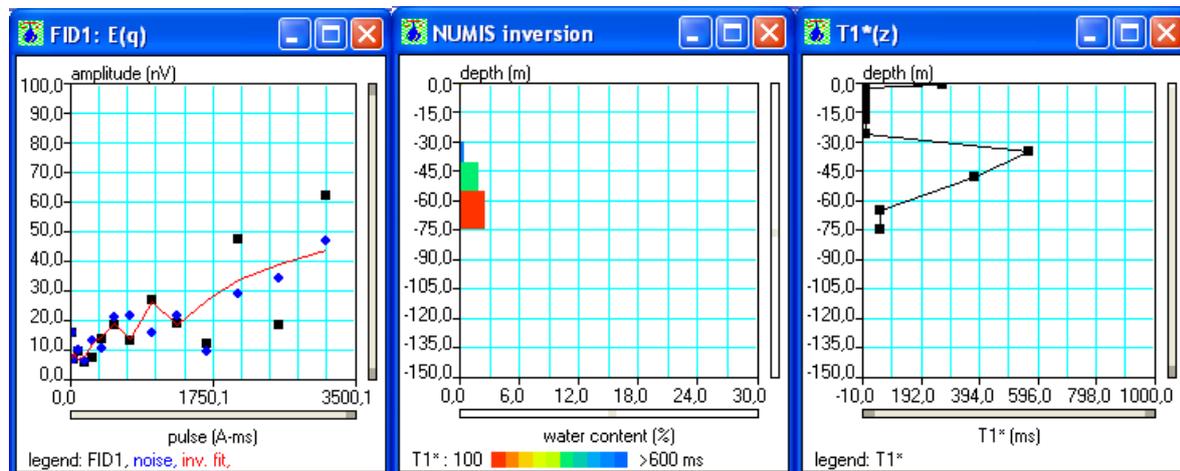
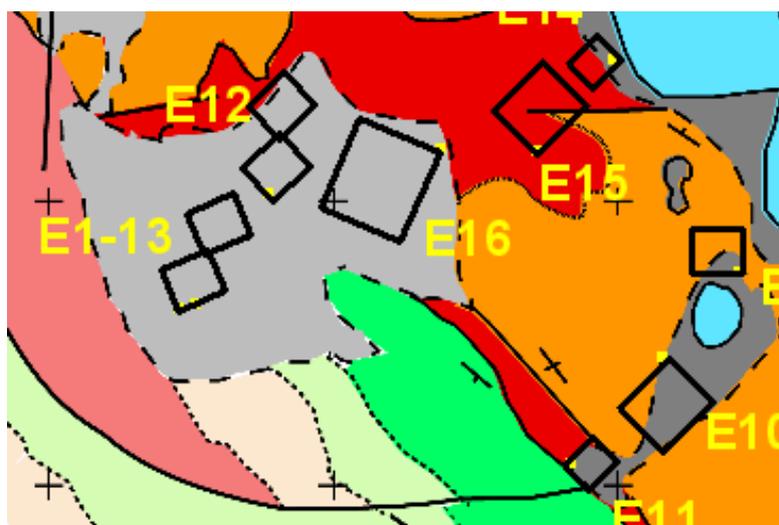


Fig. 97 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E1

El filtrado de proceso dejando pasar una banda de 10 Hz entorno de la frecuencia de resonancia no ha conseguido mejorar la señal $e(t)$, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 30 con las correspondientes del Anexo I, por lo que se corrobora la poca probabilidad de que la señal registrada provenga del agua. Las relaciones $EN/IN=3.69$ y $S/N=1.1$ indican igualmente la improcedencia de la interpretación cuantitativa de estos datos, lo que además queda reflejado en elevado error de ajuste de FID1 (38 %). En conclusión, no existe agua en este entorno en los primeros 75 m del subsuelo.



SRM E2

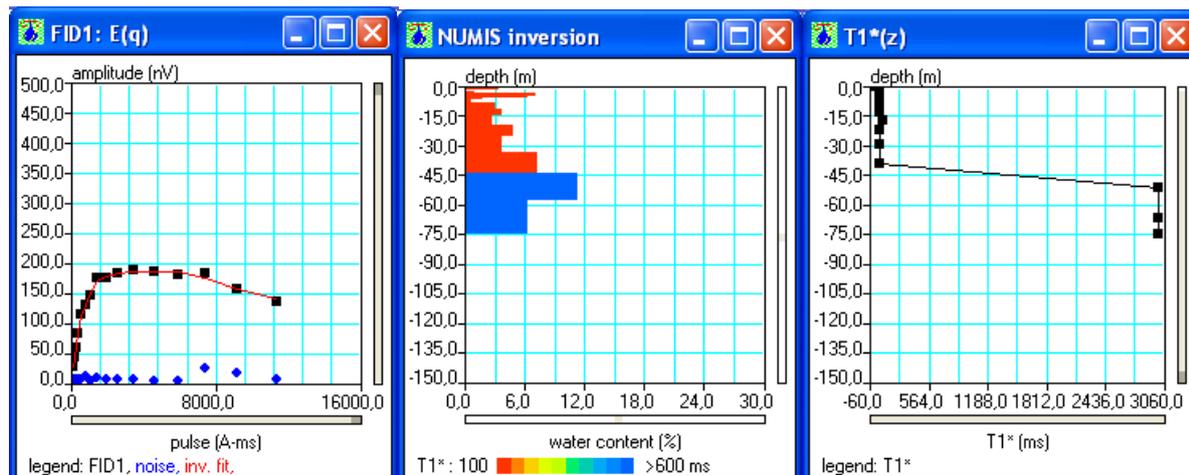
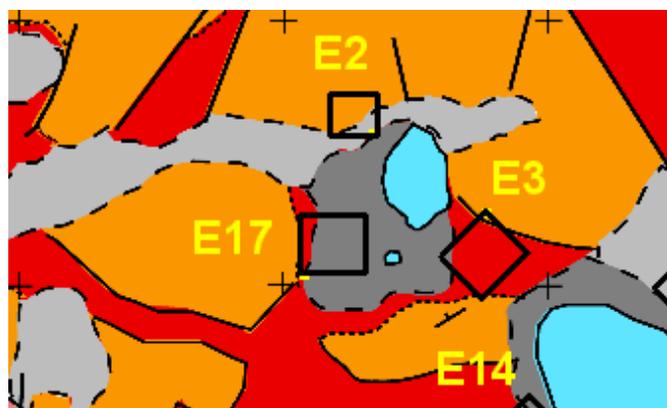


Fig. 98 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E2

El filtro RA de 15 ms ha producido un ligero suavizado de las curvas de campo $\mathbf{e(t)}$, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 33 con las correspondientes del Anexo I, mejorando por tanto la evaluación de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1.6$ y $S/N=12$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 2.4 %. Como ya se indicó en el capítulo 7, se trata de un acuífero potente que se inicia a poca profundidad y cuyo fin no queda resuelto por el SRM.

Los primeros 8 m están formados por una sucesión de capas estrechas de muy poca permeabilidad con un contenido en agua entre el 3 y el 6 %; mayor saturación y continuidad aparece a partir de los 8 m, que pudiera considerarse como el nivel freático, formando un acuífero de igualmente muy baja permeabilidad hasta unos 45 m, donde cambia bruscamente la permeabilidad, y posiblemente el contenido en agua, que puede llegar al 10 %. Los valores del tiempo de decaimiento T_1 indican la posible presencia de agua volumétrica, al menos hasta los 75 m de profundidad, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E3

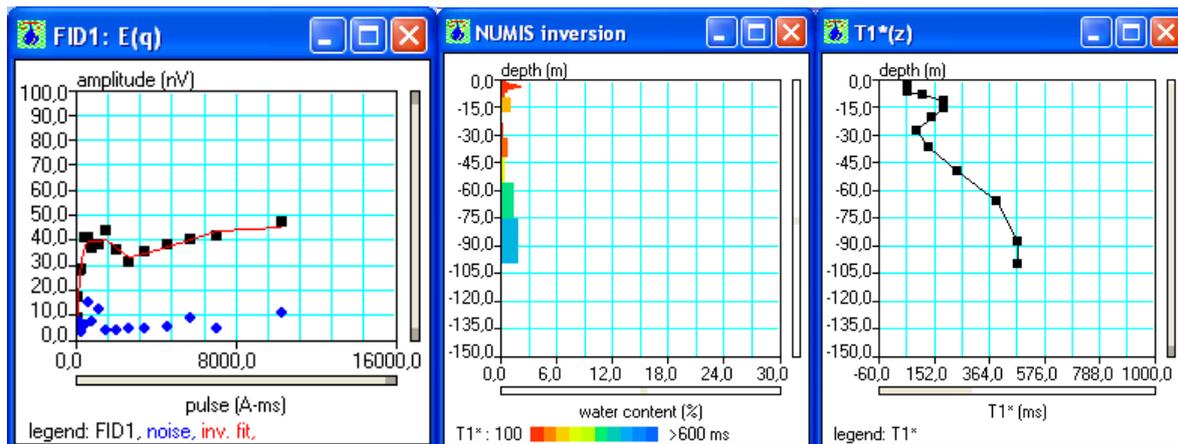
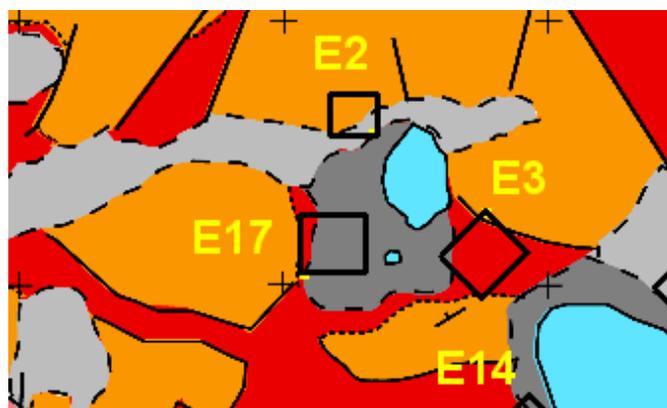


Fig. 99 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E3

El filtro RA de 15 ms ha producido un ligero suavizado de las curvas de campo $\mathbf{e}(t)$, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 36 con las correspondientes del Anexo I, mejorando por tanto la evaluación de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1.3$ y $S/N=3.7$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 5.8 %. La poca amplitud de la señal se debe a la poca cantidad de agua existente, tratándose como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, de un acuífero muy somero, seguido de otro de mayor potencia y cuya profundidad no ha sido detectada.

En los primeros 40 el terreno es de muy baja permeabilidad, existiendo una serie de capas con menos del 2 % de agua. Sobre los 56 m la situación cambia drásticamente, pasando a una permeabilidad mucho mayor, aunque el contenido en agua no supera el 2%. Los valores del tiempo de decaimiento T_1 son elevados en profundidad, aunque se mantienen dentro de los límites de agua libre contenida en poros o fracturas.



SRM E4

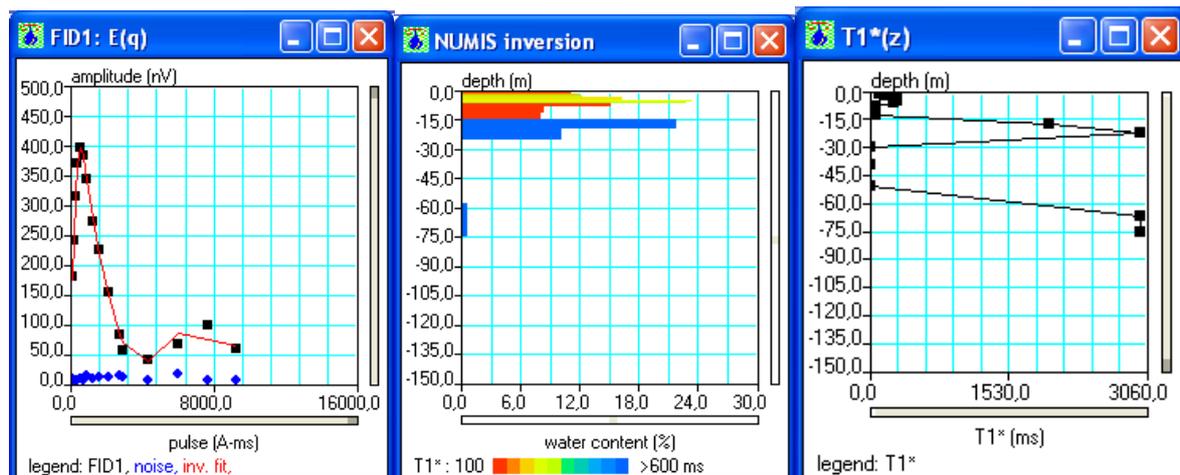
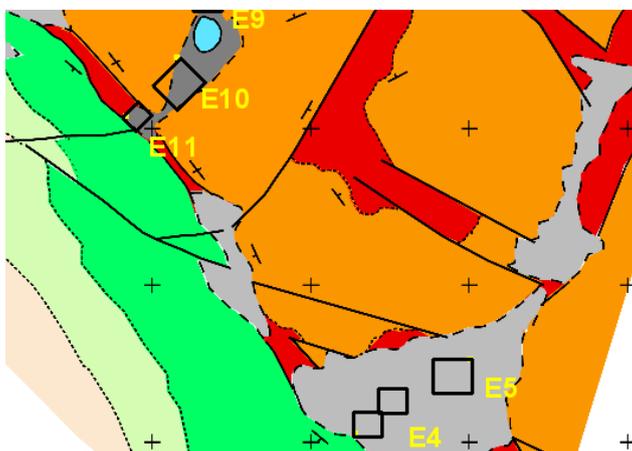


Fig. 100 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E4

El aplicación de un filtro PB de 10 Hz y la limitación del tiempo de proceso a los primeros 150 ms garantizan aún más la fiabilidad de la excelente calidad de las curvas $e(t)$ de campo de este sondeo, cuyo resultado puede verse en las Figuras 29 y las correspondientes del Anexo I. Las relaciones $EN/IN=1.95$ y $S/N=7.7$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 3.7 %. Como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, se trata de un acuífero muy somero, aunque los inusuales cambios de frecuencia y fase a partir de un pulso de más de 5000 A.ms puede ser debida a la pérdida de señal por existencia de materiales con elevada susceptibilidad magnética, y no a la ausencia de agua a mayor profundidad.

El resultado de la inversión denota la presencia de un contenido del 10-20 % de agua en los primeros 25 m del subsuelo, produciéndose un brusco cambio desde terrenos de muy baja a muy alta permeabilidad a partir de unos 15 m de profundidad. El tramo desde 15 a 25 m presenta además un valor del tiempo de decaimiento T_1 indicativo de la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.

La existencia de una capa de agua desde los 60 m a los 75 m no es fiable.



SRM E5

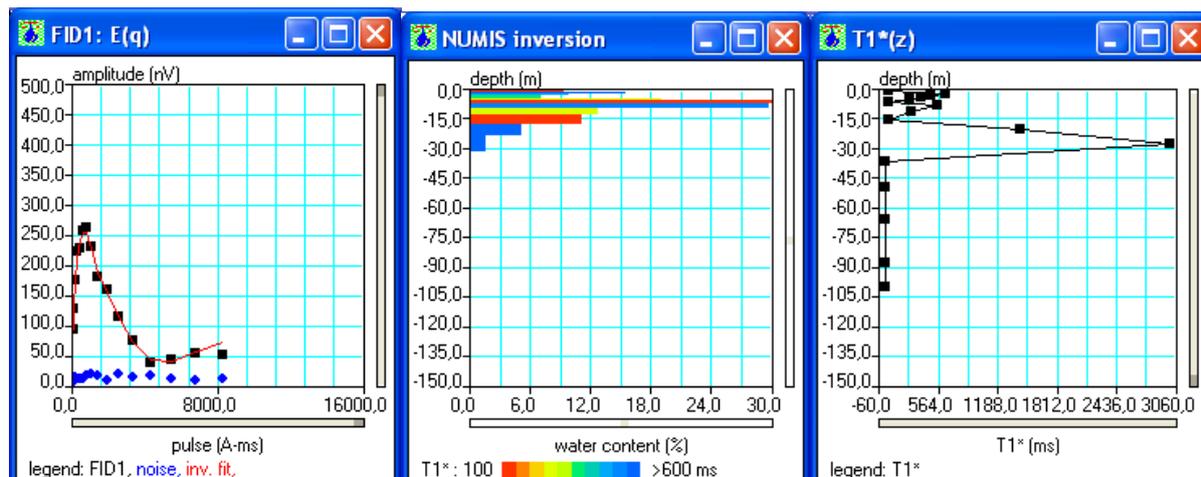
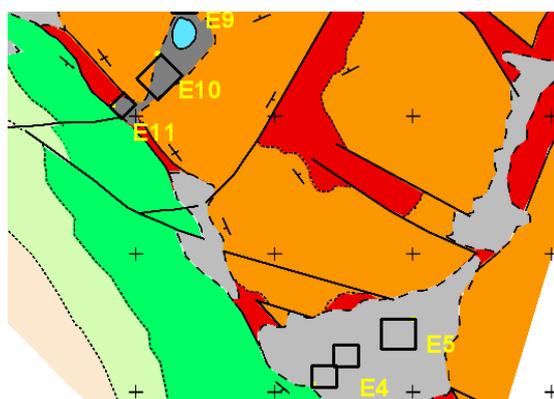


Fig. 101 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E5

La aplicación de un filtro PB de 10 Hz y la limitación del tiempo de proceso a los primeros 150 ms garantizan aún más la fiabilidad de la excelente calidad de las curvas $e(t)$ de campo de este sondeo, cuyo resultado puede verse en las Figuras 42 y las correspondientes del Anexo I. Las relaciones $EN/IN=2.6$ y $S/N=4.7$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 4.7 %. Como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, se trata de un acuífero muy somero, ligeramente más potente que el E4, aunque los inusuales cambios de frecuencia, y sobre todo de la fase, a partir de un pulso de más de 5000 A.ms pueden ser debidos a la pérdida de señal por existencia de materiales con elevada susceptibilidad magnética, y no a la ausencia de agua a mayor profundidad.

El resultado de la inversión denota la presencia de un contenido del orden del 10 % de agua en los primeros 18 del subsuelo, con una secuencia de capas de baja y alta permeabilidad, llegando en ocasiones a más del 30 % de agua. A partir de esta profundidad, y hasta al menos los 31 m se produce de nuevo un brusco cambio en la permeabilidad, que pasa a ser muy elevada, pero va acompañada de un menor contenido en agua, que baja al 1.5-5 %, con valores del tiempo de decaimiento T_1 indicativos de la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E6

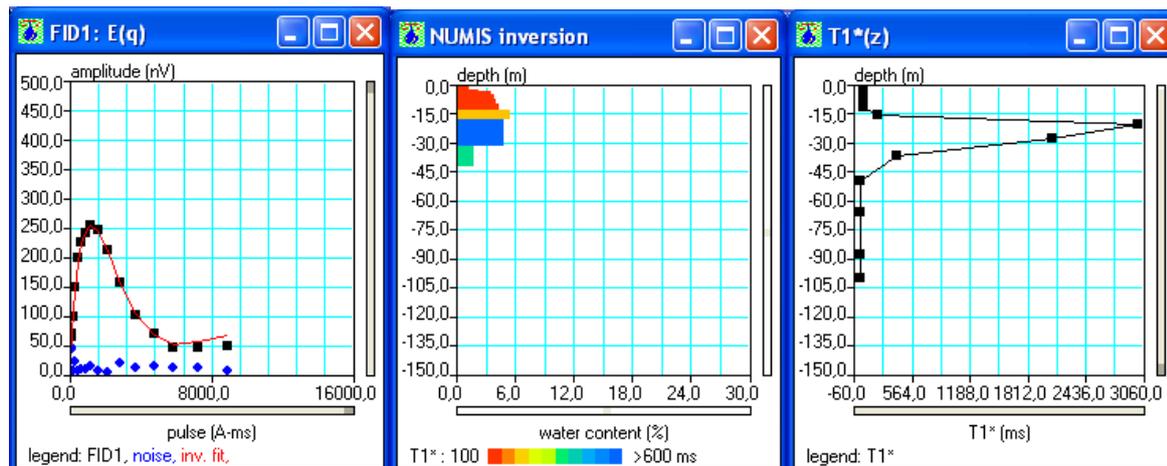
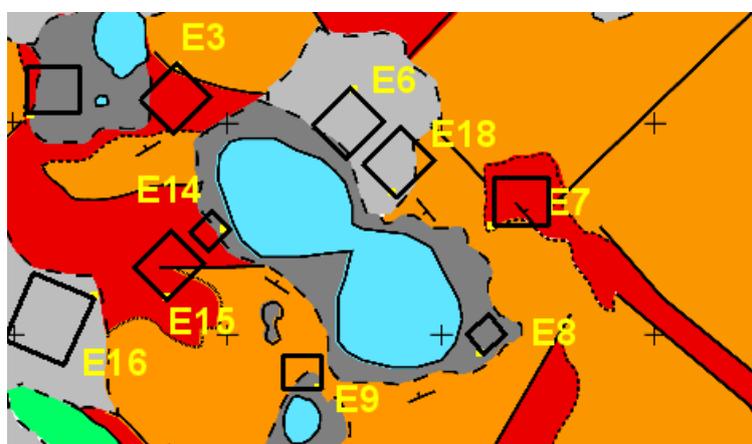


Fig. 102 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E6

El filtro RA de 15 ms ha producido un ligero suavizado de las curvas de campo $e(t)$, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 45 con las correspondientes del Anexo I, mejorando por tanto la evaluación de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=3.1$ y $S/N=7.5$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 4.3 %.

Como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, se trate de un acuífero somero de cierta potencia y límite inferior bien definido. El resultado de la inversión denota la presencia de agua en al menos los primeros 42 m del subsuelo, con posible presencia del nivel freático a unos 4 m. Aunque el contenido en agua es prácticamente constante, del orden del 4.5 %, excepto en la última capa (del proceso de inversión), se produce nuevamente un brusco cambio de la permeabilidad, pasando a ser muy elevada a partir de los 18 m. El tiempo de decaimiento T_1 toma para este tramo inferior valores indicativos de la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E7

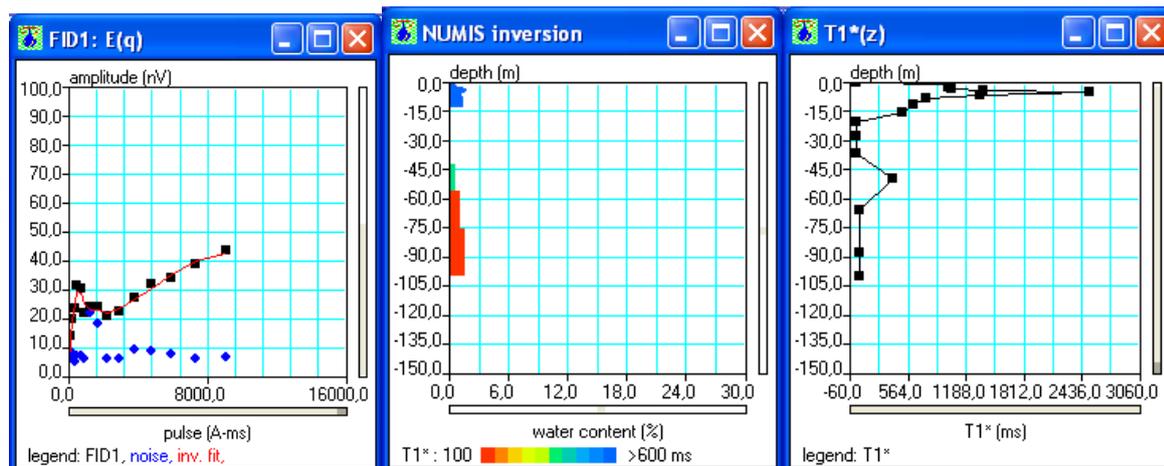
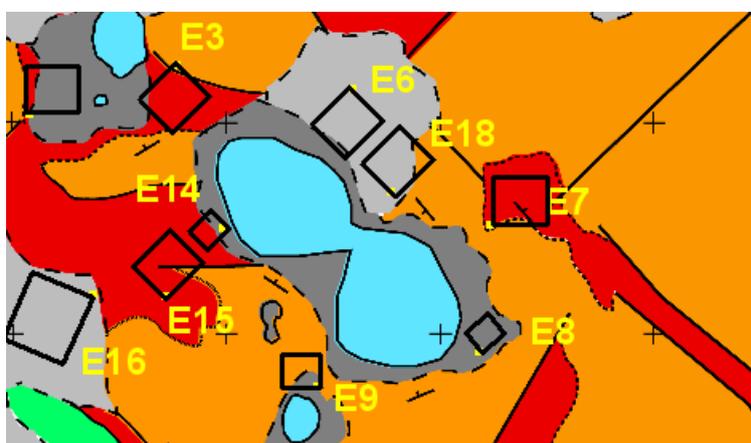


Fig. 103 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E7

La aplicación de un filtro PB de 10 Hz sólo ha conseguido mejorar relativamente las curvas de campo $e(t)$, muy contaminadas por ruido, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 48 con las correspondientes del Anexo I, suponiendo no obstante una mejora para la evaluación de E_0 y T_1 en el resto de las curvas. Las relaciones $EN/IN=1.7$ y $S/N=2.4$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 5.3 %.

Como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, se trate de un acuífero muy somero y con poco agua, seguido de otro a mayor profundidad, cuyo fin no ha sido detectado en el sondeo. En los primeros 12 m existe del orden del 1.5 % de agua con muy buena permeabilidad, incluso con un valor de T_1 correspondiente a la posible presencia de agua volumétrica, lo que es problemático, dado que este acuífero se inicia a menos de 1 m de la superficie. El segundo acuífero, desde unos 45 m hasta al menos los 100 m de profundidad, presenta también un escaso contenido en agua, del 1.5 %, pero al contrario que en los SRM anteriormente comentados en este lugar la permeabilidad ha disminuido drásticamente con la profundidad, lo que hace suponer que la situación hidrogeológica (litología) ha variado aquí sustancialmente.



SRM E8

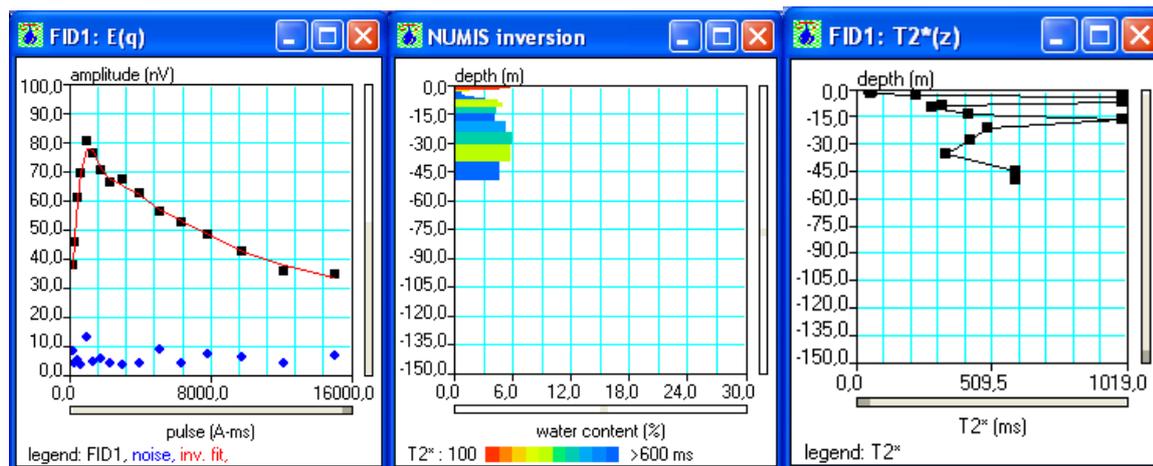
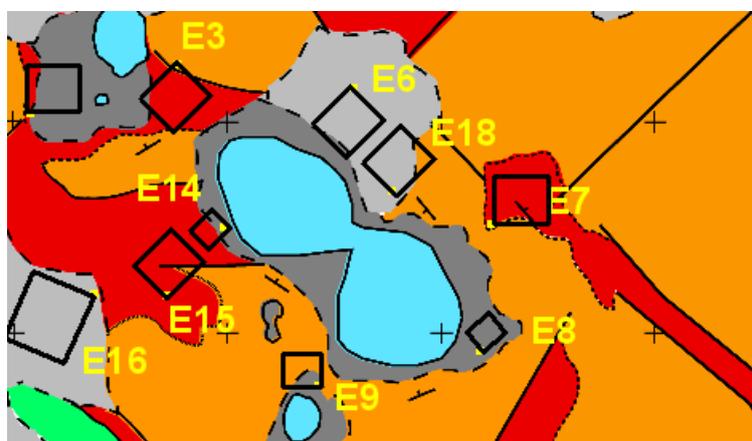


Fig. 104 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E8

La aplicación de un filtro RA de 20 ms ha conseguido suavizar bien las curvas de campo $e(t)$, como puede apreciarse comparando las curvas de la Figura 51 con las correspondientes del Anexo I, suponiendo una mejora para la evaluación de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1.1$ y $S/N=8.2$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 2.1 %.

Como ya se indicó en la interpretación cualitativa del capítulo 7, se trate de un acuífero muy superficial seguido inmediatamente de otro más potente cuya profundidad queda suficientemente detectada en el SRM. Los primeros 3 m contienen del orden del 6 % de agua, en materiales de muy baja permeabilidad; el nivel freático podría situarse sobre los 7 m, existiendo un acuífero hasta unos 50 m, de gran permeabilidad y conteniendo 4.5-6 % de agua. En este lugar no se ha medido el tiempo de decaimiento T_1 , siendo los valores de T_2^* muy elevados, que pueden ser indicativos de la presencia de agua volumétrica, en cuyo caso su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E9

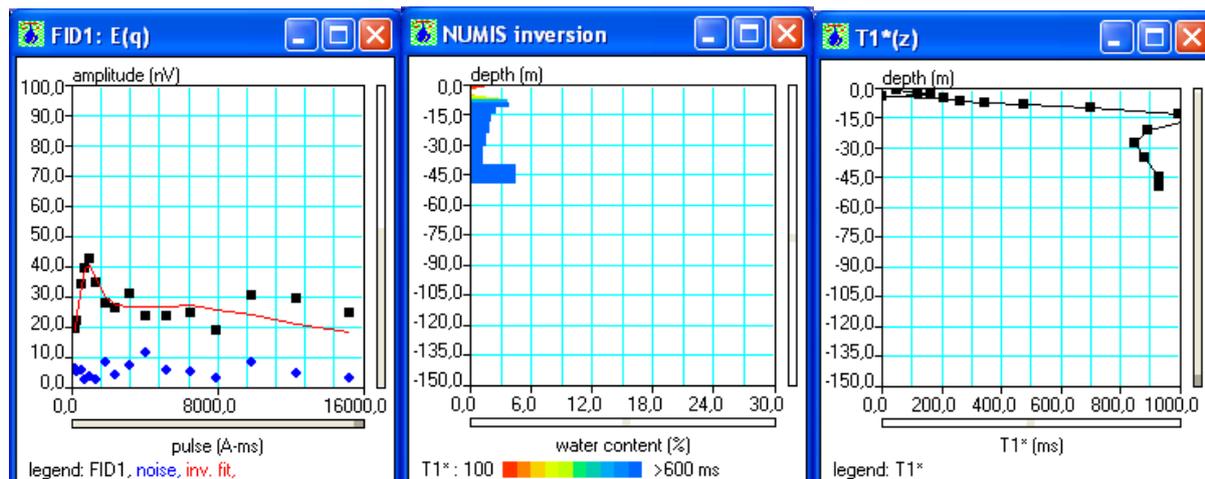
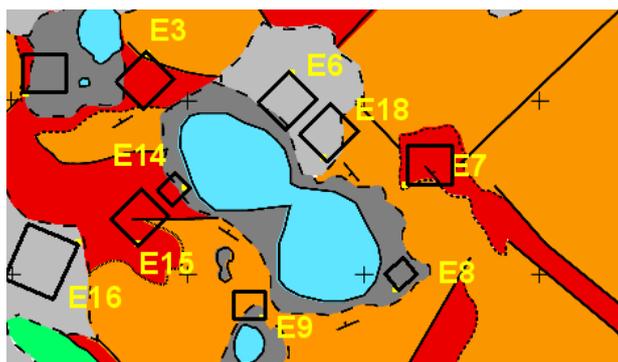


Fig. 105 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E9

La aplicación de un filtro RA de 20 ms ha suavizado las curvas de campo $\mathbf{e}(t)$, como puede apreciarse comparando las curvas de las Figuras 54 con las correspondientes del Anexo I, suponiendo una mejora para la evaluación de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1$ y $S/N=4.4$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 de 14.1 %. La disminución de valores para el pulso $q=13$ no ha sido posible hacerla corresponder con ningún modelo, obteniéndose prácticamente los mismos resultados si se suprime dicha lectura. Este gran desajuste entre modelo y medidas hace que la solución obtenida por la inversión debe tomarse con reservas.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $\mathbf{E}_0(q)$, se trata de la presencia de un acuífero muy superficial, seguido de otro más profundo bien separado del anterior y poco potente, ya que se adivina en la curva $\mathbf{E}_0(q)$ su tramo de bajada. La inversión ha unido ambos acuíferos. El primero está formado por los primeros 3 m y contiene del orden del 1.5 % de agua, en materiales de muy baja permeabilidad; el nivel freático podría situarse sobre los 8 m, existiendo un acuífero hasta al menos unos 50 m, de gran permeabilidad y conteniendo en agua decreciente desde el 4 % al 1.5 % a unos 35 m, y aumentando posteriormente hasta el 4.5 %, aunque esta distribución puede ser fruto de la potencia predeterminada de las capas y el precario ajuste encontrado. El valor de T_1 para el segundo acuífero corresponde a la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E10

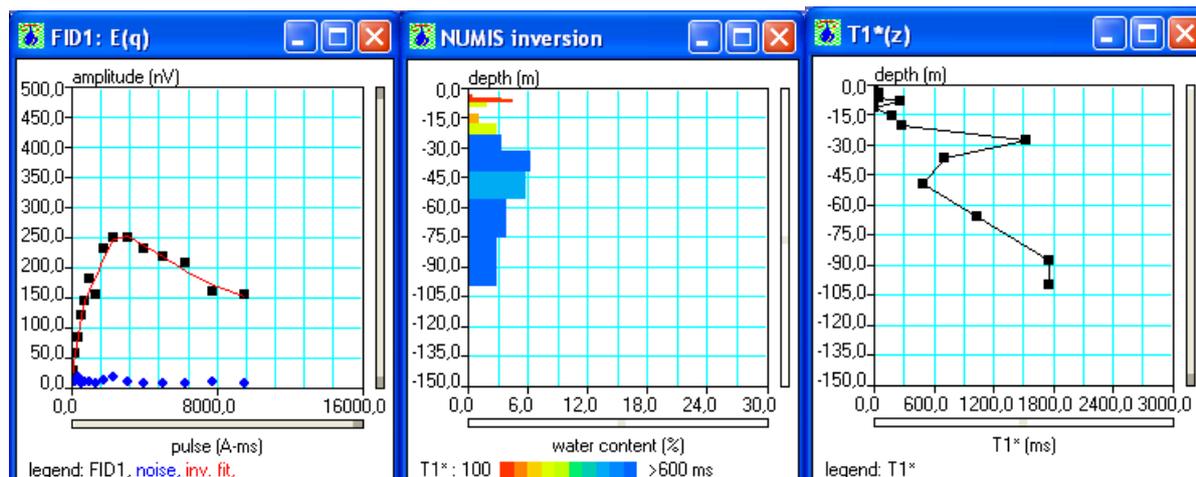
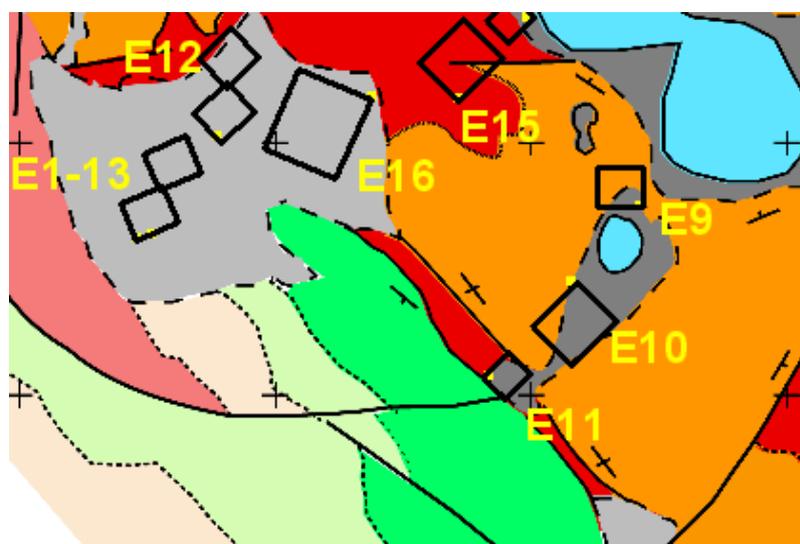


Fig. 106 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E10

La aplicación de un filtro RA de 15 ms ha suavizado las curvas de campo $\mathbf{e}(t)$, ya inicialmente bastante desprovistas de ruido (Figuras 57 y correspondiente del Anexo I), permitiendo calcular valores mejorados de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1.8$ y $S/N=13.1$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 6 %.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $\mathbf{E}_0(q)$, se trata de un acuífero no somero y de cierta potencia, sin que quede definida su profundidad máxima, aunque la inversión ha precisado introducir un primer tramo entre 4 y 10 m de profundidad, con 5 % de agua y muy baja permeabilidad. El nivel freático puede estar sobre los 17 m de profundidad, prolongándose el acuífero al menos hasta los 100 m, con muy alta permeabilidad y valores de T_1 indicativos de la posible presencia de agua volumétrica sobre los 30 m y a partir de los 60 m, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E11

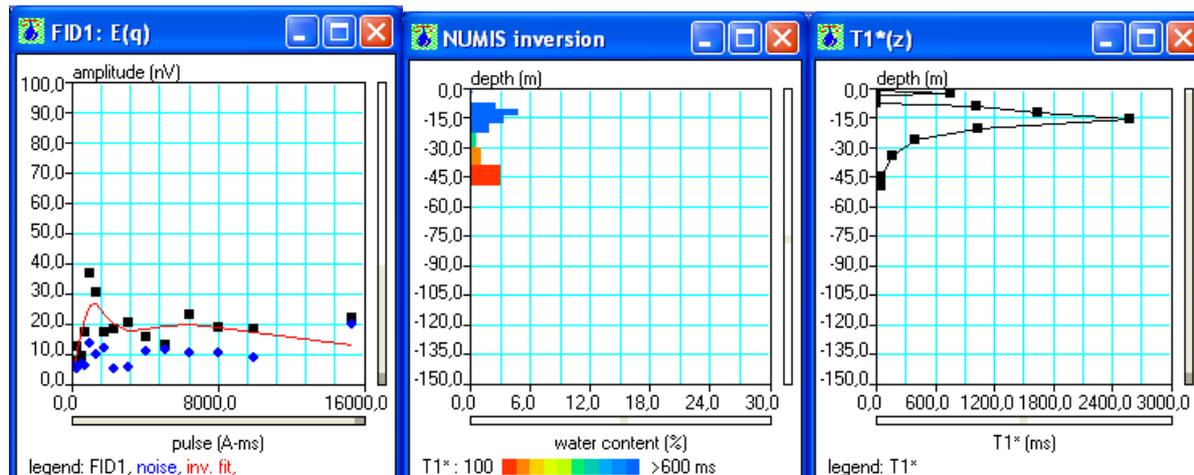
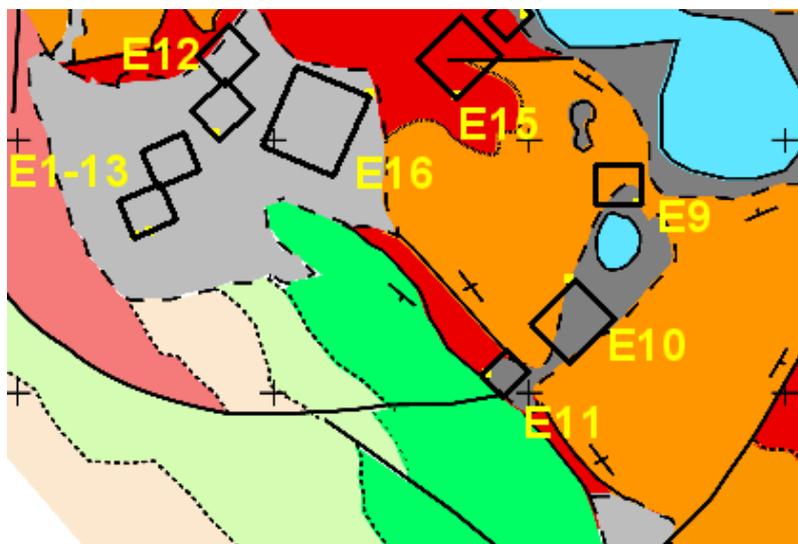


Fig. 107 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E11

Las curvas de campo $e(t)$ de este SRM (Figura 60) son muy ruidosas y no permiten apreciar la existencia de decaimiento exponencial; la aplicación de un filtro PB de 10 Hz, junto con un filtro Notch ha conseguido alguna mejora, como puede apreciarse en el Anexo I, pero insuficiente para calcular valores de E_0 y T_1 fiables. Las relaciones $EN/IN=1.8$ y $S/N=1.7$ no permiten la interpretación cuantitativa fiable de estos datos, para los que se obtiene un error de ajuste de FID1 del 26 %, con un modelo que difícilmente se ajusta a los caóticos datos de entrada.

Este modelo corresponde con un acuífero entre los 8 m y los 28 m de profundidad, con alta permeabilidad y un contenido en agua inferior al 3%, dándose el mismo caso que en el SRM E7 de que el valor calculado para T_1 indicaría la presencia de agua volumétrica en el acuífero superior. Desde los 30 a los 50 m podría existir otra capa de agua de muy baja permeabilidad y contenido también inferior a 3%.



SRM E12

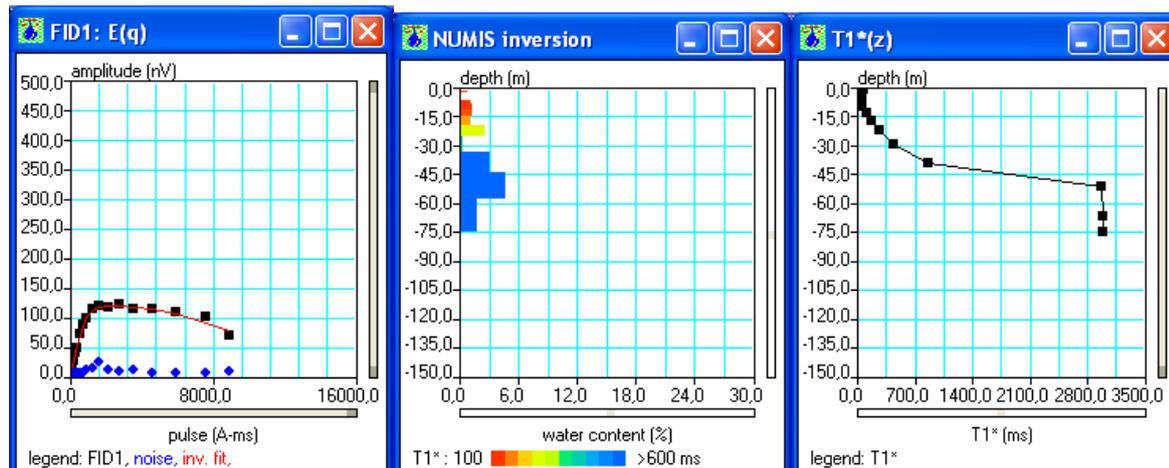
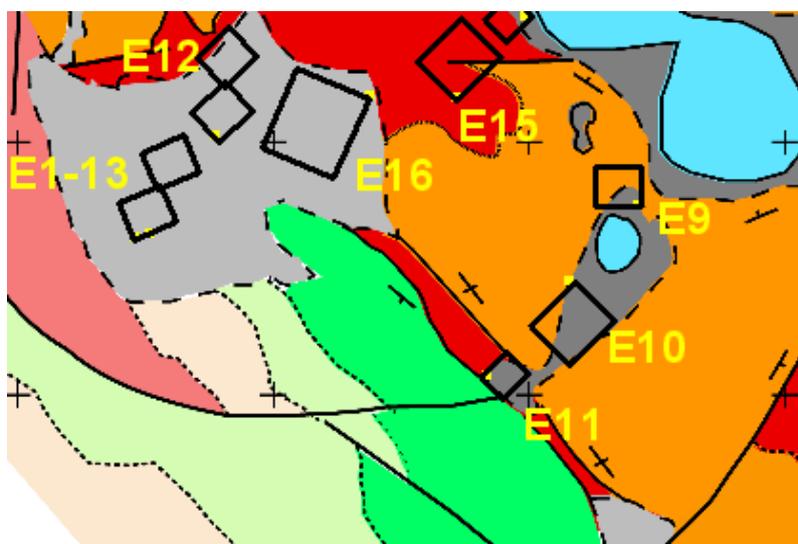


Fig. 108 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E12

La aplicación de un filtro RA de 15 ms ha suavizado las curvas de campo $e(t)$ de este SRM, mejorando el cálculo de E_0 y T_1 (Figuras 63 y correspondiente del Anexo I). Las relaciones $EN/IN=1.8$ y $S/N=7$ permiten una interpretación cuantitativa fiable de estos datos, para los que se obtiene un error de ajuste de FID1 del 4.4 %.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $E_0(q)$, se trata de un acuífero potente, cuyo fin queda bien localizado, pero al que la inversión ha precisado de añadir un primer tramo de baja permeabilidad y menos del 2% de agua entre los 7 y los 26 m de profundidad. El acuífero principal responsable de la señal medida se sitúa entre unos 35 y al menos 75 m de profundidad, con un contenido medio de agua del 3 % y muy alta permeabilidad, indicando sus valores de T_1 la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E13

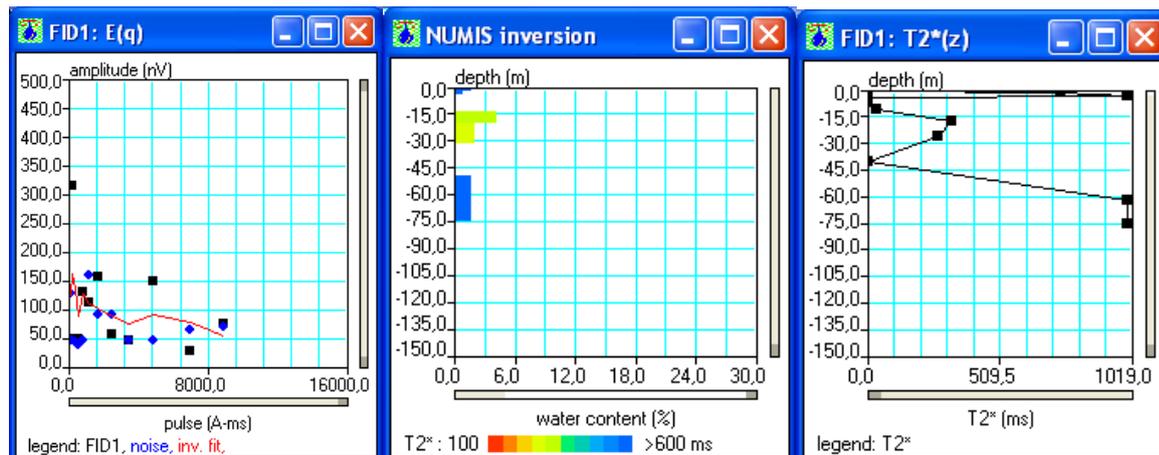
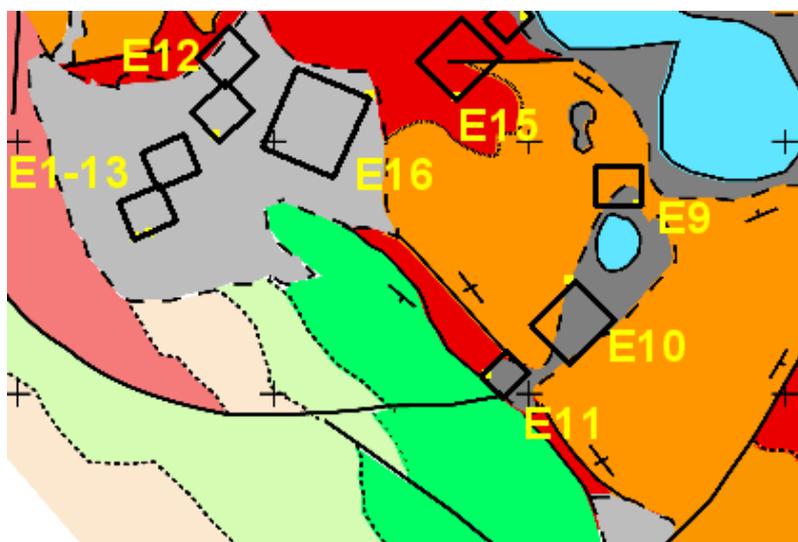


Fig. 109 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E13

La aplicación de un filtro PB de 10 Hz evidentemente no ha sido suficiente para mejorar las curvas de campo $e(t)$ de este SRM, siendo de nula fiabilidad el cálculo de E_0 y T_1 (Figuras 66 y correspondiente del Anexo I). Las relaciones $EN/IN=15.5$ y $S/N=1$ no permiten una interpretación cuantitativa de estos datos, siendo el alto valor de señal instrumental debido al ruido externo, sin existencia de señal del agua. En este sondeo no se ha medido T_1 . Una pretendida inversión de este SRM se consigue con error de ajuste de FID1 del 15.5 %. En consecuencia, este emplazamiento lo caracterizamos como sin presencia de agua, ratificando los resultados del SRM E1.



SRM E14

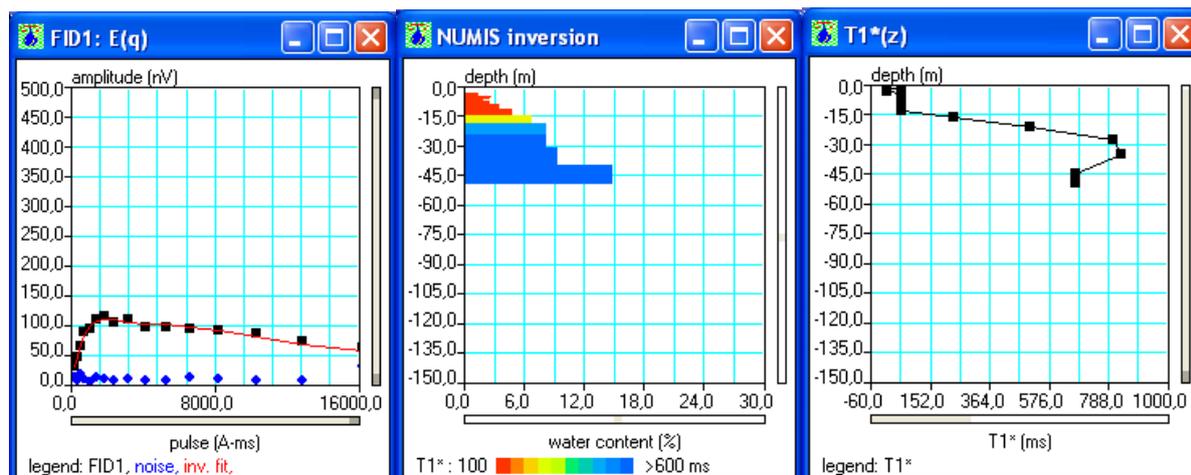
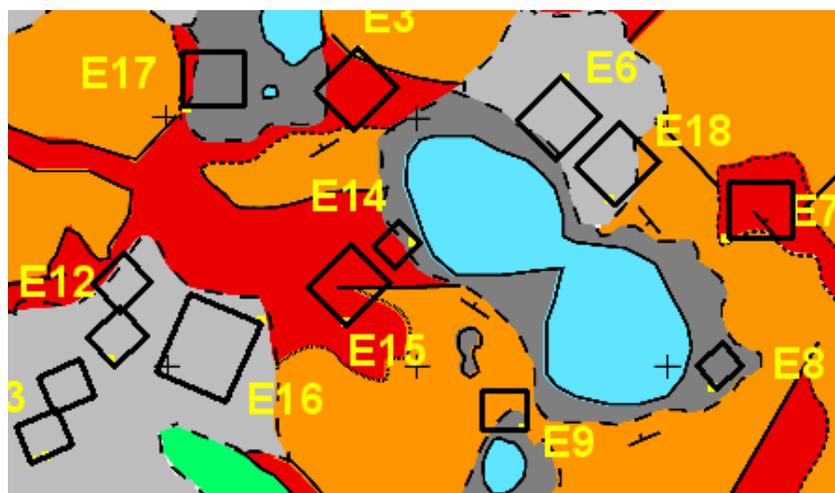


Fig. 110 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E14

La aplicación de un filtro RA de 15 ms ha suavizado las curvas de campo $e(t)$, ya inicialmente bastante desprovistas de ruido (Figuras 69 y correspondiente del Anexo I), permitiendo calcular valores mejorados de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=2$ y $S/N=7.2$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 4.7 %.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $E_0(q)$, se trata de una secuencia de acuífero somero seguido de otro más potente y profundo, cuya profundidad máxima queda relativamente bien definida. El primer tramo, desde los 4 hasta los 14 m de profundidad es de muy baja permeabilidad y con un contenido medio en agua del 3 %, llegando al 4.5 % de máximo. El siguiente tramo, hasta al menos los 50 m de profundidad, es de muy alta permeabilidad y contenido en agua creciente hasta el 15 %, presentando altos valores de T_1 , por lo que puede tratarse de la existencia de agua volumétrica, con distribución muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E15

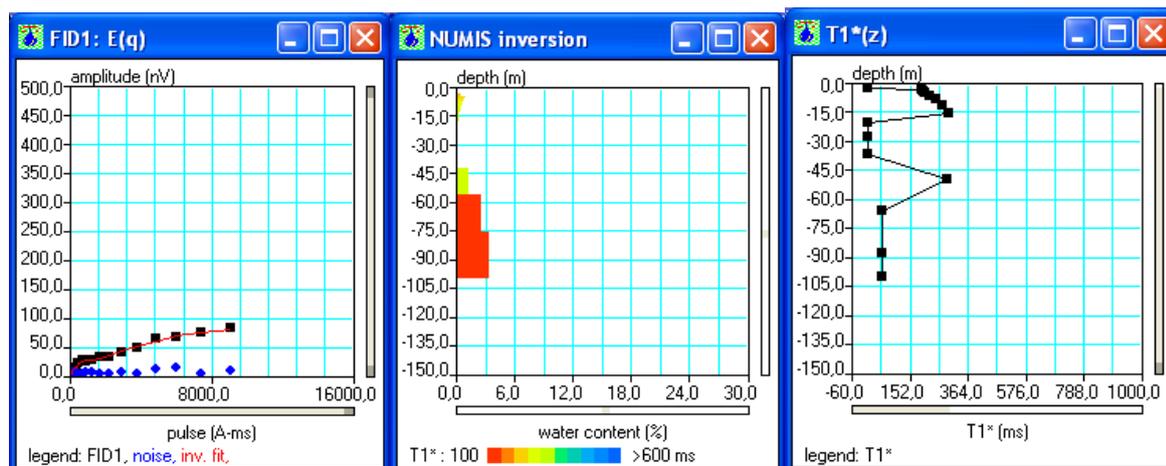
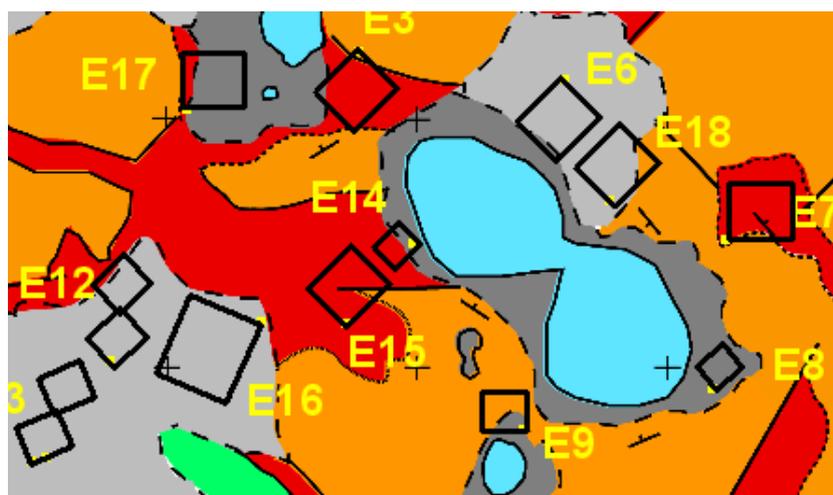


Fig. 111 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E15

La aplicación de un filtro RA de 15 ms introduce una sensible mejora en las curvas de campo $\mathbf{e}(t)$, (Figuras 72 y correspondiente del Anexo I), permitiendo calcular valores mejorados de E_0 y T_1 . Las relaciones $EN/IN=1.3$ y $S/N=4.8$ permiten la interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 4.8 %.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $\mathbf{E}_0(q)$, se trata de acuífero somero potente que se inicia a gran profundidad y cuyo fin no ha sido detectado por el SRM. La inversión introduce un primer tramo, desde los 4 hasta los 17 m de profundidad con permeabilidad media y con un contenido en agua inferior al 1 %. El acuífero principal se inicia a más de 45 m, prolongándose hasta más de 100 m, con un contenido en agua del orden del 3 % y muy baja permeabilidad.



SRM E16

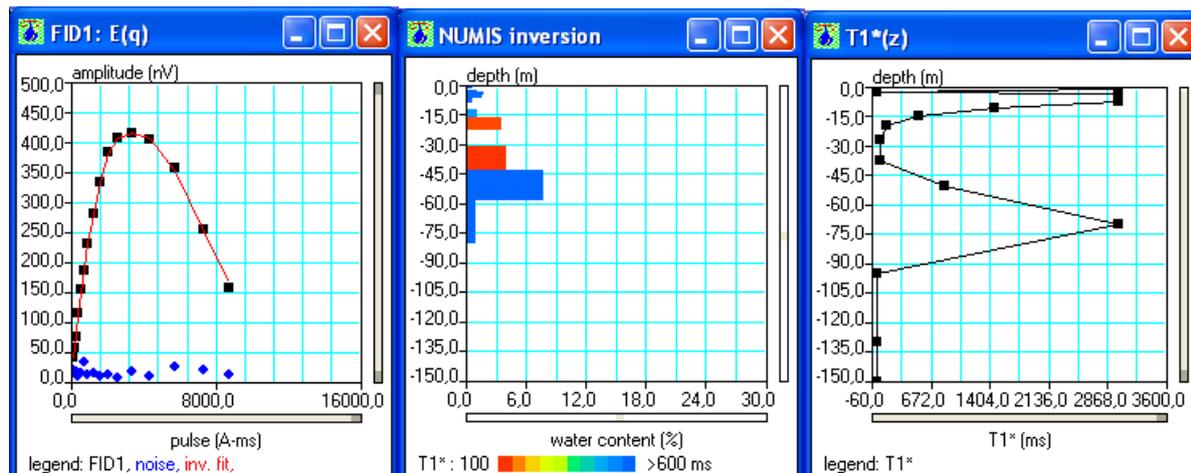
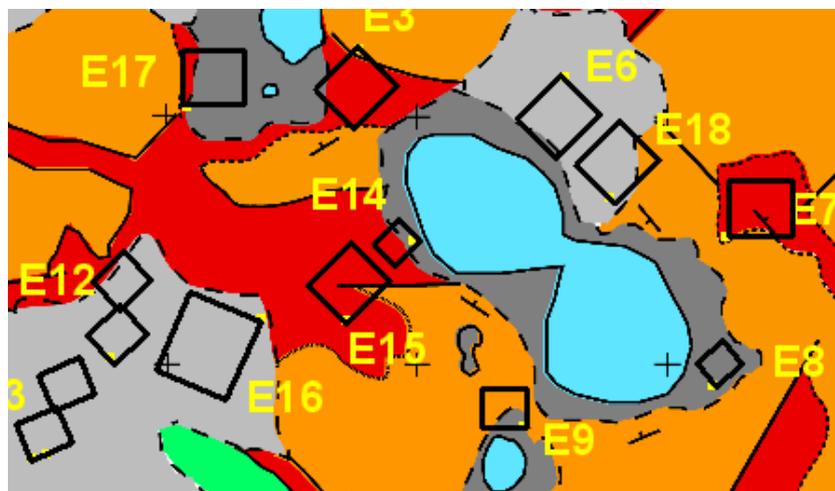


Fig. 112 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E16

La aplicación de un filtro RA de 15 ms mejora la ya buena calidad de las curvas de campo $e(t)$, (Figuras 75 y correspondiente del Anexo I), permitiendo calcular valores de E_0 y T_1 muy fiables. Las relaciones $EN/IN=3$ y $S/N=12.3$ permiten una buena interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 1.1 %.

Como se indicaba en la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $E_0(q)$, se trata de un acuífero potente cuyo fin queda bien localizado. La inversión introduce unas primeras capas hasta más de 15 m de profundidad, de permeabilidad variable y contenido en agua del 1 al 3 %, con valor de T_1 para el tramo más superficial indicativo de agua volumétrica, lo que es cuestionable. El acuífero principal se inicia a unos 31 m, prolongándose hasta unos 80 m; su morfología es bastante peculiar, ya que presenta un primer tramo de muy baja permeabilidad con un 4.5 % de agua, pasando bajo los 45 m a permeabilidad muy elevada y un 7.5 % de agua, que se reduce al 1 % bajo los 60 m, donde el valor de T_1 es indicativo de la posible presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



SRM E17

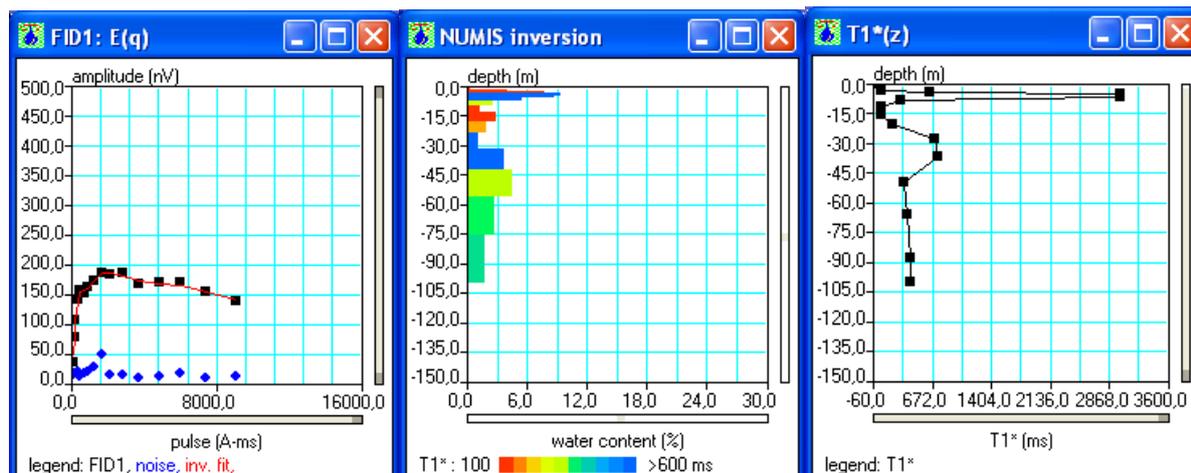
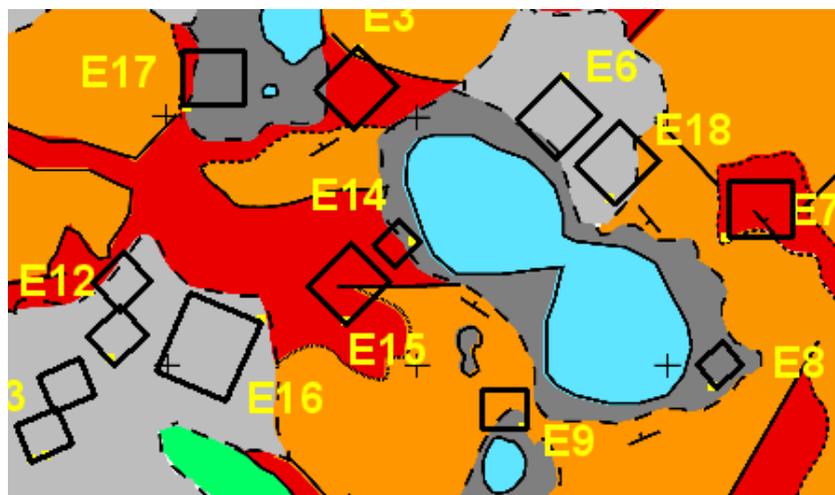


Fig. 113 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E17

La aplicación de un filtro RA de 15 ms unida a un filtro Notch ha suavizado notablemente las curvas de campo $\mathbf{e}(t)$, (Figuras 78 y correspondiente del Anexo I), permitiendo calcular valores de E_0 y T_1 fiables. Las relaciones $EN/IN=3.3$ y $S/N=6.4$ permiten una buena interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 2.9 %.

En la interpretación cualitativa del capítulo 7, se indicaba la presencia de un acuífero potente, de inicio superficial y cuyo fin no ha sido detectado. La inversión ha introducido un primer acuífero con un contenido en agua que llega al 9 %, permeabilidad variable y que puede situarse entre 1 y 10 m; hasta los 24 m de profundidad existe un tramo de baja permeabilidad y contenido del orden de 1.5 %, que separa el primer acuífero del principal, que se prolonga hasta más de 100 m, con permeabilidad media y contenido en agua entorno del 3 %. Los valores de la constante de tiempo T_1 son elevados, pero dentro de los correspondientes a rocas fracturadas, salvo en máximo superficial, que es cuestionable.



SRM E18

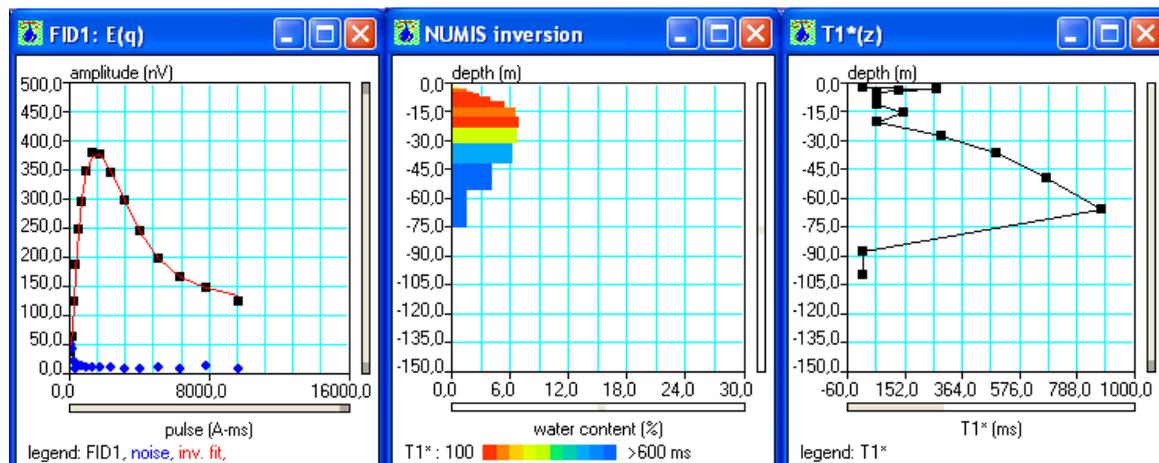
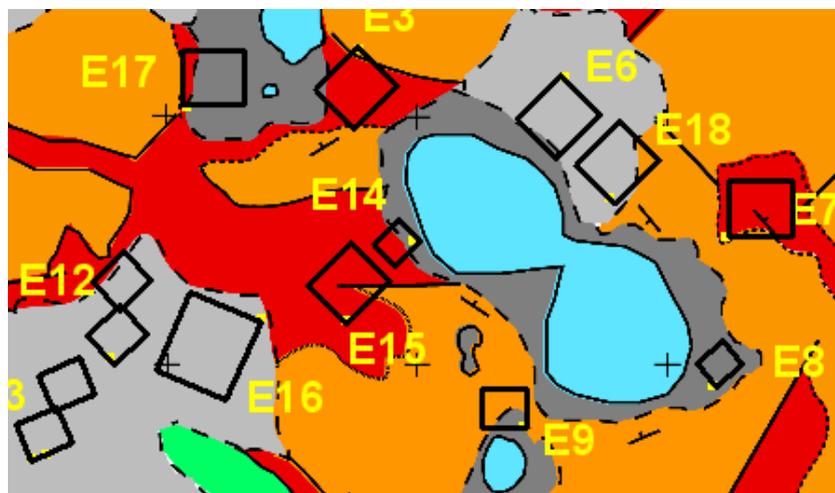


Fig. 114 Curvas de $E_0(q)$, $w(z)$ y $T_1(z)$ del SRM E18

La aplicación de un filtro RA de 15 ms ha suavizado las ya buenas curvas de campo $\mathbf{e(t)}$, (Figuras 81 y correspondientes del Anexo I), permitiendo calcular valores de E_0 y T_1 muy fiables. Las relaciones $EN/IN=2.7$ y $S/N=13.8$ permiten una buena interpretación cuantitativa de estos datos, con error de ajuste de FID1 del 2.7 %.

En la interpretación cualitativa del capítulo 7, basada en la morfología de la curva $\mathbf{E_0(q)}$, se indicaba la presencia de un acuífero que se inicia próximo a la superficie y alcanza una profundidad bien detectada en el SRM. La inversión divide este acuífero en dos tramos bien diferenciados: el primero, desde los 4 m de profundidad, presenta muy baja permeabilidad y contenido en agua creciente hasta el 7 %; separado por un tramo de permeabilidad media, entorno de los 28 m de profundidad se inicia un segundo tramo que puede llegar hasta los 75 m de profundidad, con un contenido en agua del 1.5 al 6 % y muy alta permeabilidad, presentando en su parte final, por debajo de los 60 m, valores de T_1 que pueden ser indicativos de la presencia de agua volumétrica, por lo que su distribución puede ser muy diferente de la dada por un modelo de capas horizontales.



12 ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LOS RESULTADOS DE SRM

12.1 Análisis de la distribución de acuíferos por su curva $E_0(q)$ y el resultado $w(z)$

La morfología de las curvas de Sondeos de Resonancia Magnética $E_0(q)$, al igual que la de los SEV, permite, mediante el establecimiento de su clasificación por tipos, hacer una distribución primaria del subsuelo según el tipo de acuífero, así como su seguimiento por correlación. Dicha clasificación se presenta en la Figura 115, de acuerdo a los siguientes tipos:

1. SRM E1 y E13: curvas sin señal de agua
2. SRM 11: curva de muy dudosa validez de su inversión
3. SRM E9 y E8: amplitud de señal inferior a 100 nV, detectando el fin del acuífero
4. SRM E7, E3 y E15: amplitud de señal inferior a 100 nV, sin detectar el fin del acuífero
5. SRM E14, E12, E17, E2 y E10, señal de hasta 200 nV, sin detectar el fin del acuífero
6. SRM E6, E5, E4, E18 y E16: señal de 250 a 400 nV, detectando el fin del acuífero

No se observa ninguna correlación entre la amplitud de la señal y el tamaño de la antena, lo que significa que con independencia de que una antena de mayores dimensiones dé lugar a una señal de mayor amplitud, dada la misma cantidad de agua en el subsuelo, puede hacerse una interpretación cualitativa primaria relacionando amplitud con cantidad de agua para el conjunto de los SRM medidos, así como establecer agrupaciones basadas en que la morfología depende de su distribución con la profundidad.

La distribución de estos modelos sobre el mapa geológico se representa en la Figura 116, mediante su codificación en color: 1- negro, 2- gris, 3- verde, 4-verde, 5-azul claro, 6-azul oscuro

Aunque la situación geológica es ciertamente muy compleja, en principio no se aprecia la existencia de una correlación entre el tipo de curva y la geología.

Puede establecerse una cierta agrupación (Figura 117), de tal manera que el tipo 1 y el tipo 2 establecen un límite sur occidental en el contacto con las calizas cretácicas, donde no se ha registrado la presencia de agua; los tipo 3 y 4, de bajo contenido en agua, encontrándose ésta muy superficial, se agrupan entorno de la laguna grande, excepto en el norte (SRM E6 y E18), con el tipo 3 situados sobre el Muschelkalk (E8 y E9); los tipos 5 y 6, de mayor amplitud de la señal, son más periféricos.

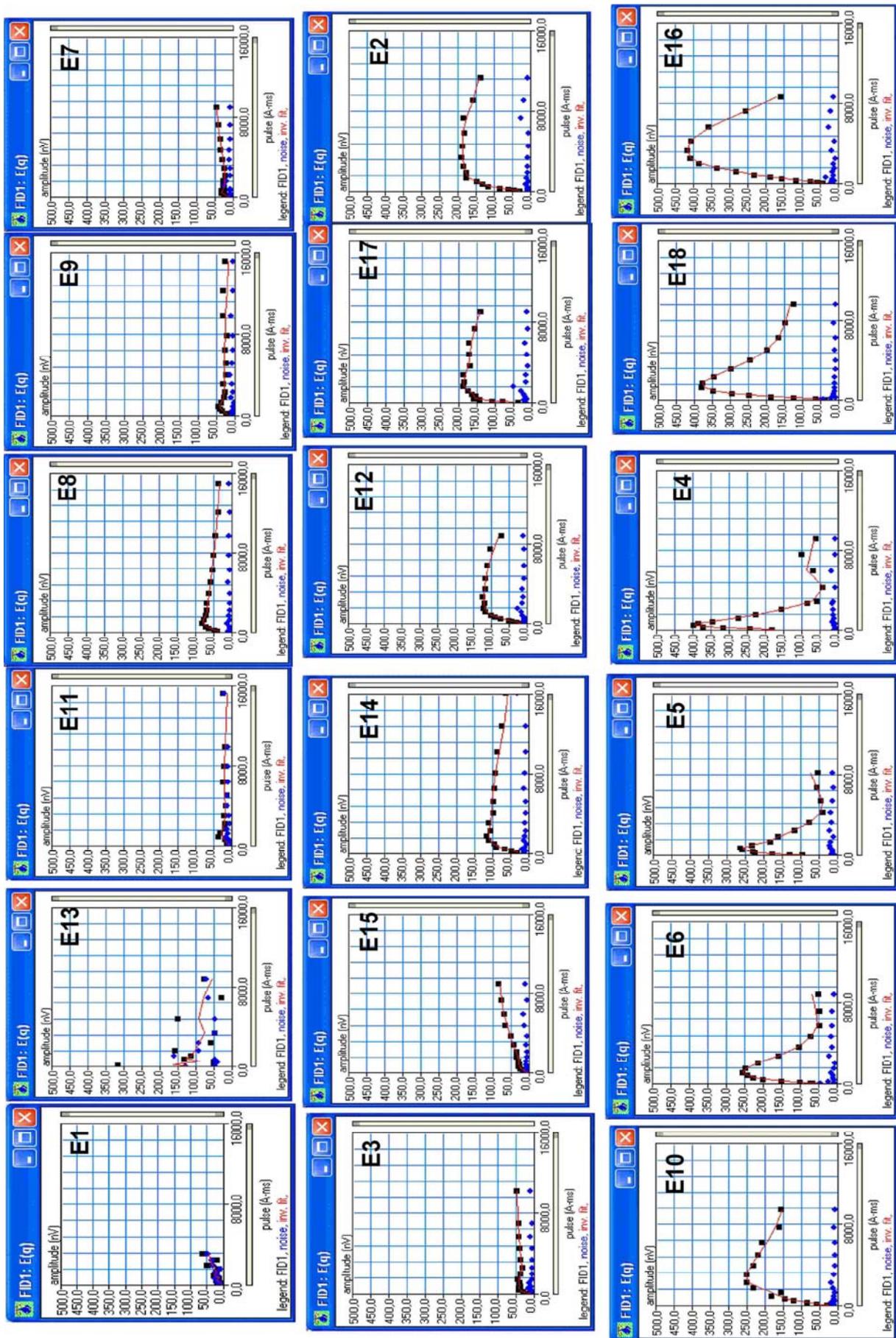


Fig. 115 Clasificación de las curvas SRM $E_0(q)$ por su morfología

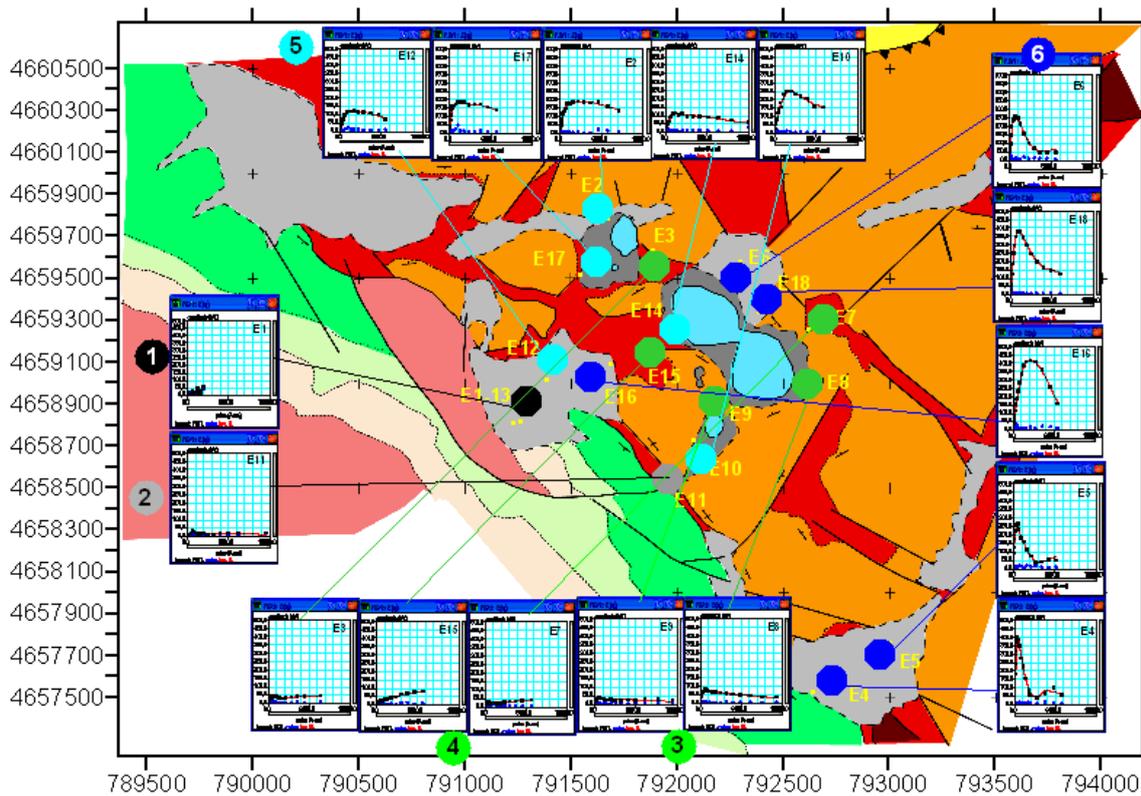


Fig. 116 Agrupación de los SRM según su clasificación por la morfología de su curva $E_0(q)$

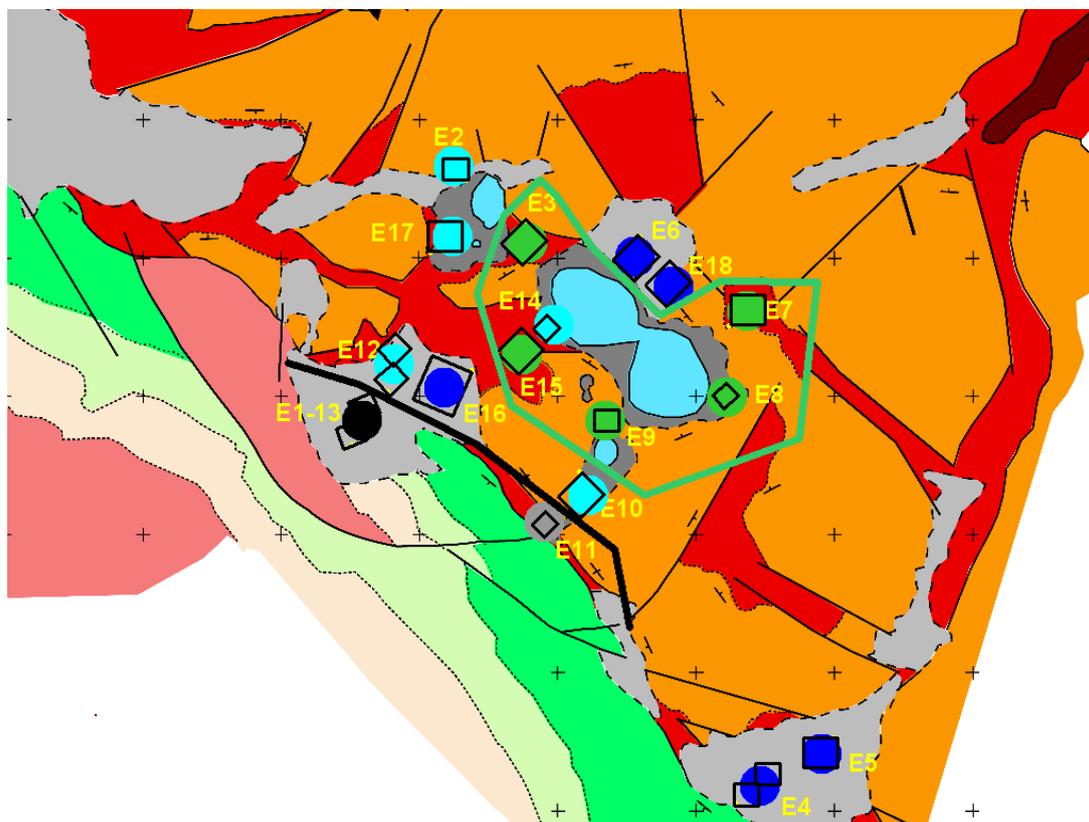


Fig. 117 Interpretación de la distribución de la situación hidrogeológica según la morfología de las curvas $E_0(q)$ de los SRM

Por lo que respecta a una clasificación de acuerdo con la distribución de agua encontrada en la inversión, o solución $w(z)$, junto con el valor de la constante de tiempo T_1 , indicador de la permeabilidad, pueden establecerse los siguientes grupos (Figura 118):

1. SRM E1 y E13: no detectada la presencia de agua
2. SRM E15 y E3: lugares con muy poco agua
3. SRM E7 y E11: lugares con agua superficial, de alta permeabilidad
4. SRM E2, E16 y E18: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 45 m
5. SRM E10, E12 y E17: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 30 m
6. SRM E8, E6, E9, E14, E4 y E5: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 15 m

Su agrupación sobre el mapa geológico se representa en la Figura 119, con una codificación en color: 1-negro, 2-gris, 3-verde, 4-azul oscuro, 5-azul claro, 6-azul grisáceo.

La interpretación que puede hacerse de esta agrupación por su relación con la geología y posición de las lagunas (Figura 120) es que el grupo 1 define el límite sur occidental de presencia de agua, junto al contacto con las calizas cretácicas. A este límite puede unirse el SRM E11, dada la poca fiabilidad de su inversión. El grupo 2 junto con el E7, lugares con muy poco agua, están medidos directamente sobre el Keuper, formando el E15 y E3 un pasillo de orientación Norte-Sur, que pasa entre las lagunas, donde la existencia de agua en los primeros 60 m es prácticamente nula.

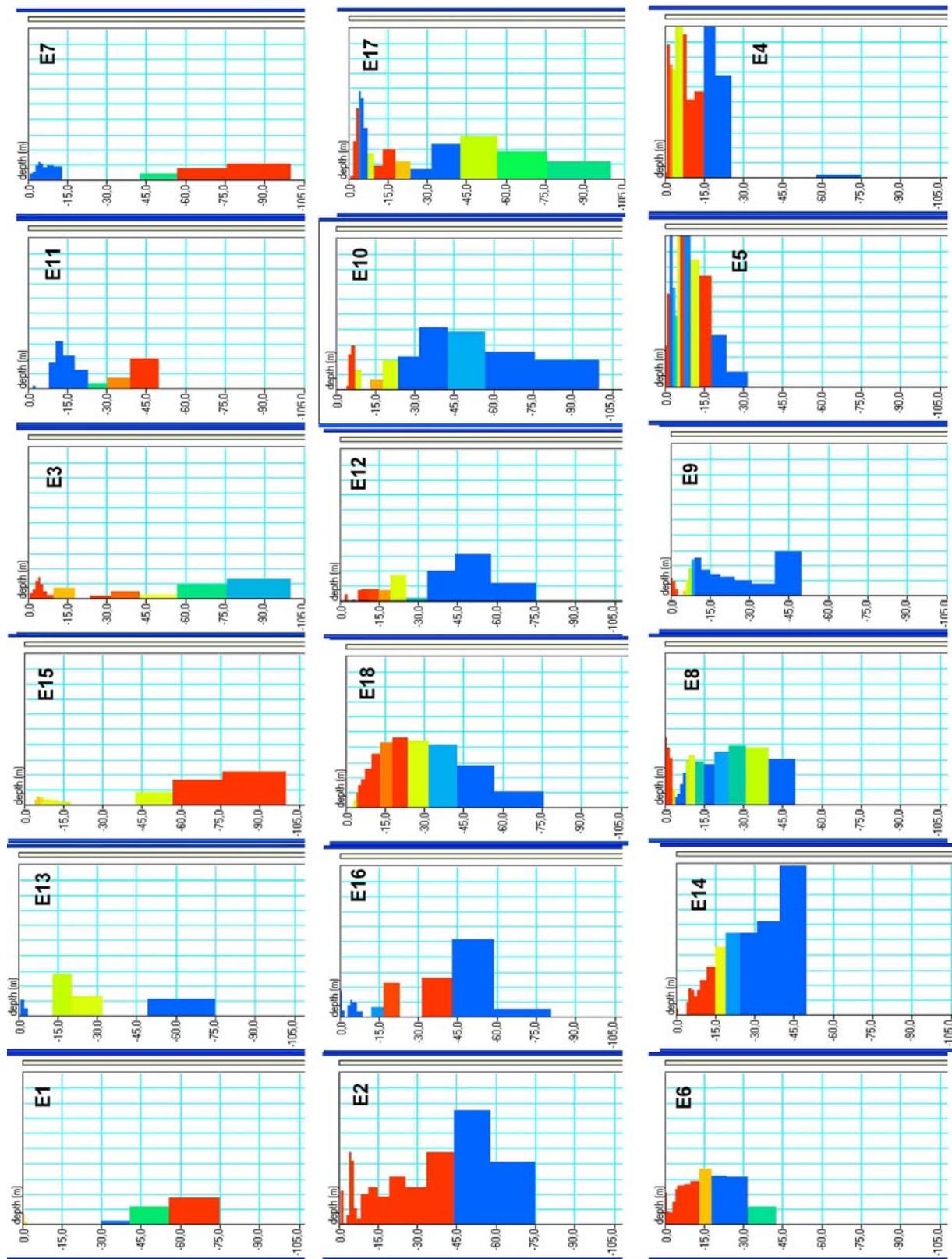


Fig. 118 Clasificación de los SRM según su distribución de agua y permeabilidad

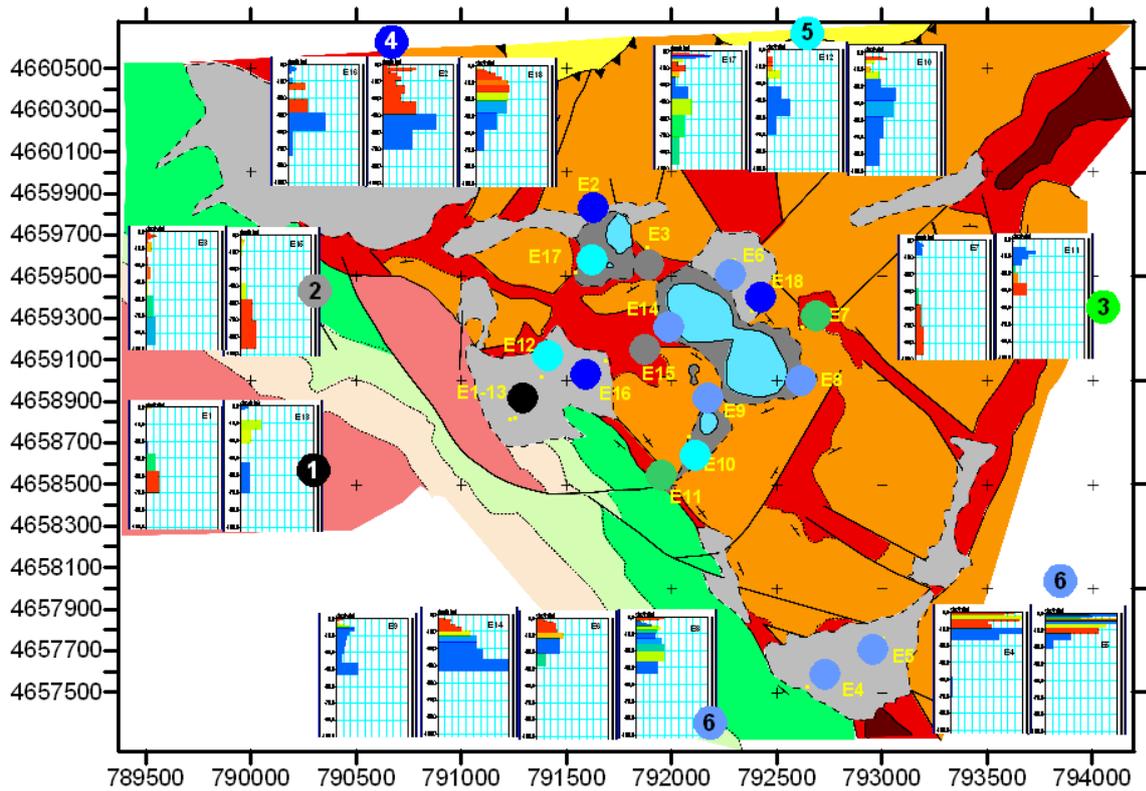


Fig. 119 Agrupación de los SRM según su clasificación basada en la distribución $w(z) T_1(z)$

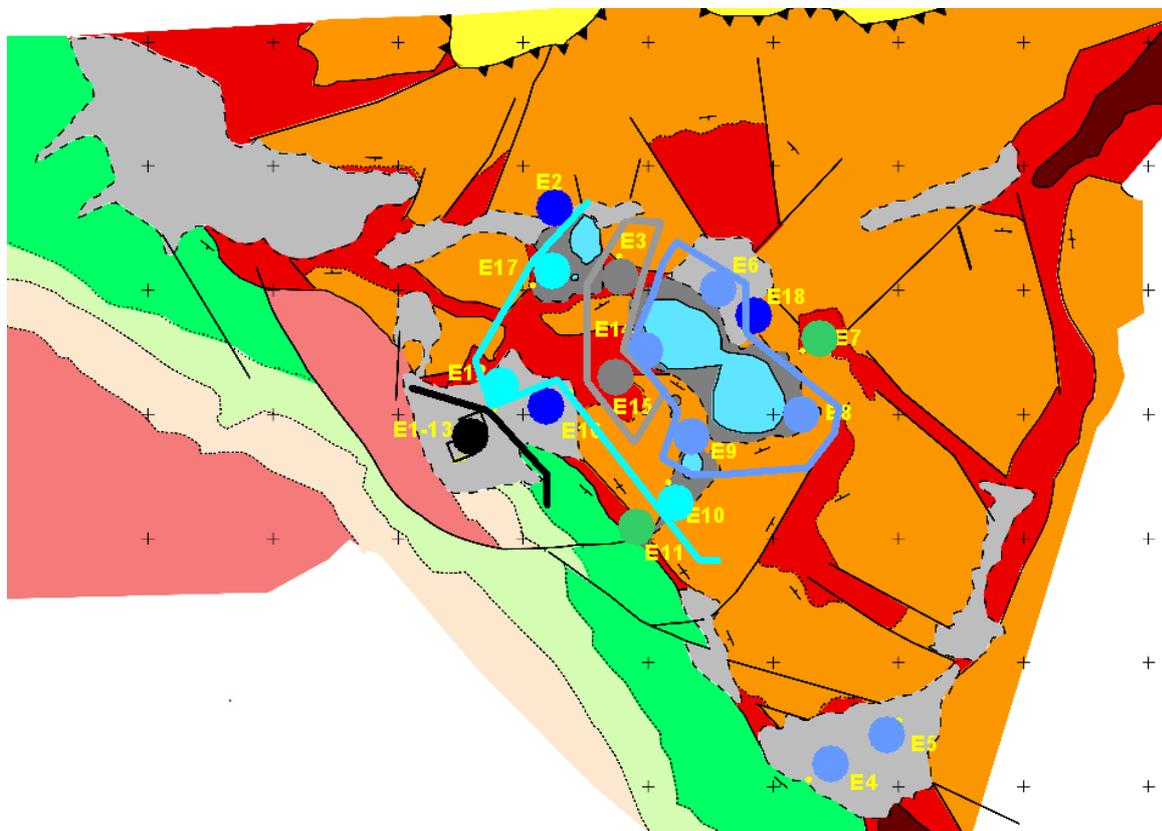


Fig. 120 Agrupación de los SRM según su clasificación por distribución de agua y permeabilidad

El tipo 6, en el que la zona de gran permeabilidad se sitúa entorno de los 15 m, forma el conjunto más próximo entorno de la laguna grande, discrepando el E18. El tipo 5, con gran permeabilidad a partir de los 30 m forma un grupo que bordea las lagunas a mayor distancia que el grupo 6, teniendo el borde norte de la laguna grande un comportamiento hidráulico distinto y caótico (están presentes los grupos 3, 4 y 6 a distancias muy próximas). La distribución del grupo 5, con cambio brusco de la permeabilidad a partir de los 45 m, es irregular. Los SRM E4 y E5 los consideramos fuera de esta correlación, por su distancia al entorno de las lagunas.

De acuerdo con esta interpretación, al menos desde las calizas del Cretácico hacia las lagunas la profundidad del agua con gran probabilidad de ser volumétrica (contenida en cavidades), va disminuyendo hacia las lagunas, sin que la conexión hidráulica con el acuífero del sinclinal de Estopiñán quede justificada.

En su conjunto, las distribuciones de los SRM de acuerdo con las curvas $E_0(\mathbf{q})$ y de $w(\mathbf{z})$, $T_1(\mathbf{z})$, parecen establecer una cierta zonación de comportamiento hidrogeológico entorno de las lagunas, excepto en su borde nororiental: la primera parte del subsuelo es de mucha menor permeabilidad que la más profunda, situándose su límite a mayor profundidad, pasando de 15 m a 45 m, según aumenta la distancia a las lagunas. El contacto con las calizas cretácicas parece suponer el fin de esta situación, no encontrándose agua a esas profundidades. La cantidad de agua (amplitud de la señal) aumenta con la distancia a las lagunas. Puede existir un pasillo de orientación norte-sur, que pasa entre la laguna pequeña y la grande, donde la presencia de agua es también muy escasa en los primeros 60 m.

12.2 Correlación de SRM en forma de perfiles

Con los SRM medidos se han formado cuatro perfiles, cuya posición se indica en la Figura 121, que atraviesan la laguna grande en sentido transversal y las bordean en sentido longitudinal.

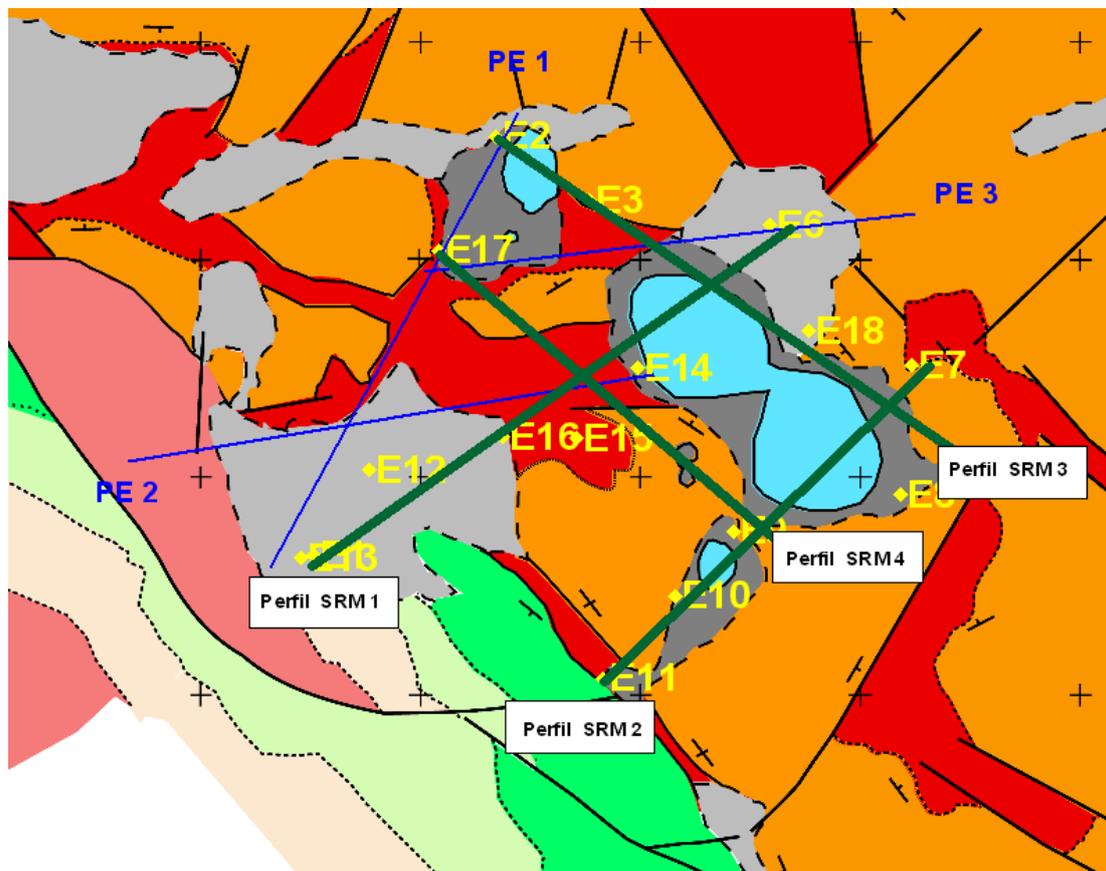


Fig. 121 Perfiles tomados para establecer una correlación entre los SRM medidos. Se han situado también los PE

Para el trazado de estos perfiles se ha tenido en cuenta la cota en m s.n.m. de cada SRM (Tabla 5), aunque su obtención mediante GPS no ofrece mucha exactitud. La cota de las lagunas se ha tomado de la bibliografía sobre las mismas.

El perfil 1 (Figura 122), partiendo del contacto con las calizas del Cretácico al SO, donde no se ha detectado la presencia de agua al menos en los primeros 75 m de profundidad (E1 y E13), indica que existe un acuífero entre el E13 (dudoso) y el E16, a partir de unos 15-20 m de profundidad en materiales de muy baja permeabilidad, separado por un acuitardo de un nuevo acuífero que comienza sobre 35-45 m de profundidad y de gran permeabilidad, con indicadores de poder tratarse de agua volumétrica ($T_1 > 1000$ ms). La litología de superficie en esta zona son materiales del Keuper, cubiertos por Cuaternario, pero la asignación de estos materiales a la posición en profundidad del agua es dudosa, habiéndose tomado la correspondiente a la interpretación efectuada de las secciones geoelectricas bajo un supuesto de asignación de resistividades a litologías.

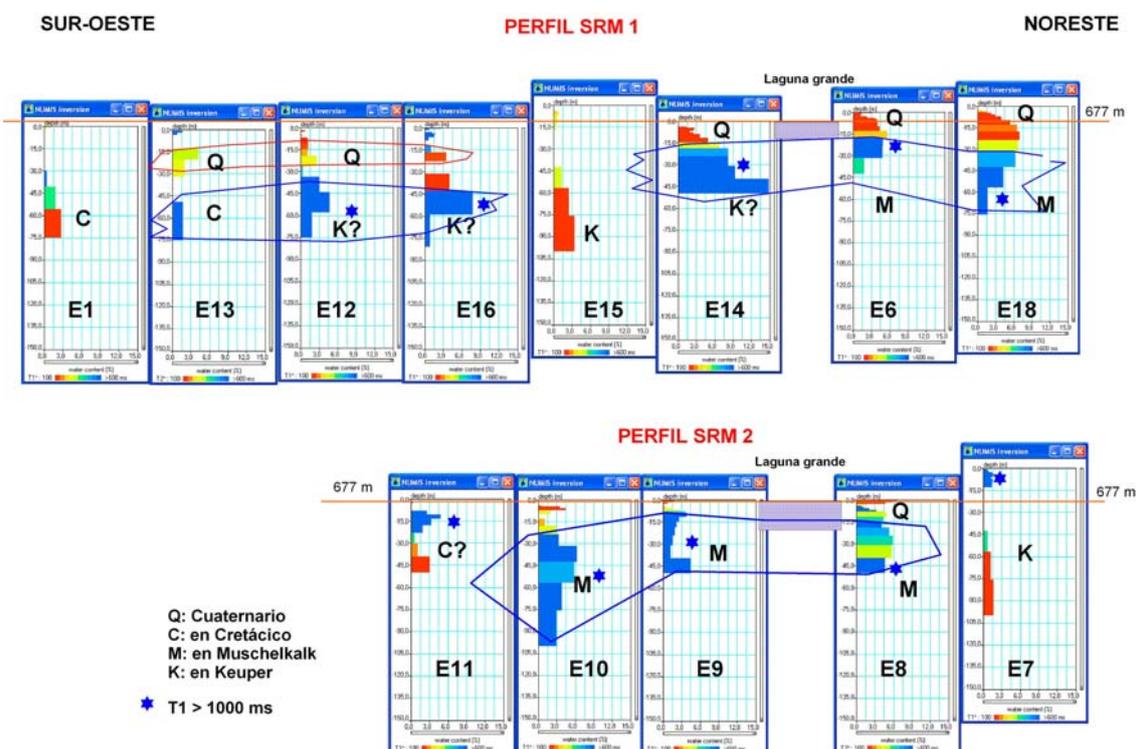


Fig. 122 Perfiles de correlación de SRM 1 y 2, en sentido transversal a las lagunas

El SRM E15 rompe este acuífero, o al menos sus características, detectándose nuevamente otro acuífero de las mismas características bajo los SRM E14, E6 y E18 (aunque este último se encuentra más hacia el Sur de la alineación del Perfil 1), y cuya cota de inicio en profundidad coincide con la base de la laguna grande. La litología de superficie corresponde al Cuaternario, y a diferencia del sector al sur de la laguna, este acuífero está en contacto con el superficial, de muy baja permeabilidad. La asignación de litologías presenta también dudas.

El perfil 2 (Figura 122), paralelo y al sur del anterior, se inicia en el SRM E11, en contacto con las calizas cretácicas, con un tramo de agua de dudosa credibilidad por la calidad de los datos, pero que en cualquier caso no sobrepasa los 45 m, siendo la permeabilidad muy pequeña por debajo de los 20 m. Los SRM E10, E9 y E8 configuran otro acuífero bajo la laguna de las mismas características que el del perfil 1, aunque quizá con menos agua en la parte superficial; se sitúan sobre cuaternario, que debe ser suprayacente a calizas del Triásico. El E7 marca una interrupción en esta situación hidráulica, siendo prácticamente nula la presencia de agua.

Los perfiles 3 y 4 (Figura 123) transcurren paralelos a las lagunas, cada uno a un lado de las mismas. El perfil 3, al norte, indica una diferencia evidente entre ambos lados de la laguna pequeña: mientras que al norte, en el E2, sobre calizas del Muschelkalk, tras un tramo potente de materiales muy impermeables se localiza un acuífero a unos 45 m de profundidad, el SRM E3 situado entre ambas lagunas y en el Keuper carece prácticamente de agua. La situación reflejada por los SRM E6, E18 y E8, todos ellos sobre cuaternario suprayacente al Muschelkalk, es la de un acuífero de alta

permeabilidad a partir de unos 20 m de profundidad, con indicadores de agua volumétrica, precedido de un tramo muy impermeable con agua. La profundidad de este acuífero coincide en cada tramo con la profundidad de sendos senos de la laguna grande.

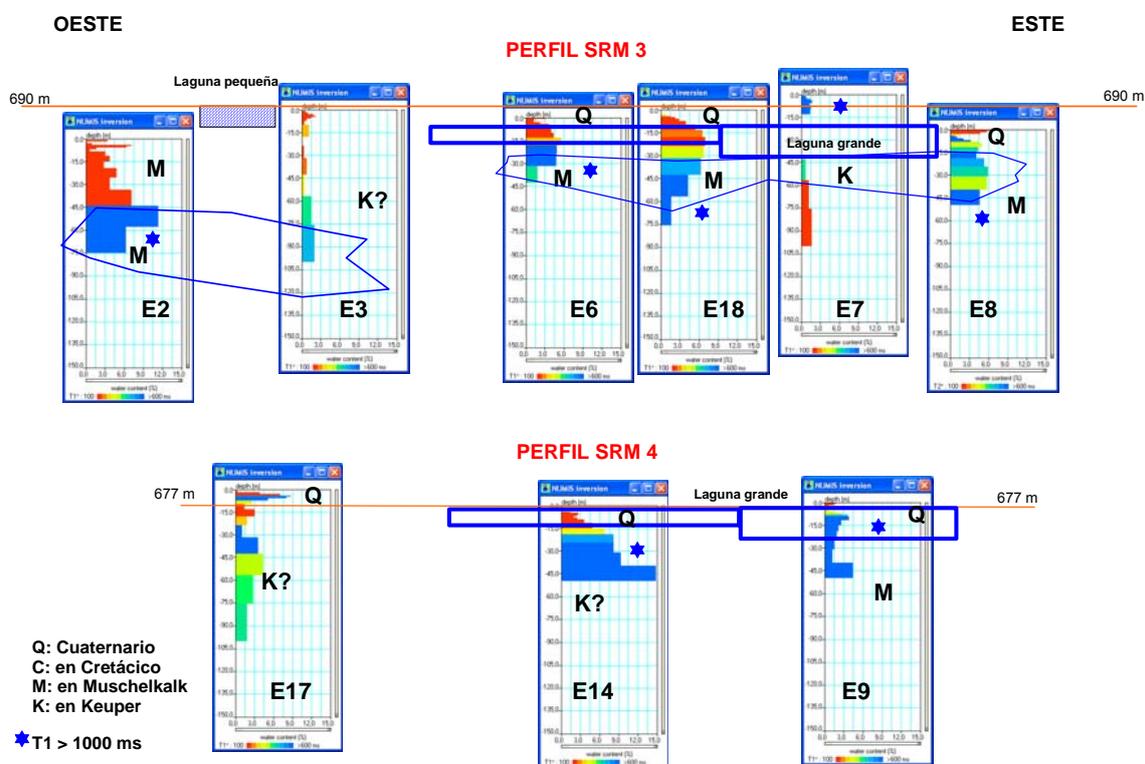


Fig. 123 Perfiles de correlación de SRM 3 y 4, en sentido longitudinal a las lagunas

El SRM E7 está más alejado del borde de la laguna que los anteriores, y es un lugar seco.

El perfil 4, al sur de las lagunas, indica en su inicio (SRM E17) una situación intermedia entre los E2 y E3. Los SRM E14 y E9 indican una situación muy parecida al borde norte, si bien en el E9 se detecta la presencia de agua a menor profundidad.

En conjunto, y corroborando los resultados del análisis de la distribución de acuíferos por su curva $E_0(q)$ y el resultado $w(z)$, puede establecerse la hipótesis de que existe un acuífero de muy alta permeabilidad, con probabilidades de tratarse fundamentalmente de agua volumétrica, bajo la laguna grande. La profundidad del inicio del agua en dicho acuífero coincide con el fondo de la laguna. Su cartografía puede establecerse en función de la distribución de los datos según se indica en la Figura 124. Bajo la laguna pequeña pudiera existir también un acuífero de estas características, sin conexión con el anterior y situado a mayor profundidad, lo que descarta la posibilidad de que sea el tributario de dicha laguna.

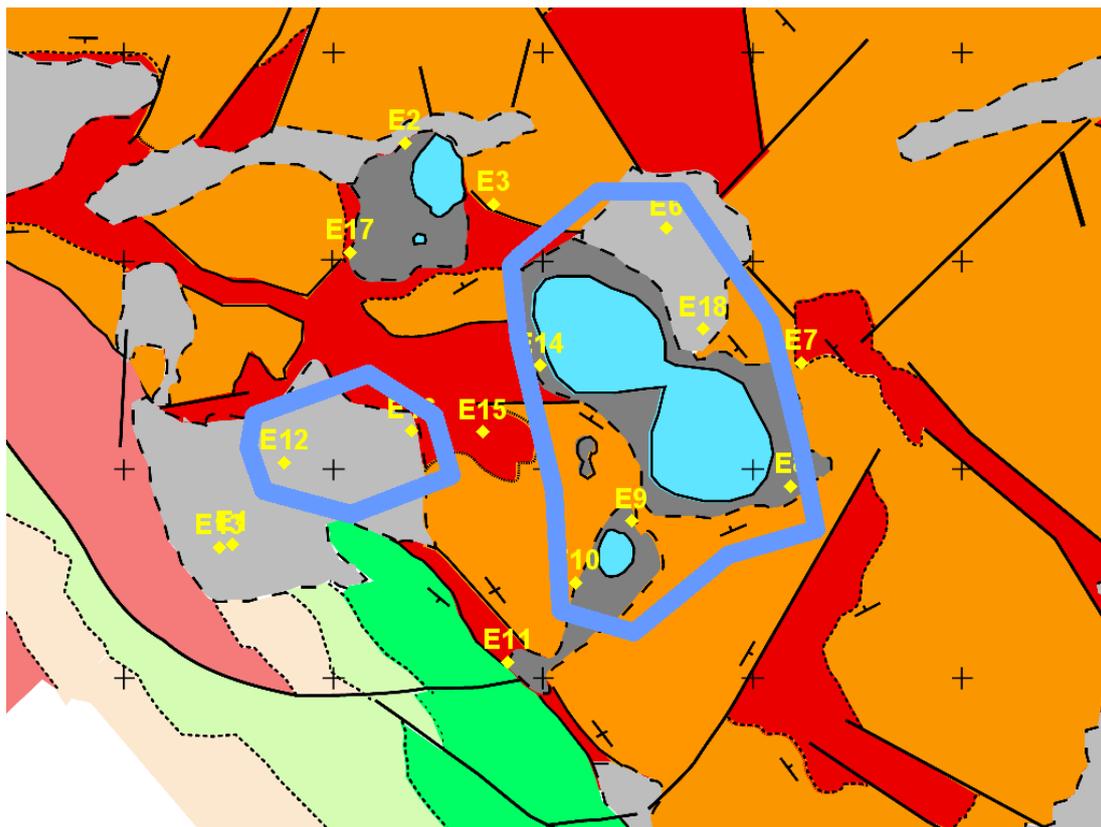


Fig. 124 Cartografía probable de un acuífero de alta permeabilidad, cuyo inicio en profundidad coincide con la base de la laguna grande

Al oeste de la laguna grande existe también un acuífero similar, a mayor profundidad y sin aparente conexión con entre ellos, siendo el área formada por los E15, E11 y E3 prácticamente seca. La laguna grande y su acuífero subyacente parecen estar situados sobre terrenos calcáreos del Muschelkalk, recubiertos parcialmente por materiales cuaternarios que se han constituido en acuíferos superficiales de muy baja permeabilidad. Los SRM efectuados sobre afloramientos del Keuper (E17, E3, E15, E7 y E11) son en los que menos agua se ha detectado.

En cualquier caso, debe entenderse que la correlación efectuada no significa forzosamente la existencia de una continuidad, ya que la posible disposición del agua en zonas o muy fracturadas o incluso en cavidades, no permite definir su geometría con los pocos datos tomados.

13. INTEGRACIÓN DE DATOS GEOELÉCTRICOS Y DE RESONANCIA MAGNÉTICA

La información geoelectrica ha sido hasta ahora utilizada para efectuar una interpretación de la distribución de las rocas en el subsuelo, estableciéndose indirectamente una asignación a los pisos estratigráficos existentes (Capítulo 4, Figuras 12 a 15). Los datos geoelectricos han sido también utilizados para establecer los modelos en los que basar el cálculo de las matrices de inversión de los SRM. Tras la interpretación independiente de los SRM anteriormente efectuada, se va a proceder a la fusión de ambos tipos de datos, con el objetivo fundamental de ver la posibilidad de establecer una correlación entre resistividad y acuíferos, lo que permitiría ratificar ambas interpretaciones y además extender los datos semi-puntuales de los SRM a mayores extensiones de terreno.

La posición de los PE y de los SRM se indica en la Figura 125. En las Figuras 126 y 127 se presenta la superposición de la inversión de los SRM a la interpretación geológica de los PE.

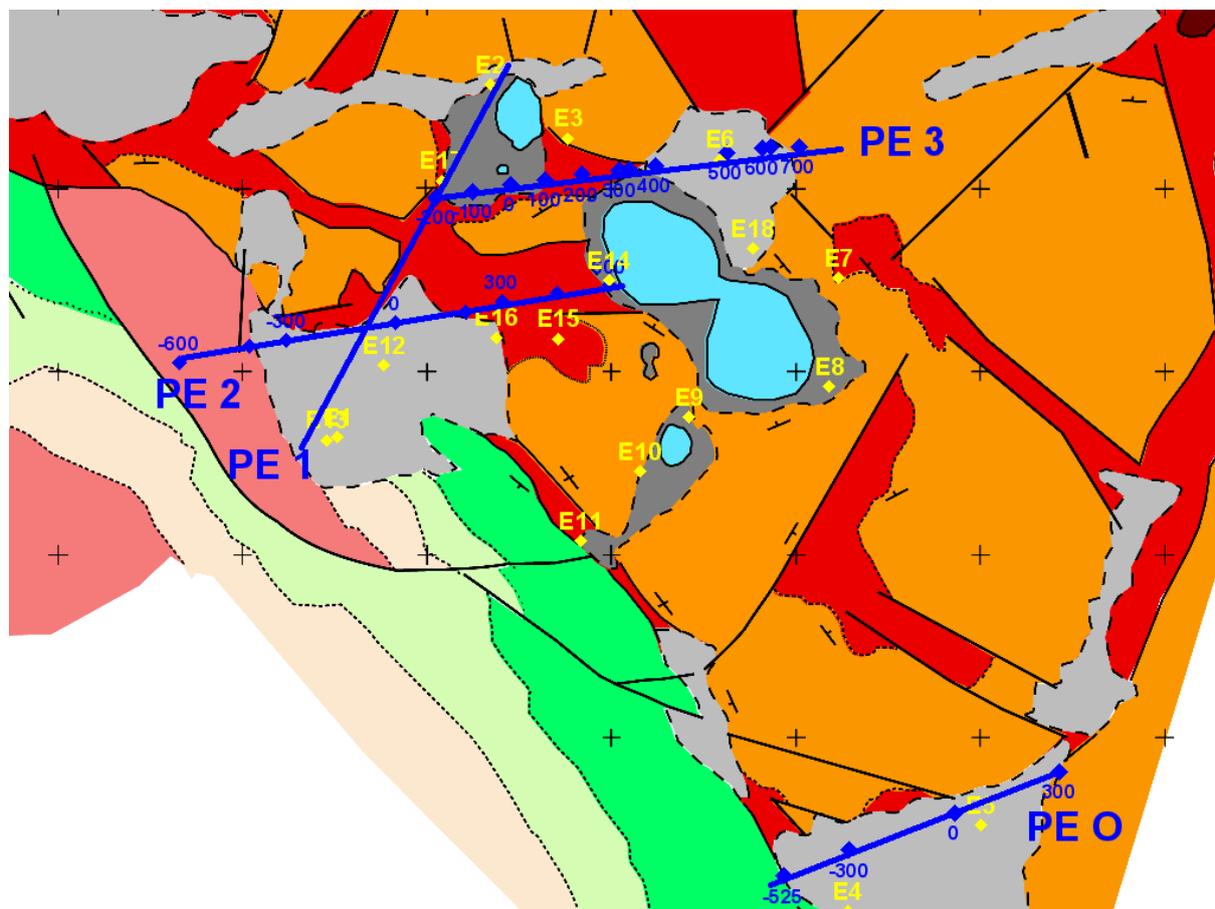


Fig. 125 Posición de los Perfiles Eléctricos y Sondeos de Resonancia Magnética

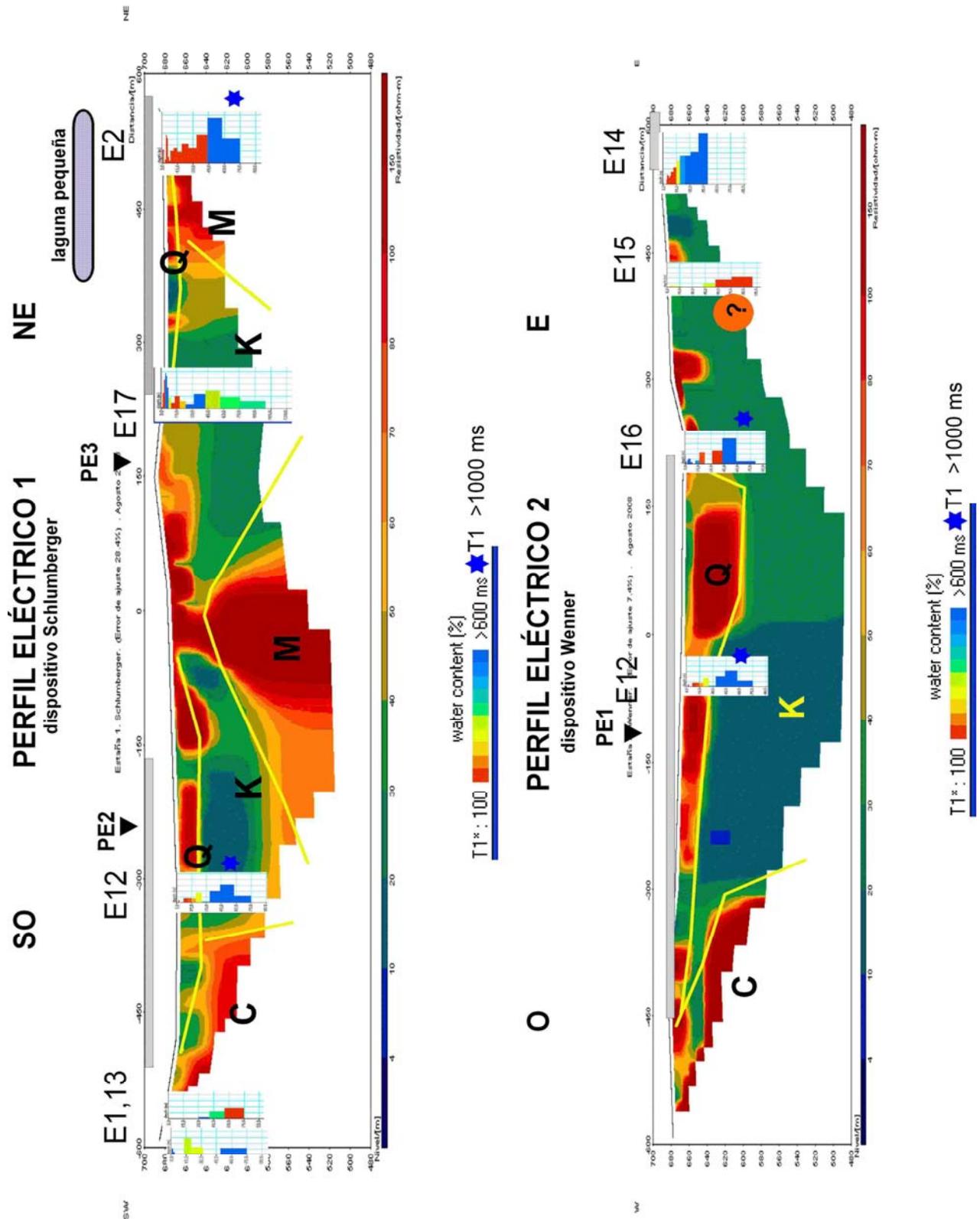


Fig. 126 Interpretación integrada de datos de Resonancia Magnética y Perfiles Eléctricos. PE1 y PE2

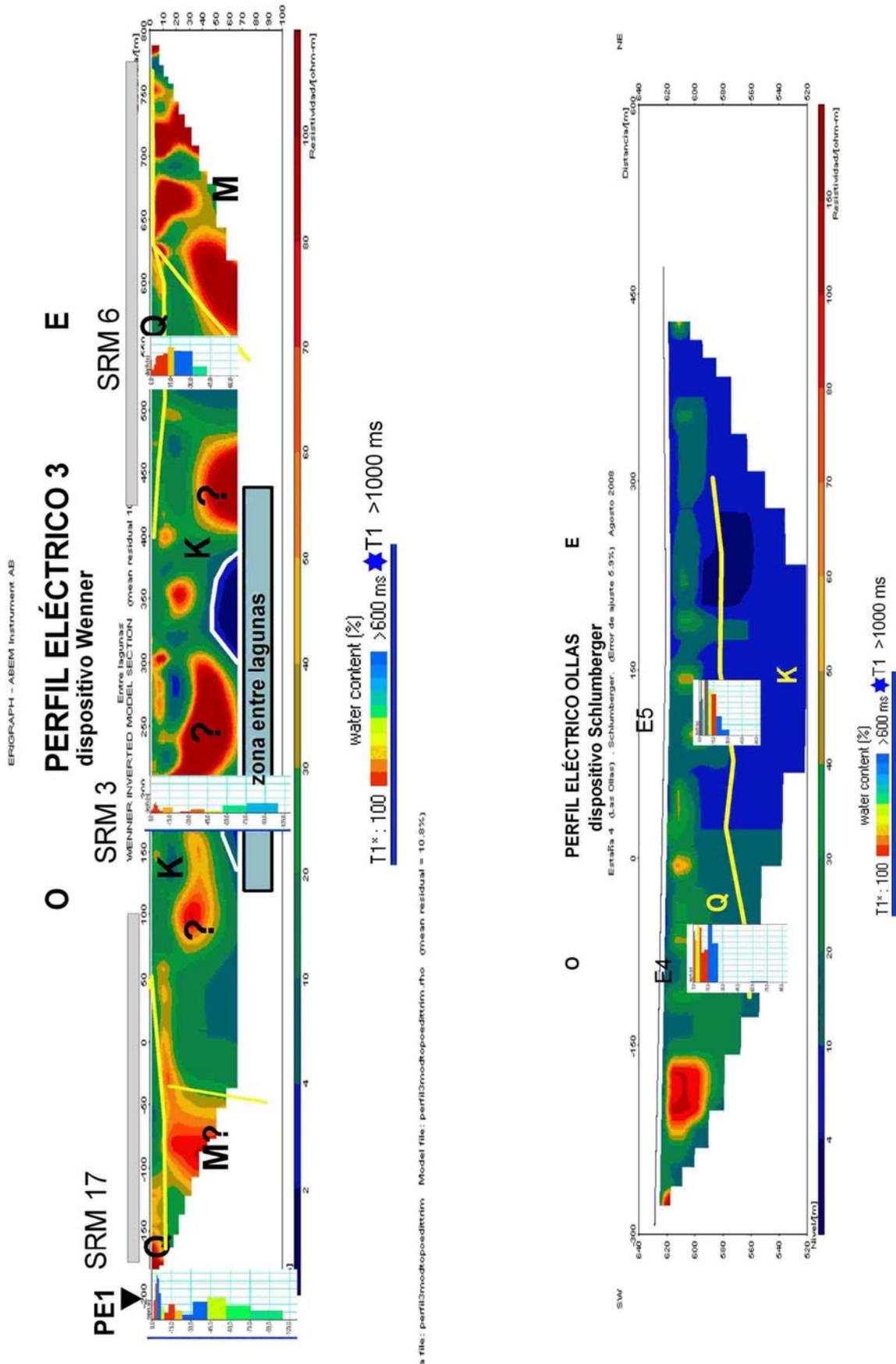


Fig. 127 Interpretación integrada de datos de Resonancia Magnética y Perfiles Eléctricos. PE3 y PE Ollas

Para verificar si existe alguna relación entre la situación geoelectrica y la situación hidrogeológica, se va a analizar la resistividad de los diferentes tramos obtenidos en la inversión de los SRM, utilizando su agrupación según la distribución de agua $w(z)$ y su permeabilidad (indicador constante de tiempo T_1). Los grupos formados con estos criterios fueron (Figura 119):

1. SRM E1 y E13: no detectada la presencia de agua
2. SRM E15 y E3: lugares con muy poco agua
3. SRM E7 y E11: lugares con agua superficial, de alta permeabilidad
4. SRM E2, E16 y E18: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 45 m
5. SRM E10, E12 y E17: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 30 m
6. SRM E8, E6, E9, E14, E4 y E5: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 15 m

Los SRM del primer grupo se encuentran en el extremo sur del PE1 donde, aunque no existe cobertura de datos eléctricos, parecen estar situados bajo un pequeño recubrimiento cuaternario de resistividad intermedia, de tal forma que la profundidad de investigación ha alcanzado las calizas del Cretácico, con situación de alta resistividad (Figura 128).

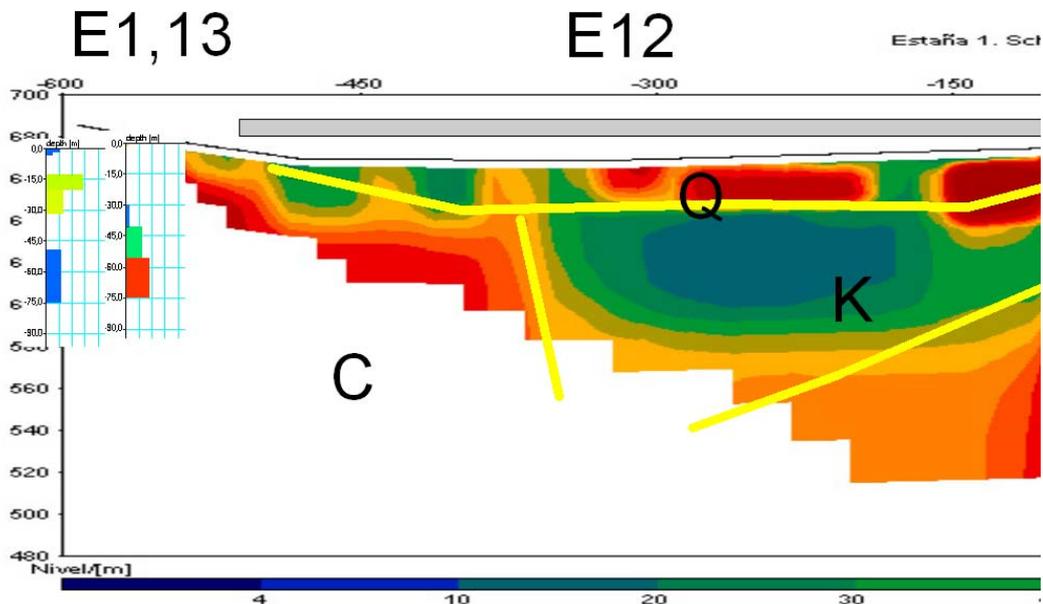


Fig. 128 Situación geoelectrica de los SRM E1 y E13 del grupo 1 (lugares secos) en el Perfil PE1

De los SRM del grupo 2, en los que se ha detectado muy poco agua, el E15 se encuentra en el extremo oriental del PE2 (Figura 129), en Keuper de resistividad alta en superficie, que pasa a intermedia en profundidad, aunque a partir de los 60 m, donde el SRM indica la presencia de agua en terrenos de muy baja permeabilidad se sitúa una anomalía resistiva (notable en la sección con dispositivo Schlumberger, Figura 8) que pudiera denotar la presencia de calizas triásicas.

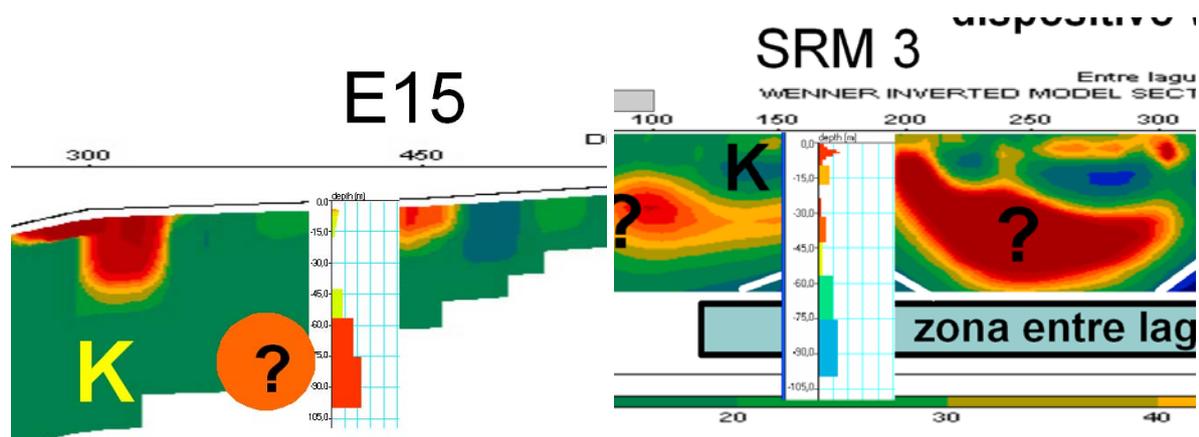


Fig. 129 Situación geoelectrica de los SRM del grupo 2 (muy poca presencia de agua). E15 en el PE2 y E3 en el PE3

El SRM E3 está medido directamente sobre el Keuper a unos 150 m del perfil eléctrico PE3, por lo que su proyección sobre el mismo (Figura 129) puede carecer de significado, dada la complejidad estructural de la zona; es de todas formas notable que el Keuper en esta zona presenta muchas anomalías resistivas, y que a partir de los 60 m de profundidad, donde aparece algo más de agua y en terrenos de mayor permeabilidad, se localiza una anomalía conductora.

El grupo 3, de lugares con agua superficial y alta permeabilidad, SRM E7 y E11, no está caracterizado geoelectricamente, ya que se encuentran muy alejados de los Perfiles Eléctricos.

En el grupo 4, donde se detectan terrenos de permeabilidad muy baja en superficie, pasando a gran permeabilidad a partir de los 45 m, para el SRM E18 no hay información geoelectrica; el E2, aunque en el extremo norte del PE1, puede asignarse a terrenos muy resistivos, con valores inferiores en superficie (Figura 130). El SRM E16 (Figura 130) en el PE2, viene definido por valores de resistividad alta para el tramo superior, pasando a terrenos conductores para el tramo de mayor permeabilidad.

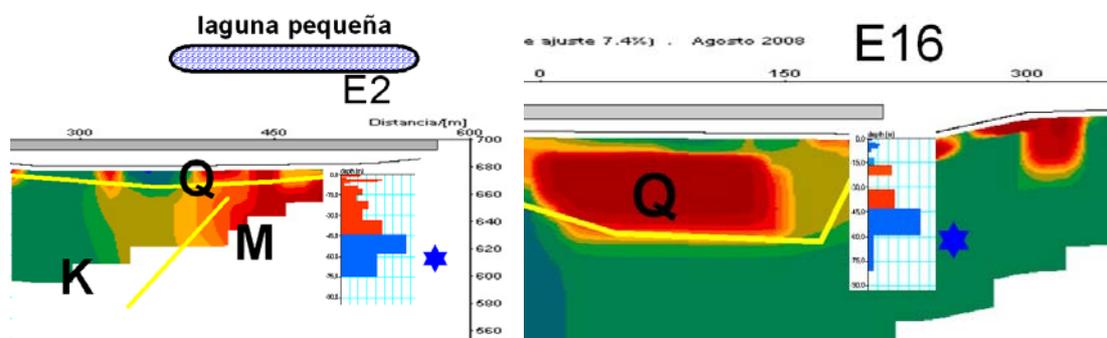


Fig. 130 Situación geoelectrica del SRM E2, del grupo 4, en el PE1, y del SRM E16 en el PE2

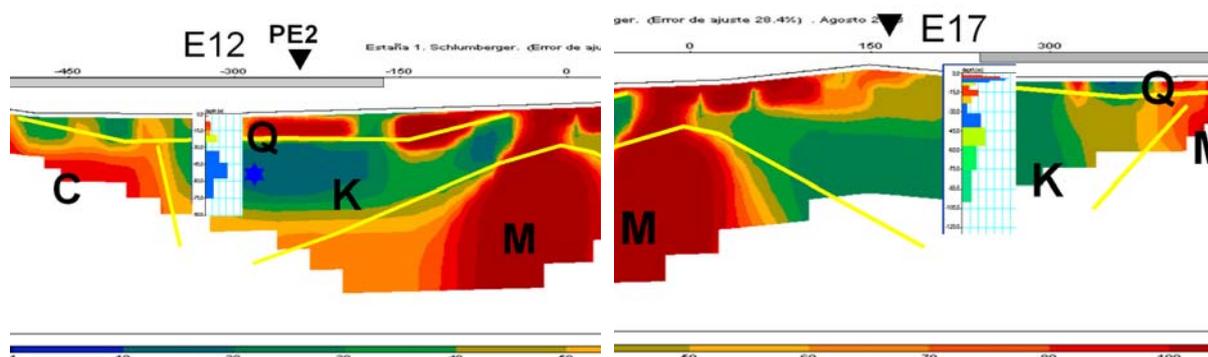


Fig. 131 Situación geoelectrónica de los SRM E12 y E17, del grupo 5, en el PE1

El grupo 5 se ha definido también por los SRM donde se encuentra muy baja permeabilidad en el primer tramo, pasando a gran permeabilidad a partir de los 30 m. No hay información geoelectrónica para el SRM E10 de este grupo. El SRM E12, en el PE1 (Figura 131) viene definido por valores de resistividad alta para el tramo superior, pasando a muy conductor para el tramo de mayor permeabilidad. El SRM E17, tras el acuífero superficial en materiales del Cuaternario, tiene su tramo de baja permeabilidad sobre terrenos más resistentes que el tramo más permeable.

En el grupo 6, con distribución del subsuelo en muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 15 m, no hay información geoelectrónica para los SRM E8 y E9. La situación del SRM E6 indica valores más conductores para el tramo inferior, siendo el superior materiales del Cuaternario poco resistentes (Figura 132). El E14 está situado en el extremo oriental del PE2, sin cobertura de resistividad, pudiendo asignar el tramo inferior a valores poco resistentes.

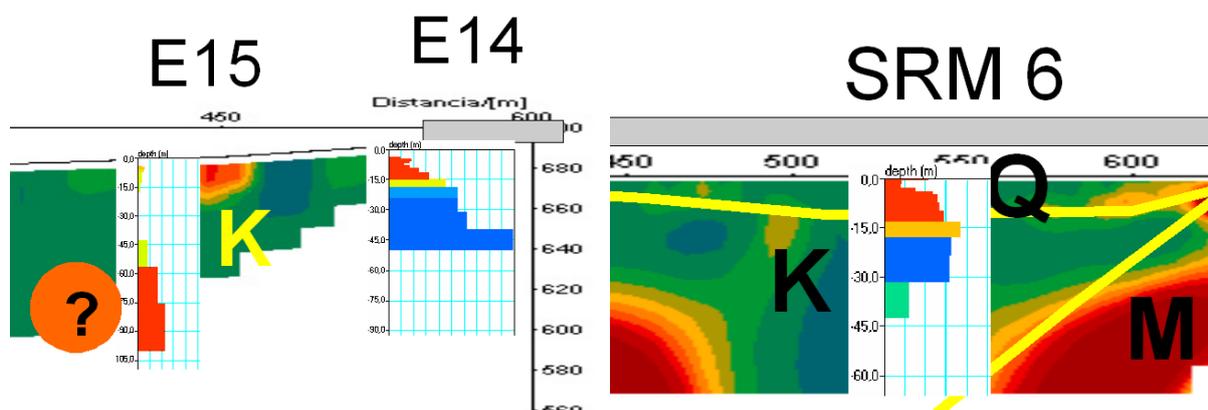


Fig. 132 Situación geoelectrónica del SRM E14 y E6, del grupo 6, en el PE2 y PE3

Respecto de los SRM E4 y E5, ambos en el paraje de las Ollas, PE de las Ollas, presentan también mayor resistividad (Figura 133) en el tramo superior; aunque en ambos el agua parece encontrarse en materiales del Cuaternario, en el E5 el basamento impermeable serían materiales del Keuper, muy conductores, mientras que en el E4, según la asignación efectuada en el capítulo 4, serían en materiales del Cretácico.

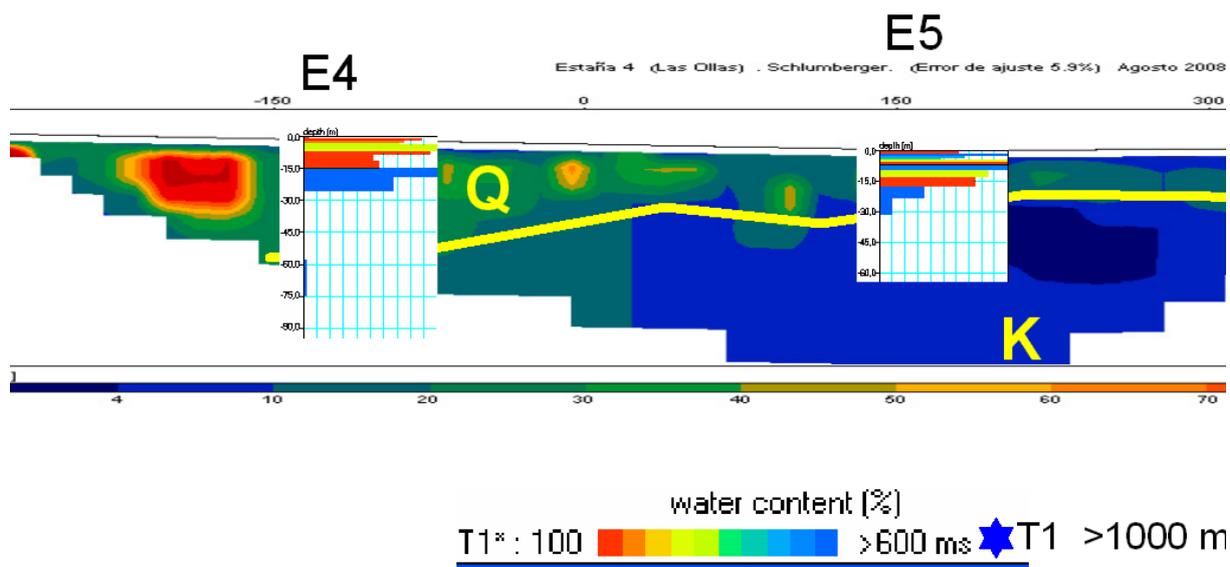


Fig. 133 Situación geoelectrónica de los SRM E4 y E5, del grupo 6, en el PE de las Ollas.

En todos los SRM de los que existe información geoelectrónica, por su proximidad a un Perfil Eléctrico, la presencia de agua con altos valores de la permeabilidad se corresponde con una baja resistividad, mientras que los tramos donde, aún detectándose la presencia de agua, la permeabilidad es muy pequeña se corresponden con terrenos resistivos. Los contenidos en agua no son muy distintos entre ambos tramos (poco y muy permeable) y, excepto en los SRM E2 y E14 y los de la zona de Ollas, se trata de valores pequeños, no superando una media del 4-5 %. La modificación que el contenido en agua produce sobre la resistividad no parece ser por lo tanto el carácter diferenciador de las secciones geoelectrónicas, sino la permeabilidad de los mismos, lo que va más unido a la propia litología. Sin embargo, la posibilidad de que el agua esté contenida en cavidades o zonas muy fracturadas puede modificar en gran manera el criterio diferenciador por la resistividad.

De acuerdo con estas observaciones, no parece aconsejable efectuar una interpretación hidrogeológica de las secciones geoelectrónicas, en el sentido de pretender calificar zonas como de mayor contenido en agua de acuerdo con su resistividad.

14 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo general de estos trabajos es desarrollar un modelo geológico que permita determinar las relaciones entre el agua subterránea y las lagunas. Este objetivo se ha dividido en dos objetivos específicos:

- Estudiar la continuidad en profundidad del Cuaternario (limos y arcillas con gravas y cantos), Keuper (arcillas y yesos) y Muschelkalk (dolomías y calizas), así como el contacto entre estos terrenos (fundamentalmente el Keuper) y las calizas del Cretácico Superior. Para este objetivo se ha pretendido utilizar como parámetro diferenciador la resistividad, medida en Perfiles Eléctricos.
- Establecer límites hidrogeológicos en el entorno de las lagunas de Estaña, lo que pretende hacerse con ayuda del método de Sondeos de Resonancia Magnética, determinando la presencia de agua y su profundidad.

Las bases de partida se basan en suponer que los materiales dolomíticos triásicos (Muschelkalk) están saturados de agua y funcionan como acuífero local, con numerosas surgencias en su contacto con el Keuper, y que descargan hacia las lagunas, considerándose la posibilidad de que existan aportes subterráneos procedentes de las calizas cretácicas, para lo que debe existir una continuidad hidráulica entre ambos materiales calizos. Otro punto de partida es la suposición de que tanto el Keuper como el Muschelkalk pueden estar carstificados.

14.1 Respecto de la Geología del subsuelo

Para interpretar de las secciones geoelectricas y establecer la distribución geométrica de los diversos materiales del subsuelo, se ha propuesto una posible clasificación primaria de estos materiales por su resistividad, ajustándolas al rango considerado en las secciones, y que es el indicado en la Figura 134 (copia de la Figura 11):

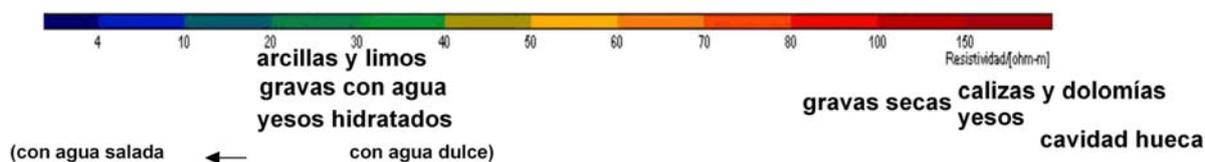


Fig. 134 (copia de la Fig.11) Clasificación primaria de las rocas en la zona prospectada de acuerdo a su resistividad

No obstante, la influencia de la circulación de la corriente eléctrica simultáneamente por diversos materiales en las mediciones de la resistividad, la fracturación de las calizas, el relleno de las posibles cavidades, el contenido en agua y la salinidad de la misma, pueden hacer variar esta clasificación de manera importante, de tal forma que las calizas podrían tener un comportamiento más conductor.

Esto hace que sea posible una interpretación alternativa, casi completamente opuesta a la efectuada en el capítulo 4 (Interpretación de los Perfiles Eléctricos).

Para el Perfil 1 se presentan en la Figura 135 la interpretación anteriormente efectuada (reproducción de la Figura 126) y otra alternativa fundamentada en los resultados de los Sondeos de Resonancia Magnética.

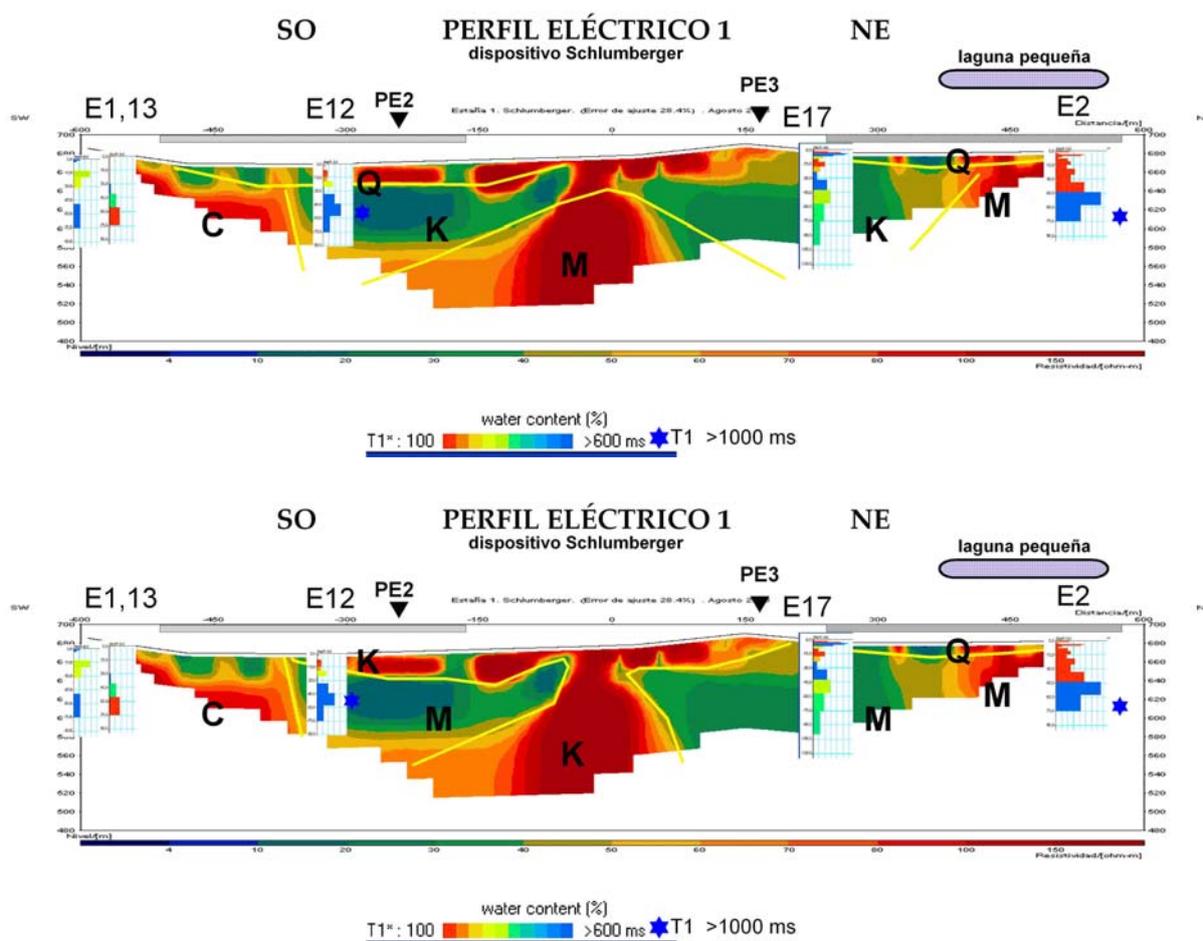


Fig. 135 Perfil Eléctrico 1: la parte superior es reproducción de la Figura 126, y en la inferior se presenta otra posible interpretación.

En la hipótesis de que los yesos del Keuper no están hidratados, su comportamiento eléctrico sería como resistivos, y junto con las arcillas su comportamiento hidráulico sería de terrenos muy impermeables. Conjugando esta hipótesis con el resultado de la inversión de los SRM, cuya característica general es la existencia de dos tramos con cambio brusco de la permeabilidad, siendo mucho menor la superior, y con la cartografía de superficie, se podría asignar al Muschelkalk lo que anteriormente se asignó al Keuper. Cuando las calizas estén muy fracturadas y/o carstificadas, se pueden manifestar como materiales de más baja resistividad; sin embargo los valores inferiores a 40 ohm.m aquí contemplados son en principio excesivamente pequeños para representar a calizas y dolomías, incluso saturadas de agua, lo que hace dudar de esta asignación. Por otra parte, esta segunda interpretación supondría que el espesor de cuaternario es inferior a la potencia mínima

detectable en la sección geoelectrica, es decir, que su presencia no se manifiesta como una capa con resistividad diferenciada.

En el Perfil Eléctrico 2 (Figura 136) se pueden aplicar los mismos criterios, invirtiendo también la interpretación anterior; este perfil pone además en evidencia que la asignación a materiales del Cuaternario puede carecer de significado, siendo posible que si estos aluviales tuvieran en realidad muy poca potencia no estén ni siquiera representados en las secciones geoelectricas. La variación de la resistividad en materiales del Keuper estaría relacionada con el mayor o menor contenido en yesos u arcillas y en la hidratación de los yesos. La resistividad de las calizas triásicas estaría reflejando su grado de fracturación y contenido en agua.

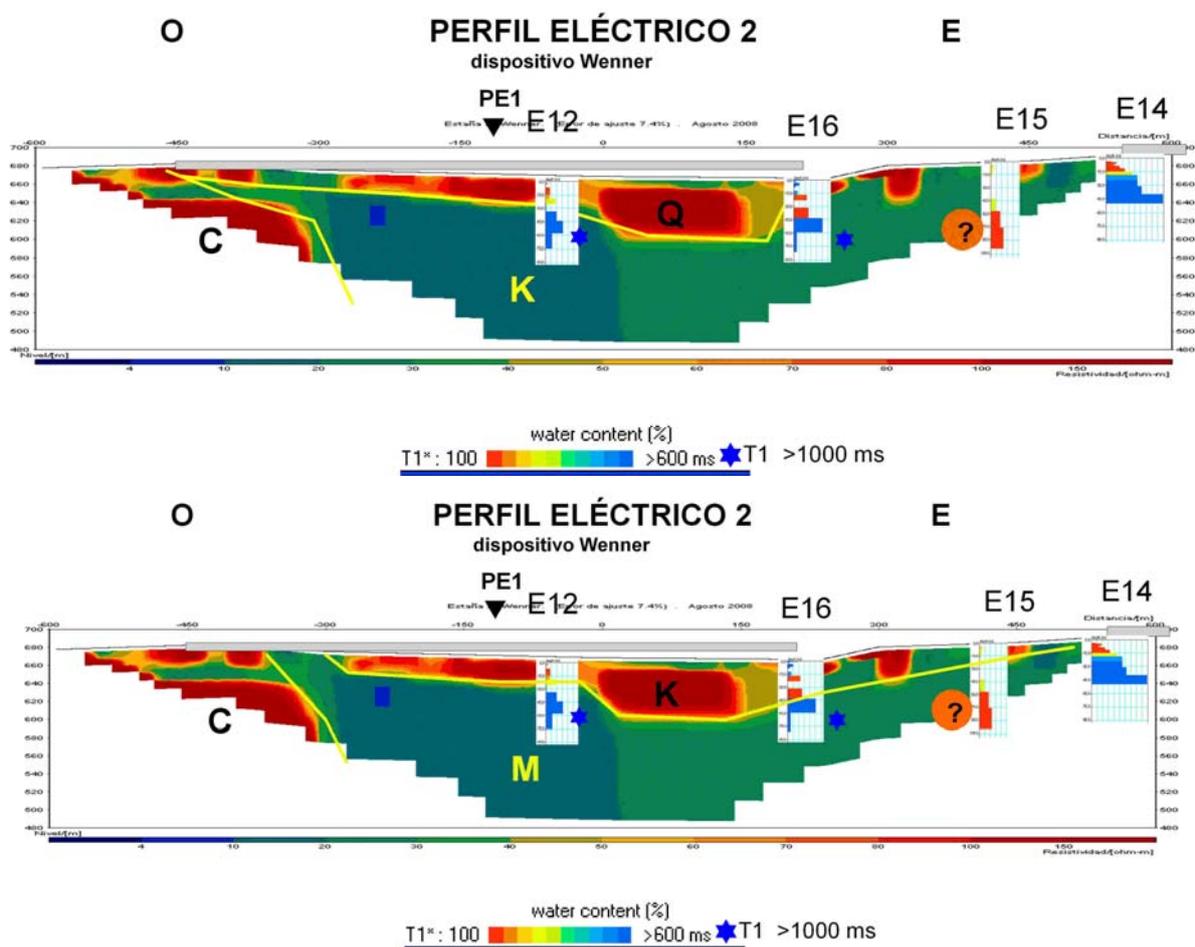


Fig. 136 Perfil Eléctrico 2: la parte superior es reproducción de la Figura 126, y en la inferior se presenta otra posible interpretación.

El Perfil Eléctrico 3 (Figura 137, reproducción de la 127) es el mejor exponente de la gran yuxtaposición de situaciones de resistividad que pueden darse en este entorno. La cartografía de superficie hace difícil no asignar al Keuper al menos la porción central del perfil.

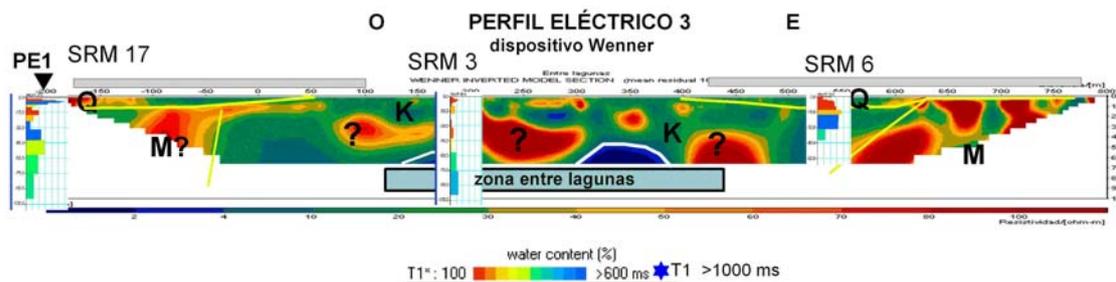


Fig. 137 Perfil Eléctrico 3 (reproducción de la Figura 127)

En este caso, y como ya fue comentado en el capítulo 4, cabe la interpretación de una mayor presencia de carst en estos materiales, aunque las cavidades estarían en este entorno fundamentalmente vacías.

Respecto del Perfil de la zona de las Ollas (Figura 138), la interpretación anteriormente efectuada presenta una incongruencia con la alternativa que ahora se propone: por una parte, según los SRM es probable que el acuífero esté aquí confinado a los materiales del Cuaternario, actuando el Keuper como su base impermeable. Esta hipótesis presenta la dificultad de que para asignar al Keuper una resistividad tan baja, sus materiales deberían estar fuertemente hidratados, y en dicho caso, su contenido en agua debería haber sido detectado por los SRM. El desconocimiento de la potencia que puede tener aquí el Cuaternario es de nuevo una clave para poder hacer una interpretación con mayor congruencia, añadiéndose que la posible presencia de ofitas haya sido la inhibidora de la respuesta de resonancia, lo que a su vez no está justificado por el campo magnético medido en esta zona.

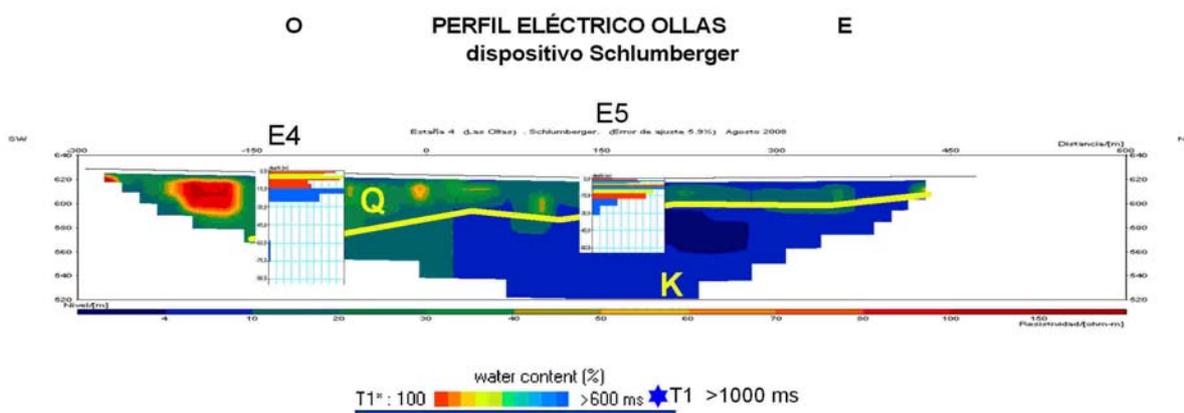


Fig. 138 Perfil Eléctrico de las Ollas (reproducción de la Figura 127)

En todos los SRM de los que existe información geoelectrica por su proximidad a un Perfil Eléctrico, la presencia de agua con altos valores de la permeabilidad se corresponde con una baja resistividad, mientras que los tramos donde, aún detectándose la presencia de agua, la permeabilidad es muy pequeña se corresponden con terrenos resistivos. De acuerdo con este criterio se podrían interpretar

las secciones geoelectricas en términos de clasificación hidrogeológica, con independencia de la litología.

En la Tabla 11 se resumen las posibles asignaciones litológicas, según la información disponible y criterios utilizados:

- Por una parte, se ha utilizado la cartografía geológica generada en el Proyecto, y con este criterio se ha asignado la litología de superficie (**sup.**) a la zona donde se ha extendido la antena de cada SRM (Figuras 24 y 27), así como la litología más probable del subsuelo (**sub.**) bajo la antena en la profundidad de investigación (lado de la antena), indicándose las posiciones dudosas con un signo ?.
- La litología del subsuelo para el tramo correspondiente a la columna (sub), pero basada en la interpretación de las secciones geoelectricas (Figuras 126 y 127) queda reflejada en la columna (**PE1^a**). Esta interpretación, realizada en el capítulo 4, se basó en la asignación de resistividades de la Figura 11 y sin tener en cuenta la información suministrada por los SRM).
- Los criterios de correlación hidrogeológica formando perfiles de SRM (Figuras 122 y 123 del capítulo 12), han cuestionado algunas de estas asignaciones, como se refleja en la columna **P-SRM**, lo que ha dado lugar a establecer una segunda hipótesis de asignación de resistividades (Figuras 135 y 136), cuyo resultado se resume en la columna **PE2^a**.
- Finalmente, se ha asignado a cada SRM la litología más probable en donde se encuentre el acuífero, indicando las dudas aun existentes (columna **asg.**), reflejando estos datos en el mapa de la Figura 140.

SRM	sup.	sub.	PE1 ^a	P-SRM	PE2 ^a	asg.
1	Q	?	C	C	C	C
2	M	M	M	M	M	M
3	K	K	K	K?	?	K?
4	Q	K?	Q		Q	Q
5	Q	K?	Q		Q	Q
6	Q	M	K	M	?	M
7	K	K		K		K
8	Q	M		M		M
9	M	M		M		M
10	Q	M		M		M
11	K	K?		C?		C?
12	Q	K?	K	K?	M	M?
13	Q	?	C	C	C	C
14	Q-K	K	K	K?	M	M?
15	K	K?	K	K	M	K?
16	Q	K?	K	K?	M	M?
17	Q	K?	K	K?	M	M?
18	Q	M		M		M

Tabla 11. Asignación de litología de los acuíferos según los diferentes criterios adoptados

En conclusión, es imprescindible disponer de puntos de control geológico fiables para poder hacer una interpretación más congruente de los datos geofísicos. En este sentido, se recomienda en el apartado 14.3 la realización de algunos sondeos mecánicos que permitan conocer la potencia de materiales cuaternarios, la litología real del subsuelo y la naturaleza de las anomalías extremas de resistividad localizadas.

14.2 Respecto de los límites hidrogeológicos

La presencia de agua en el subsuelo se ha determinado mediante la utilización de Sondeos de Resonancia Magnética, y es, en principio, independiente de la litología siempre que la roca tenga la porosidad primaria o secundaria suficiente para almacenar agua. Los SRM sólo detectan la presencia de agua libre.

Una clave para interpretar en su conjunto los resultados obtenidos está en la respuesta encontrada en los diferentes emplazamientos, cuyo mejor exponente son las propias curvas de señal del agua, que se reproducen nuevamente en la Figura 139 (copia de la Figura 84).

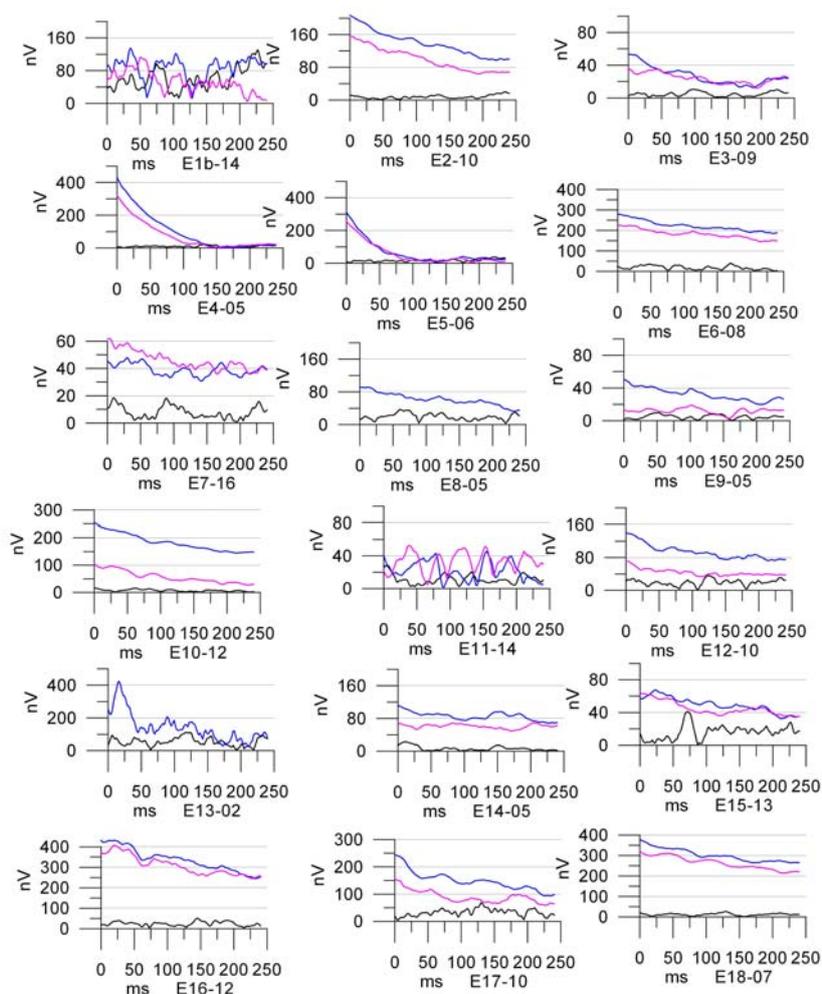


Fig. 139 (copia de la Fig. 84) Selección de las mejores curvas $e(t)$ de los SRM, con escala vertical adaptada a la amplitud de la señal

Según nuestra experiencia, por comparación con otros lugares en los que se ha aplicado este método, cabe resaltar la gran calidad de los datos, que, salvo en dos emplazamientos (E1-13 y E11), permite asegurar la existencia de agua en el subsuelo. Llama también la atención la lenta amortiguación de la señal, es decir, el gran tiempo de relajación encontrado, excepto en dos emplazamientos (E4 y E5, zona de las Ollas), donde se presenta el caso opuesto. Si se tratara de un acuífero en materiales detríticos estas dos observaciones serían suficientes para afirmar que estamos en presencia de un acuífero que ocupa toda la extensión del subsuelo prospectado y que son materiales de gran porosidad. Sin embargo, la amplitud de la señal presenta diferencias notables, aun dentro de los SRM registrados con el mismo tamaño de antena, lo que indica claramente que no se trata de un acuífero homogéneo, y su tiempo de relajación tampoco favorece esta hipótesis.

Se ha prestado especial atención al diseño de los parámetros de proceso, a fin de que aun en ausencia de información geométrica a priori los resultados obtenidos tengan la mayor fiabilidad posible. Solamente la calidad de los SRM E1-13 y E11 no permite la inversión de los datos, porque no hay agua. Es notable la aparente contradicción de que, a pesar de la mencionada buena recepción de la señal, la inversión pone de manifiesto la existencia de poca cantidad de agua, que sólo sobrepasa un máximo del 6 % en los SRM E2, E14, E16 y E17 (del 7 al 11 %), y tan baja como el 2 % en los SRM E3 y E7; vuelven a ser una excepción los realizados en la zona de las Ollas, donde los contenidos son notablemente superiores (SRM E4 y E5, con 20-30 % de valor máximo). Esta circunstancia, unida a los elevados tiempos de relajación, se pueden interpretar como una clara manifestación de que el modelo 1D utilizado en la inversión no es el adecuado para este acuífero, en el que hay grandes probabilidades de que el agua se encuentre de forma volumétrica, o al menos concentrada en fracturas de grandes dimensiones, dando como resultado que su distribución (en términos de modelo matemático) en un volumen muy superior, como es el investigado por el bucle de las antenas utilizadas, dé lugar a una falsa porosidad muy baja. En la Figura 140 se establece la distribución espacial de los máximos valores encontrados para la porosidad y permeabilidad, junto con la litología posible en que se dan dichos parámetros, reflejada en la Tabla 11.

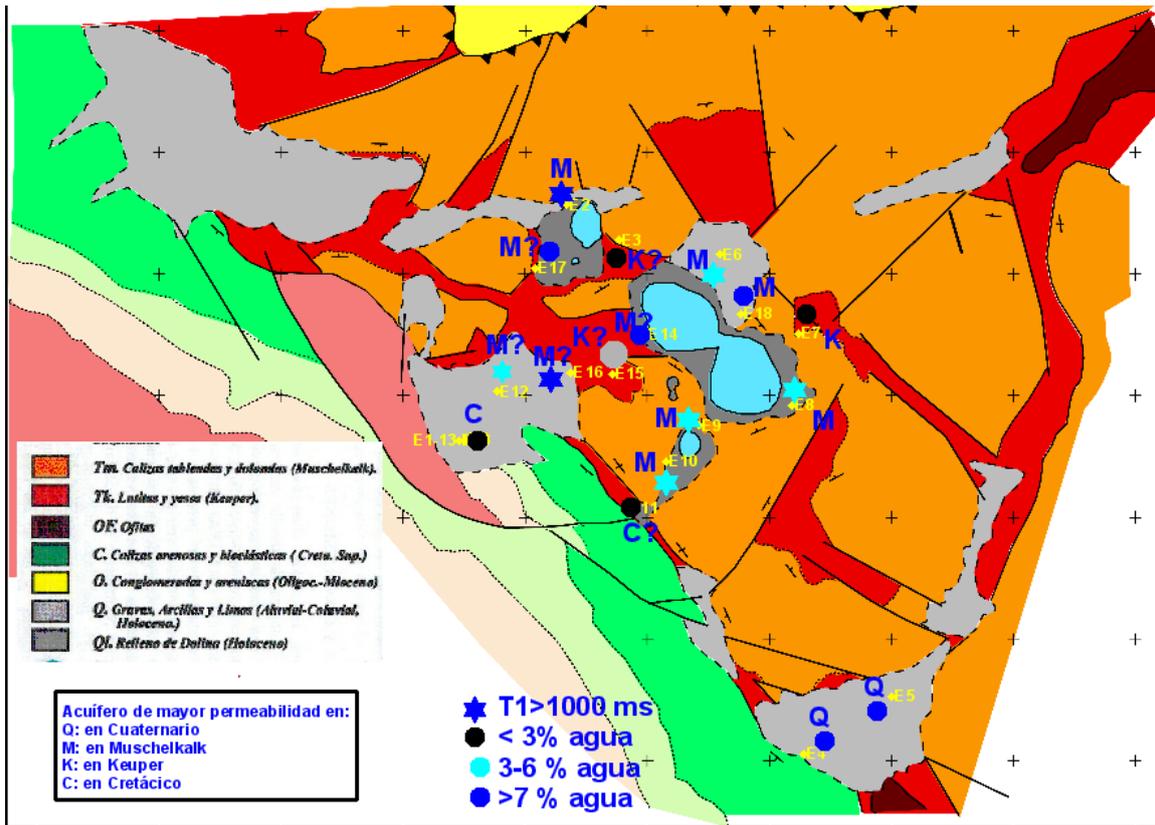


Fig. 140 Distribución espacial de la situación hidrogeológica expresada por la máxima porosidad y permeabilidad.

Por regla general, la distribución de agua en el subsuelo obtenida en la inversión presenta una división radical del mismo en una parte superficial muy poco permeable, y otra más profunda y muy permeable (Figura 141, copia de la 118).

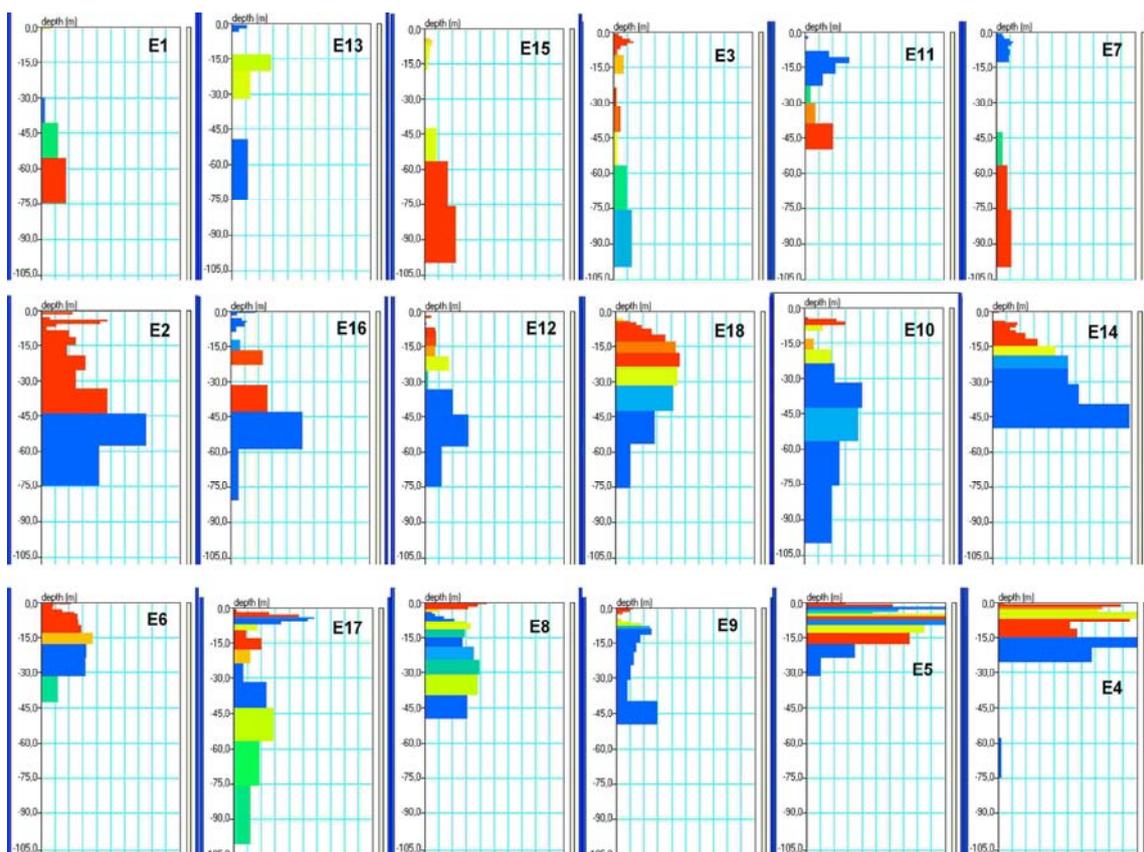


Fig. 141 (copia de la Fig. 118) Representación conjunta de las soluciones $w(z)$ encontradas

En los SRM E7, E15 esta situación se invierte, siendo menos permeables los terrenos más profundos, y junto con el SRM E3, en estos emplazamientos es donde menos agua se ha localizado. Queda además de manifiesto nuevamente la diferente situación del acuífero en la zona de las Ollas (SRM E4 y E5).

Los análisis de la distribución del acuífero, considerando tanto la morfología de las curvas $E_0(q)$ resultado de cada SRM, como la solución encontrada en la inversión para las distribuciones del agua y del tiempo de relajación con la profundidad $w(z)$ y $T_1(z)$, han mostrado que se puede establecer una cierta zonación de comportamiento hidrogeológico entorno de las lagunas (Figura 142, copia de la Figura 120), excepto en su borde nororiental: el límite entre las zonas poco permeables y muy permeables se sitúa a mayor profundidad, pasando de 15 m a 45 m, según aumenta la distancia a las lagunas. El contacto con las calizas cretácicas parece suponer el fin de esta situación, no encontrándose agua a esas profundidades. La cantidad de agua (amplitud de la señal) aumenta con la distancia a las lagunas. Puede existir un pasillo de orientación norte-sur, que pasa entre la laguna pequeña y la grande, donde la presencia de agua es también muy escasa en los primeros 60 m.

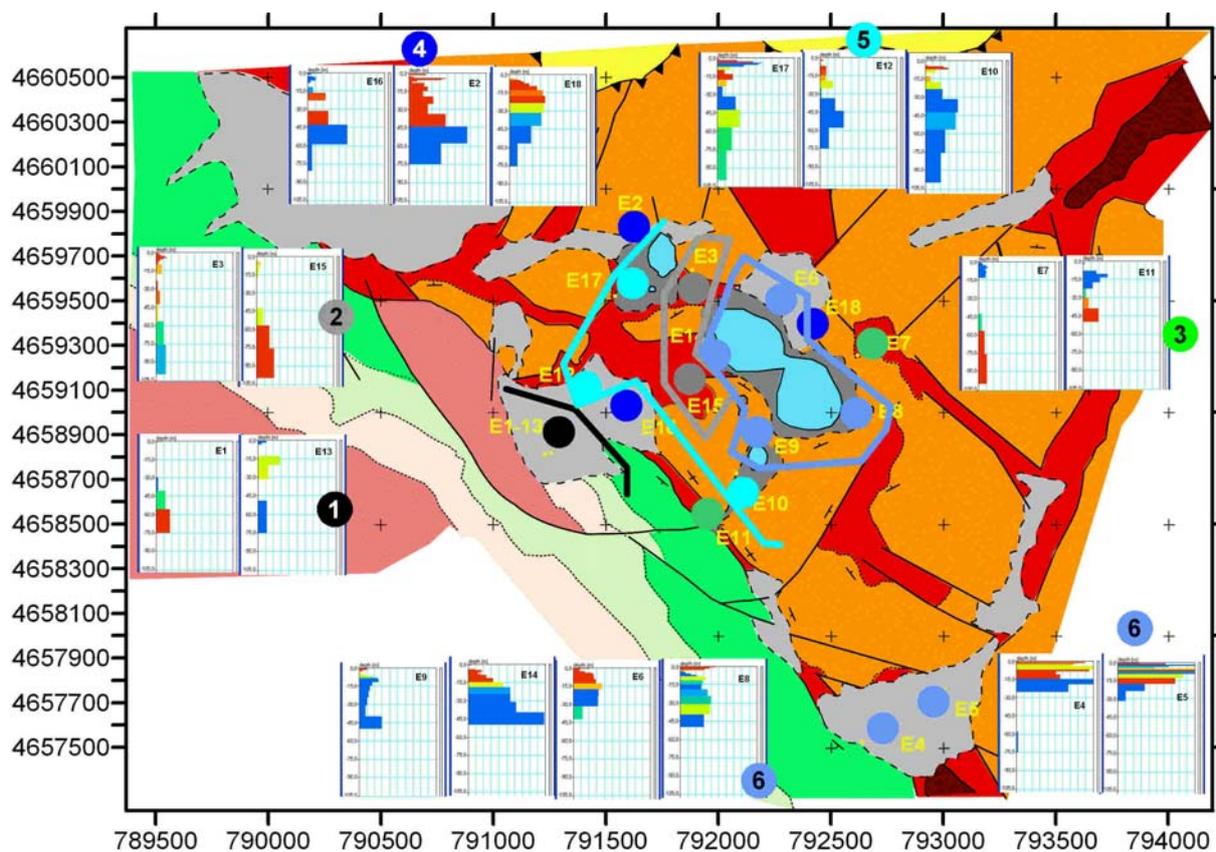


Fig. 142 (copia de la Fig. 119-120) Distribución de los SRM según su clasificación por distribución de agua y permeabilidad.

De acuerdo con esta interpretación, la profundidad del agua va disminuyendo (va siendo más somera) desde las calizas del Cretácico hacia las lagunas. La conexión hidráulica con el acuífero del sinclinal de Estopiñán no queda justificada, al no detectarse agua en determinados lugares, pudiendo actuar los materiales del Keuper como muro impermeable. Esta situación queda también reflejada en el intento de correlación en perfiles mostrado en las Figuras 122 y 123, donde además se pone de manifiesto la coincidencia entre la cota a la que se inicia el acuífero y la profundidad de las lagunas, mostrando además que, aparentemente, no existe conexión entre el acuífero más profundo y el más superficial.

Por otra parte, de ser cierta la hipótesis de que el agua puede estar contenida en cavidades cársticas, es evidente que su distribución 3D no puede quedar determinada por estas mediciones.

Los resultados de distribución del agua en la zona de Ollas obedecen a un tipo de acuífero distinto, en materiales detríticos, aunque con la duda anteriormente expuesta de que pueda existir agua a mayor profundidad y que no haya sido detectada debido a los efectos que la elevada susceptibilidad magnética ejerce sobre la resonancia de los protones de hidrógeno. Las verificaciones de existencia de anomalías magnéticas ha puesto de manifiesto que, por una parte, en la zona de las lagunas el campo geomagnético es unas 160 nT superior al resto del área considerada, y por otra que el máximo de 80 nT de la zona de Ollas no es muy probable que se deba a la presencia de Ofitas, que producen anomalías de mucha mayor amplitud.

14.3 Recomendación de acciones complementarias

Para la resolución de las incertidumbres planteadas es necesario efectuar una serie de actuaciones complementarias. Por una parte, solamente los **sondeos mecánicos** con recuperación de testigo pueden despejar las incógnitas de tipo litológico. Se recomienda por lo tanto efectuar los siguientes (Figura 143):

- Sondeo mecánico SM 1: en el entorno del cruce ente los Perfiles Eléctricos PE1 y PE2, y próximo al SRM E12. Su posición puede ser X=791346, Y=4659125 (UTM30), y perforar al menos hasta 150 m de profundidad. Permitirá resolver las dudas de asignación de resistividades a litologías, y de esta forma definir los cortes geológicos entre el anticlinal y las lagunas, así como los materiales donde se encuentra el acuífero detectado en esta zona por los SRM.

- Sondeo mecánico SM 2: en el entorno del cruce del Perfil Eléctrico PE3 y perfil de SRM 3, aunque tendiendo a aproximarse al SRM E6. Su posición podría ser X=792230, Y=4659560 (UTM30), con al menos 70 m de profundidad. El objetivo es definir la naturaleza de los cuerpos resistivos detectados en el PE3 y resolver las dudas de asignación a los materiales donde se encuentra el acuífero en este entorno.

Otras posibles ubicaciones de sondeos mecánicos son:

- SM 3: entre la laguna pequeña y la grande, entorno del SRM 3. Posición posible X=791976, Y=4659530, con profundidad de 100 m. Es una alternativa al SM 2, aunque si es posible deben efectuarse ambos.

- SM 4: en el entorno de la confluencia del PE 2 y del perfil SRM 1, próximo al SRM 15. Posición X=791876, Y=4659230, con profundidad de 100 m.

En los sondeos mecánicos que se ejecuten se recomienda efectuar **testificación geofísica**, al menos de los parámetros gamma natural, temperatura-conductividad del fluido (si es el caso) y resistividad de la formación.

Para completar la cartografía del área, deben obtenerse las siguientes **nuevas mediciones geofísicas**:

- El PE 3 conviene repetirlo utilizando el mismo dispositivo que en el PE1 y PE2, con distancia interelectródica de 15 m, lo que permitirá obtener información a la misma profundidad que los otros perfiles y verificar la presencia de las anomalías localizadas.

- Para ayudar a resolver la complejidad estructural de esta zona, se propone además la obtención de secciones geoelectricas según los perfiles SRM 1 y SRM 2 desde las calizas cretácicas hasta las lagunas, y del SRM 3, lo que complementa las anteriormente efectuadas y permitirá ratificar la interpretación sobre la disposición de los acuíferos y su relación con las lagunas y anticlinal de Estopiñán. Dada la dificultad logística que ofrece el terreno para la ejecución de medidas con cable continuo, estas secciones se podrían obtener mediante el método de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), utilizando bules contiguos de 50 m, lo que probablemente permitirá obtener la profundidad de investigación requerida de al menos 100-150 m.

La posición aproximada de todos estos trabajos está referenciada en la Figura 143.

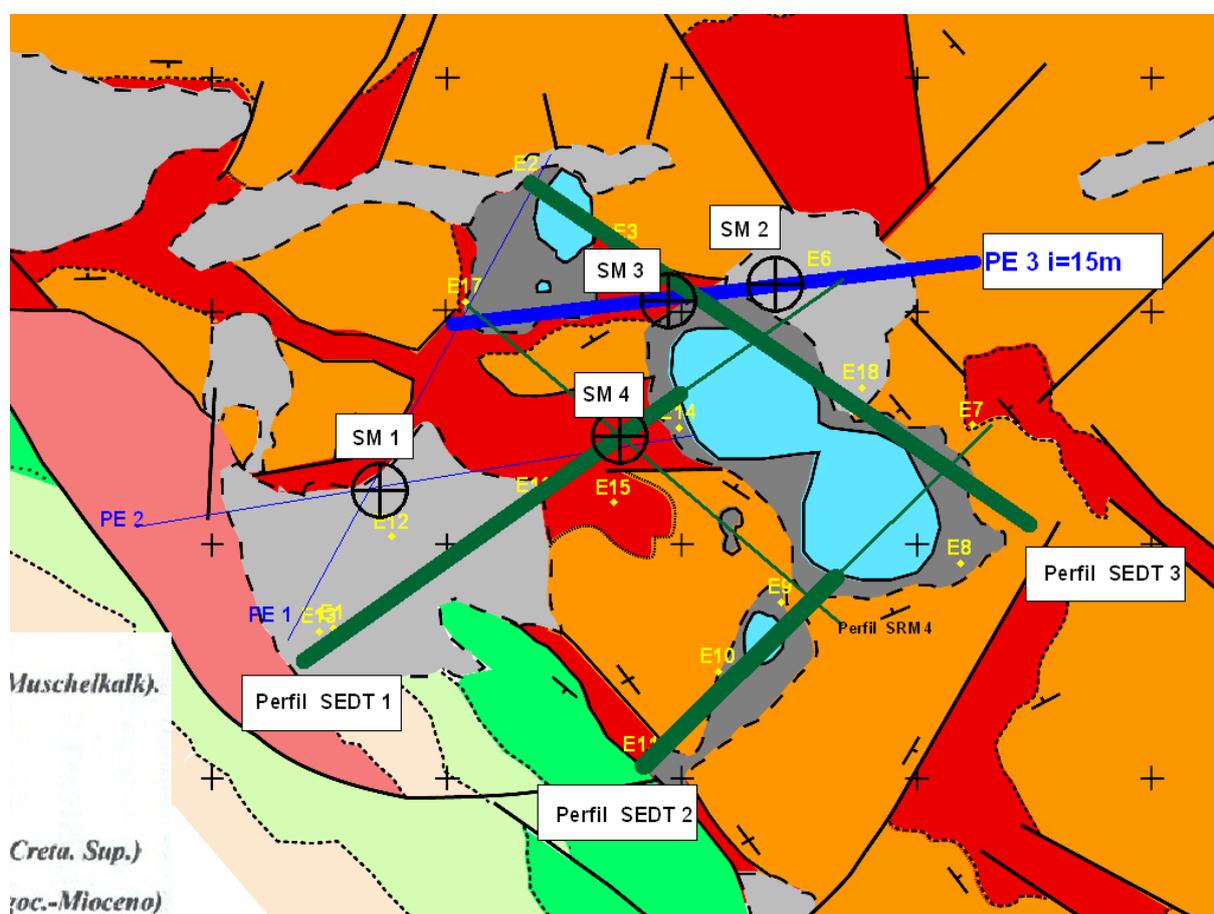


Fig. 143 Mapa de posición de las acciones complementarias a efectuar. SM: sondeos mecánicos; PE: perfil eléctrico continuo; SEDT: perfiles electromagnéticos.

15 OTRAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS

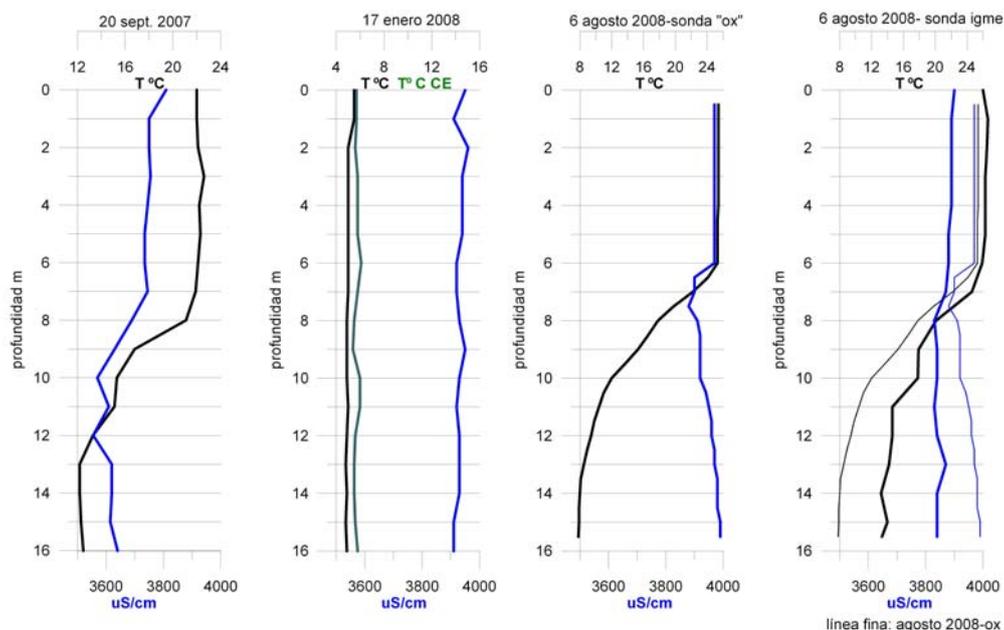
15.1 Comentarios a las mediciones de conductividad del agua en las lagunas de Estaña

El equipo de trabajo de este Proyecto en Zaragoza ha realizado diversas mediciones de la conductividad del agua en las Lagunas de Estaña. A la vista de los resultados obtenidos se ha considerado conveniente efectuar algunas comprobaciones, lo que es el objetivo de estos comentarios. Se consideran las mediciones efectuadas en las siguientes fechas:

- 20 septiembre 2007 en la laguna grande, en el centro de las cubetas SE y NW.
- 17 enero 2008 en la laguna grande, en el centro de las cubetas SE y NW.
- 6 agosto 2008, en el centro de la cubeta SE de la laguna grande y en la laguna pequeña.

En todos los casos se ha utilizado un Conductímetro-pHmetro que denominamos IGME, con medición de profundidad (m), t (°C), pH, conductividad COND (uS/cm) y eH (mV-sólo en agosto); en enero se utilizó además un segundo termómetro, que denominaremos CE y en agosto se midió también con una segunda sonda, que denominaremos "ox", la profundidad, temperatura, pH, conductividad , y Oxígeno disuelto (O en Dmg/l y OD en %). Se ha dispuesto de dichos datos, facilitados por el grupo del IGME en Zaragoza mediante el fichero CE-T°.xls, que se incluyen al final de este apartado.

Las mediciones de temperatura y conductividad en la cubeta SE de la Laguna Grande están representadas en la Figura 144



ESTAÑA. Laguna grande, centro cubeta SE

Fig. 144 Mediciones de temperatura y conductividad del fluido efectuadas en la cubeta SE de la Laguna Grande de Estaña.

En septiembre de 2007 la temperatura en superficie es de 22 °C, bajando a 21 °C a los 8 m de profundidad, donde cambia bruscamente a 16 °C para llegar a 12.5 °C en el fondo. En enero de 2008 la temperatura medida con dos termómetros se mantiene entre 5 y 6 °C en toda la columna de agua; las oscilaciones del termómetro CE son debidas a precisión instrumental. En agosto de 2008 la temperatura es de 26 °C en superficie, bajando a 25 °C a los 7 m de profundidad, donde disminuye bruscamente para llegar a los 13 °C en el fondo. El termómetro de la sonda medidora de Oxígeno, "ox", mide del orden de 1 °C menos en la primera parte del registro (hasta los 7 m), pero luego esa diferencia es creciente, llegando a ser de 5 °C en el fondo. Estos resultados reflejan las oscilaciones estacionales, así como la precisión de las mediciones, como será comentado posteriormente.

Para la conductividad, la escala de representación en la Figura 144 se ha exagerado a fin de que puedan apreciarse las variaciones. Los valores medidos están entorno a los 3900 uS/cm, que equivale a concentraciones del orden de 1.25 g/l de ClNa. Para las medidas de septiembre existe una disminución de la medida de conductividad desde la superficie hasta el fondo de unos 170 uS/cm (equivaldría teóricamente a un aumento de 0.03 g/l), siguiendo sus variaciones las mismas pautas que las de la temperatura. En enero de 2008 la conductividad se mantiene fija (disminución de 50 uS/cm, equivalente teóricamente a un aumento de unos 0.01 g/l). En agosto, la misma sonda IGME mide una ligera disminución de 60 uS/cm, mientras que la sonda "ox" registra un aumento de 20 uS/cm, con gran estabilidad hasta los 6 m, donde disminuye de 3970 a 3900 uS/cm, volviendo a recuperar los 3900 uS/cm a los 8 m; los valores dados por la sonda IGME son unos 80 uS/cm inferiores a los de la sonda "ox".

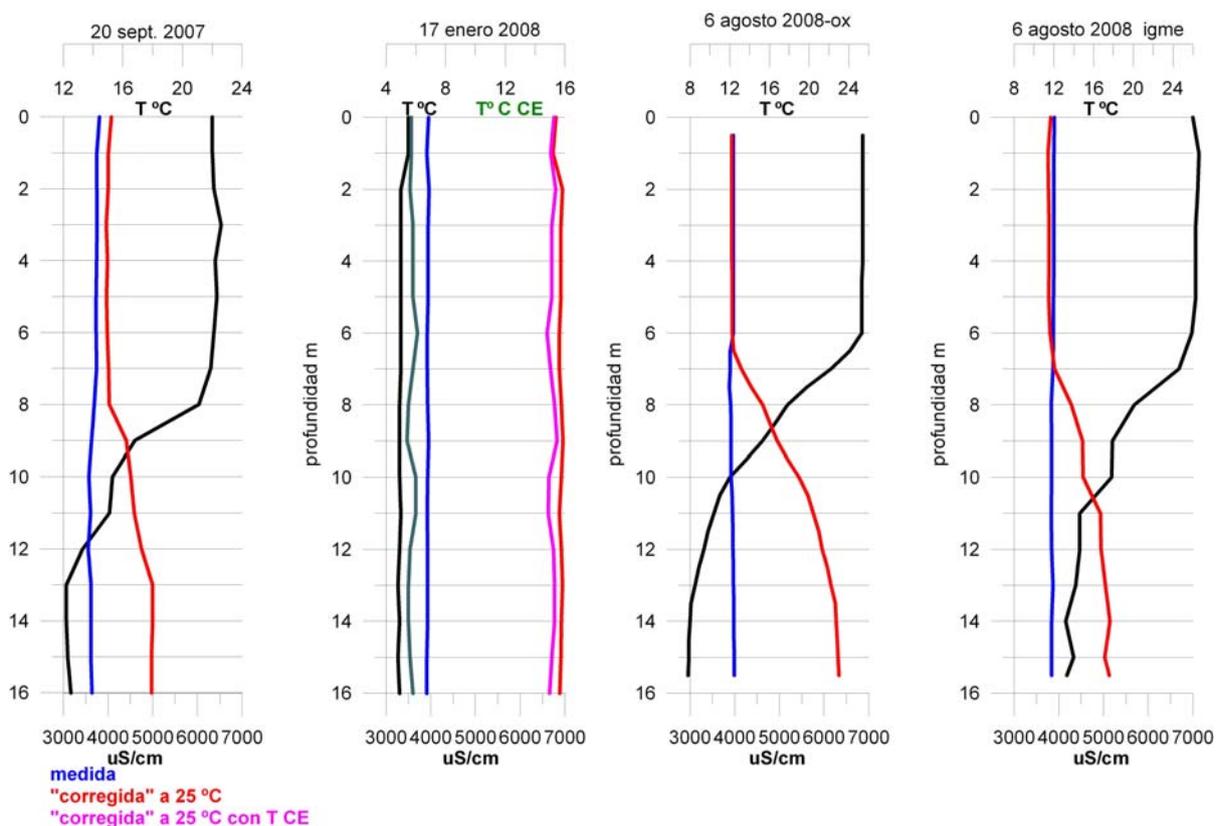
El análisis que va a efectuarse se refiere exclusivamente a los datos de temperatura y conductividad tomados en la cubeta SE de la laguna grande, siendo el principal objetivo verificar la disminución aparente de la salinidad con la profundidad en las medidas de septiembre 2007.

1/ Verificación de la corrección por temperatura

La mayor densidad del agua salada hace que, en régimen estabilizado, el agua más salada se sitúe en el fondo. Ante la anomalía detectada, que supone una inversión sobre la situación normal, y la correlación de sus variaciones con las de temperatura, se va a verificar si la sonda utilizada proporciona los valores de conductividad correctamente corregidos de las variaciones de temperatura. Para ello, en la hipótesis de que los valores COND (uS/cm) suministrados no estuvieran corregidos y se tratara de valores referidos a la misma temperatura t a la que se han leído, se ha procedido a efectuar dicha corrección a 25° C, mediante:

$$C_{25} = C_t (t+21.5)/46.5$$

Estos valores se representan en el gráfico de la Figura 145.



ESTAÑA. Laguna grande, centro cubeta SE

Fig. 145 Verificación de la corrección de temperatura en el valor de conductividad

Si esta hipótesis fuera cierta, los valores “corregidos” indican para septiembre 2007 y agosto 2008 una concentración constante (unos 4000 uS/cm) hasta unos 6- 8 m, aumentando luego hasta el fondo (a 5000 uS/cm o 6500 uS/cm según sondas). Esta sería la situación normal que cabe esperar en caso de no estar homogeneizada una disolución de sales en agua. Sin embargo, según esta hipótesis la concentración salina sería uniforme y mayor en enero (7000 uS/cm) que en agosto, con una temperatura del agua casi 20 °C más fría, lo que carece de sentido. Por lo tanto, puede aceptarse que las sondas empleadas suministran el valor de conductividad corregido a una temperatura constante (aunque no está indicado a cuál).

2/ Análisis de la comparación entre mediciones

La comparación de la conductividad medida en los diferentes periodos muestra por lo tanto una anómala disminución con la profundidad en septiembre de 2007, a partir de los 7 m, como se observa en el gráfico de la Figura 146 (parte izquierda) junto con el registro de temperatura (parte derecha) para las mediciones efectuadas siempre con la misma sonda IGME.

A esta disminución podría dársele la explicación de que es debida a la entrada de agua fresca y sin sales bajo esa profundidad, que diluye la columna; esto implica atribuir el cambio de temperatura no sólo al gradiente térmico por capa de agua, sino a la existencia de tal entrada de agua. Sin embargo,

en agosto-08 la disminución de la temperatura se produce a menor profundidad (a 6 m) y con mayor salto térmico (hasta 8 °C), por lo que la supuesta entrada de agua debería seguir existiendo y manifestándose en la distribución de la conductividad, cosa que sin embargo no se aprecia en el registro, lo que pone en duda la hipótesis de este origen para la anomalía observada. Además, las mediciones de septiembre-08 son unos 200-300 uS/cm inferiores a las de enero-07 y agosto-08, que se mantienen en unos 3900 uS/cm. Esta variación tendría que ser justificada por los consiguientes cambios de régimen en la recarga del agua de la laguna, su temperatura y su calidad.

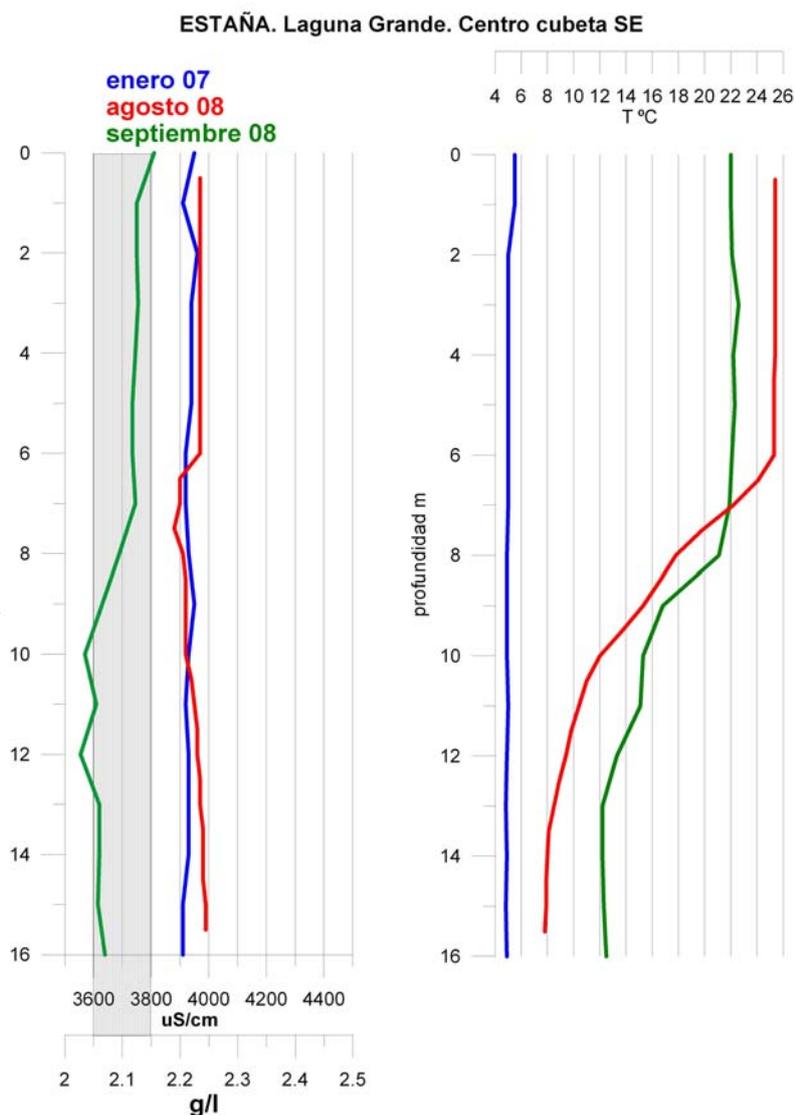


Fig. 146 Comparación de las mediciones de conductividad y temperatura en las diferentes fechas.

3/ Precisión metrológica de la temperatura

Por otra parte, en los registros (ver gráficos de las Figuras 144 y 146) se aprecian oscilaciones en todas las mediciones, que dan lugar a extraños aumentos y disminuciones de valores en un poco espacio, como el observado para la conductividad en agosto (sonda "ox") entre los 6 y los 10 m de profundidad. Una explicación a estas oscilaciones debe encontrarse en la precisión instrumental,

tanto de los correspondientes sensores de temperatura y de resistividad, como en la corrección electrónica a valores a temperatura constante.

En el gráfico de enero-2008 puede observarse (Figura 144) cómo las lecturas efectuadas con dos termómetros difieren hasta en 1°C, y que el termómetro CE presenta oscilaciones superiores a 0.5 °C. En agosto también se midió con dos termómetros, y las diferencias son todavía más acusadas, llegando a 6° C. Aunque la operación de introducir primero una sonda hasta el fondo, extraerla y medir entonces con la segunda sonda produce una modificación en el equilibrio térmico de la columna de agua, estas diferencias son también debidas a la diferente sensibilidad de cada termómetro, cuya precisión no suele ser más fiable de ± 0.5 °C. Para el rango de conductividad y temperatura medido, esto se traduce en una imprecisión de los valores corregidos en ± 50 uS/cm, como puede apreciarse en el gráfico de curvas “corregidas” de enero-2008 de la Figura 145.

4/ Precisión en la determinación de la conductividad

Los sensores de conductividad tampoco están exentos de error (o precisión) instrumental. Dentro del rango de valores aquí medidos la precisión no es mejor de ± 100 uS/cm (equivalente a aproximadamente 0.05 g/l). La conversión de valores de conductividad en concentración en g/l de ClNa (Figura 147) debe hacerse con el resultado de la calibración de la sonda utilizada con soluciones patrón. Si la sonda funciona correctamente, puede utilizarse la ecuación (basada en valores teóricos, S: conductividad en microS/cm, C :concentración g/l de ClNa):

$$S = (C / 1919.35) \exp 0.934$$

para concentraciones inferiores a 5 g/l. La presencia de iones de Mg puede dar lugar al mismo valor de conductividad eléctrica con menores concentraciones, mientras que la presencia de Ca y K precisa de mayores concentraciones para la misma conductividad.

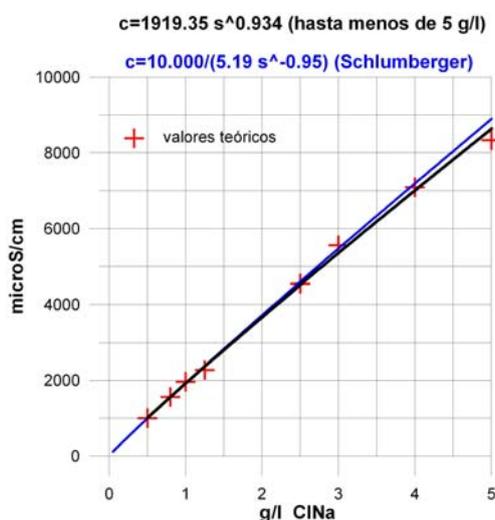


Fig. 147 Relación conductividad- concentración NaCl.

Las mediciones efectuadas están dentro de este rango de precisión de 100 uS/cm (ver Figura 146), teniendo menor variación las de enero-07 y agosto-08; en consecuencia la escala más adecuada para su representación sería la presentada en la Figura 148.

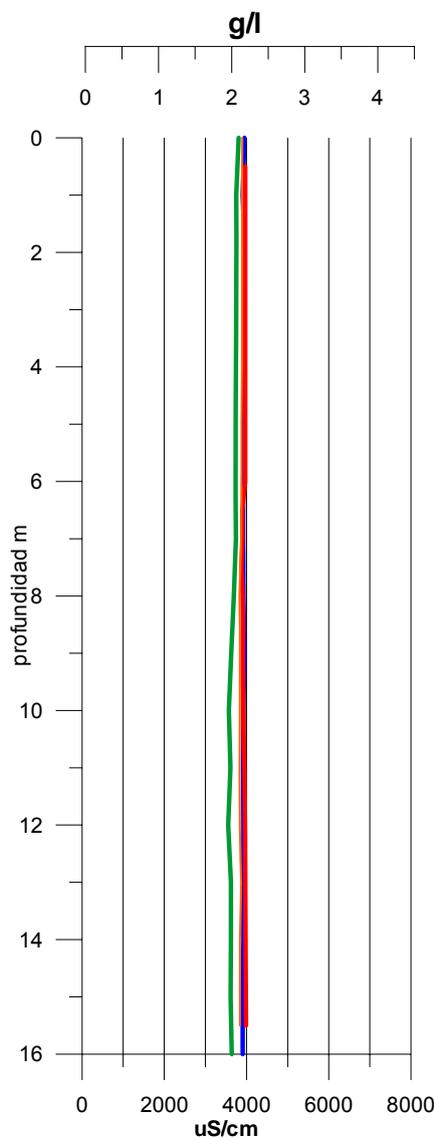


Fig. 148 Registros de conductividad representados en la escala más significativa para apreciar variaciones reales en la salinidad.

En conclusión: los perfiles de temperatura pueden ser justificados por el ciclo de calentamiento del agua, que pasa de estar a 5 °C en invierno en toda la columna, a tener en verano una temperatura de fondo de unos 13 °C y unos 22-26 °C en superficie, dependiendo de calentamiento solar. La salinidad puede considerarse uniforme y constante a lo largo del año en toda la profundidad, estando los cambios observados dentro del rango de precisión de estas medidas. Si ciertamente existe alguna entrada de agua que haya podido dar lugar a anomalías mínimas en la distribución de la salinidad, ha debido de ser circunstancial, no observándose en las mediciones efectuadas en la misma época de 2007 y 2008.

Datos de partida (fichero CE-Tº.xls)

CONDUCTIMETRO-PHMETRO IGME				
20/09/2007	profundidad (m)	TEMP (°C)	PH	COND (uS/cm)
CENTRO CUBETA SE	0	22,0	8,34	3810
295707	1	22,0	8,26	3750
4655967	2	22,1	8,26	3750
	3	22,6	8,22	3755
	4	22,2	8,21	3745
	5	22,3	8,22	3735
	6	22,1	8,22	3735
	7	21,9	8,20	3745
	8	21,1	8,04	3690
	9	16,8	7,51	3630
	10	15,3	7,38	3570
	11	15,1	7,37	3610
	12	13,3	7,27	3555
	13	12,2	7,24	3620
	14	12,2	7,22	3620
	15	12,3	7,31	3615
	16	12,5	7,30	3640
CENTRO CUBETA NW	0	22,0	7,84	3790
295427	3	21,8	7,85	3760
4656288	6	21,8	7,79	3760
	9	19,3	7,14	3640

CONDUCTIMETRO-PHMETRO IGME					
17/01/2008	profundidad (m)	TEMP VID (°C)	PH	COND (uS/cm)	Tª CE (°C)
LAGUNA GRANDE	0	5,5	8,20	3950	5,7
CENTRO CUBETA SE	1	5,5	7,90	3910	5,7
295615	2	5,0	7,90	3960	5,6
4655753	3	5,0	7,86	3940	5,8
	4	5,0	7,87	3940	5,8
	5	5,0	7,87	3940	5,8
	6	5,0	7,86	3920	6,1
	7	5,0	7,87	3920	5,8
	8	4,9	7,85	3930	5,5
	9	4,9	7,85	3950	5,4
	10	4,9	7,88	3930	6
	11	5,0	7,85	3920	6
	12	4,9	7,81	3930	5,6
	13	4,8	7,83	3930	5,5
	14	4,9	7,83	3930	5,5
	15	4,8	7,82	3910	5,6
	16	4,9	7,80	3910	5,8
LAGUNA GRANDE	0	5,0	7,97	3910	5,4
CENTRO CUBETA NW	1	5,0	7,97	3980	5,5
295456	2	5,0	7,95	3960	5,7
4656245	3	5,0	7,96	3980	5,6
	4	5,0	7,96	3970	5,6
	5	5,0	7,96	3980	5,6
	6	4,9	7,96	3970	5,6
	7	5,0	7,95	3970	5,6
	8	5,0	7,97	3970	5,5
	8,5	4,9	7,97	3960	5,7

PUNTO	FECHA	PROFUNDIDAD	CE ($\mu\text{S/cm}$)	T° (°C)	OD (MG/L)	%OD
LAGUNA GRANDE CENTRO CUBETA SE 295729 4655945	06/08/2008	0,5	3970	25,4	10,5	128,4
		1	3970	25,4	10,6	129,2
		1,5	3970	25,4	10,7	130,2
		2	3970	25,4	10,7	130,5
		2,5	3970	25,4	10,7	130,1
		3	3970	25,4	10,7	129,9
		3,5	3970	25,4	10,6	129,7
		4	3970	25,4	10,6	129,6
		4,5	3970	25,3	10,7	130
		5	3970	25,3	10,7	130,2
		5,5	3970	25,3	10,7	130,2
		6	3970	25,3	10,7	130,1
		6,5	3900	24,1	11,7	138
		7	3900	22,2	12,7	144,5
		7,5	3880	19,8	12,8	141
LAGUNA PEQUEÑA 295077 4656605	06/08/2008	8	3910	17,8	10,9	114,8
		8,5	3920	16,6	10,8	110,9
		9	3920	15,3	10,8	106
		9,5	3920	13,7	9,7	93,2
		10	3920	12	6,6	60
		10,5	3940	11	3,4	26
		11	3950	10,4	1,3	12
		11,5	3960	9,8	0,2	2,3
		12	3960	9,4	0	0
		12,5	3970	8,9	-0,1	-0,6
		13	3970	8,5	-0,1	-1
		13,5	3980	8,1	-0,1	-1,2
		14	3980	8	-0,2	-1,3
		14,5	3980	7,9	-0,2	-1,4
		15	3990	7,9	-0,2	-1,6
15,5	3990	7,8	-0,2	-1,7		
0,5	1144	25,7	9,1	112		
1	1145	25,7	9	111,4		
1,5	1145	25,7	9	110,2		
2	1145	25,7	8,9	109,7		
2,5	1145	25,7	8,9	109,7		
3	1145	25,7	8,9	109,1		
3,5	1146	25,7	8,9	109,2		
4	1148	25,6	9,2	111		
4,5	1146	25,6	9	110,7		
5	1146	25,6	9	110		
5,5	1146	25,6	8,8	108		
6	1144	25	1,7	22,2		
6,5	1147	24,1	0,2	1,4		
7	1165	22,3	0,1	0,7		

CONDUCTIMETRO-PHMETRO IGME					
06/08/2008	profundidad (m)	TEMP (°C)	PH	COND (uS/cm)	Eh (mv)
CENTRO CUBETA					
SE	0	26,0	8,18	3900	-50
295729	1	26,6	8,18	3890	-29
4655945	2	26,5	8,18	3890	-36
673	3	26,3	8,20	3890	-29
PROF.MAX 16	4	26,3	8,20	3890	-28
	5	26,3	8,19	3880	-32
	6	25,9	8,19	3880	-35
	7	24,6	8,10	3870	-29
	8	20,1	7,89	3830	-17
	9	17,9	7,91	3840	-12
	10	17,8	7,73	3840	-5
	11	14,6	7,42	3830	-16
	12	14,6	7,51	3840	-165
	13	14,2	7,38	3870	-209
	14	13,2	7,35	3840	-227
	15	14,0	7,39	3840	-226
	15,5	13,3	7,33	3840	-236

LAGUNA PEQUEÑA	0	25,7	8,13	1115	110
295060	1	24,2	8,19	1194	163
4656629	2	24,7	8,18	1132	154
672	3	24,7	8,17	1127	146
PROF.MAX 7.4	4	24,8	8,14	1161	146
	5	25,3	8,15	1114	138
	6	25,4	7,79	1135	-163
	7	24,4	7,33	1120	-250

15.2 Informe sobre la realización de un perfil de magnetometría

El presente informe tiene por objeto analizar los datos de un perfil de magnetometría, a fin de:

- comentar la metodología utilizada
- efectuar una interpretación cualitativa de los resultados

Dicho perfil ha sido medido en la zona de las lagunas de Estaña (Huesca) y sus datos han sido facilitados por J. Lambán, encuadrándose dentro de las actividades desarrolladas en el Proyecto HUMEDALES-EBRO. La intensidad de campo magnético fue medida con un magnetómetro GMS16, de precesión protónica con efecto Overhauser; para la susceptibilidad magnética se utilizó un medidor de campo SM20 de GF Instruments, en unidades $\text{SI} \times 10^{-6}$. El análisis se va a presentar fundamentalmente de forma gráfica, con breves comentarios sobre las Figuras.

1. Datos de partida

Se ha dispuesto de los siguientes ficheros de datos:

- De CAMPO MAGNÉTICO Y POSICIÓN:

- **estana_perfil.xls**

- libro estana.txt , 8933 registros con los datos

WGS1984_X WGS1984_Y UTMX_H30 UTMY_H30 elevation line nT sat time

- libro "corteS_N", 8933 registros con los datos

UTMX_H31 UTMY_H31 UTMX_H30 UTMY_H30

- **eperfilh30.xls**, 8933 registros con

WGS1984_X WGS1984_Y UTMX_H30 UTMY_H30

- De control de la VARIACIÓN DIURNA:

-**basesta.xls**, 359 registros con los valores del 3 de octubre de 2007:

Nº M Date Time Line Pos Field Err A D Grad Note TIEMPO minutos

- **Obs_Ebro280907**, pertenece al día 28 de septiembre de 2007, con 1440 registros con

MINUTOS hora minuto CAMPO MAGNETICO

- SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA: **susceptibilidad.xls**, 54 registros con

ESTACION	UTMX_H31	UTMY_H31	UTMX_H30	UTMY_H30	FORMACION	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	MEDIA	DESVIACION
----------	----------	----------	----------	----------	-----------	----	----	----	----	----	----	----	----	-------	------------

Se indica, resaltado en color amarillo, los datos utilizados para este informe.

2. Comentarios sobre los datos de partida

- Las coordenadas dadas en los ficheros eperfilh30 y estana_perfil(libro estana.txt) son iguales, pero difieren de las dadas en el fichero estana_perfil(libro corteN_S). Se han adoptado como válidas las primeras, puesto que las muestras de susceptibilidad se encuentran sobre dicho trazado (Figura 149).

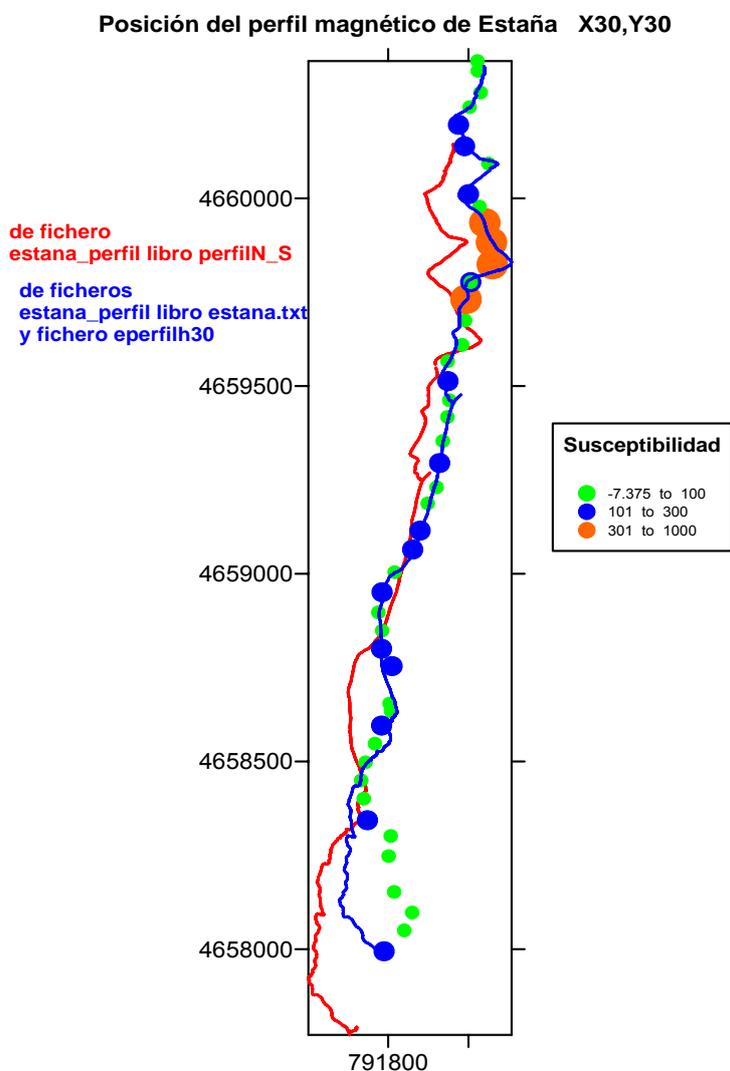


Fig. 149 Posición del perfil de magnetometría medido el 3-10-2007, y muestras de susceptibilidad clasificadas por su valor.

- los datos de VD del observatorio del Ebro no corresponden al día de medición del perfil, por lo que no se han utilizado.
- las muestras de susceptibilidad E47 a E52 están muy apartadas del perfil (o existe un error en sus coordenadas), por lo que se han eliminado del fichero correspondiente.

3. Análisis de los datos de susceptibilidad

Se tomaron 54 muestras, aunque 6 aparecen en el fichero con coordenadas muy alejadas del perfil, por lo que no se han considerado. La distancia entre muestras es del orden de los 50 m, siendo en algunos casos de 20 m y en otros de 100 m. Su posición se indica en la Fig. 149.

En cada emplazamiento se han efectuado 7 determinaciones, cuya dispersión salvo excepciones, es creciente con el valor de susceptibilidad (Figura 150).

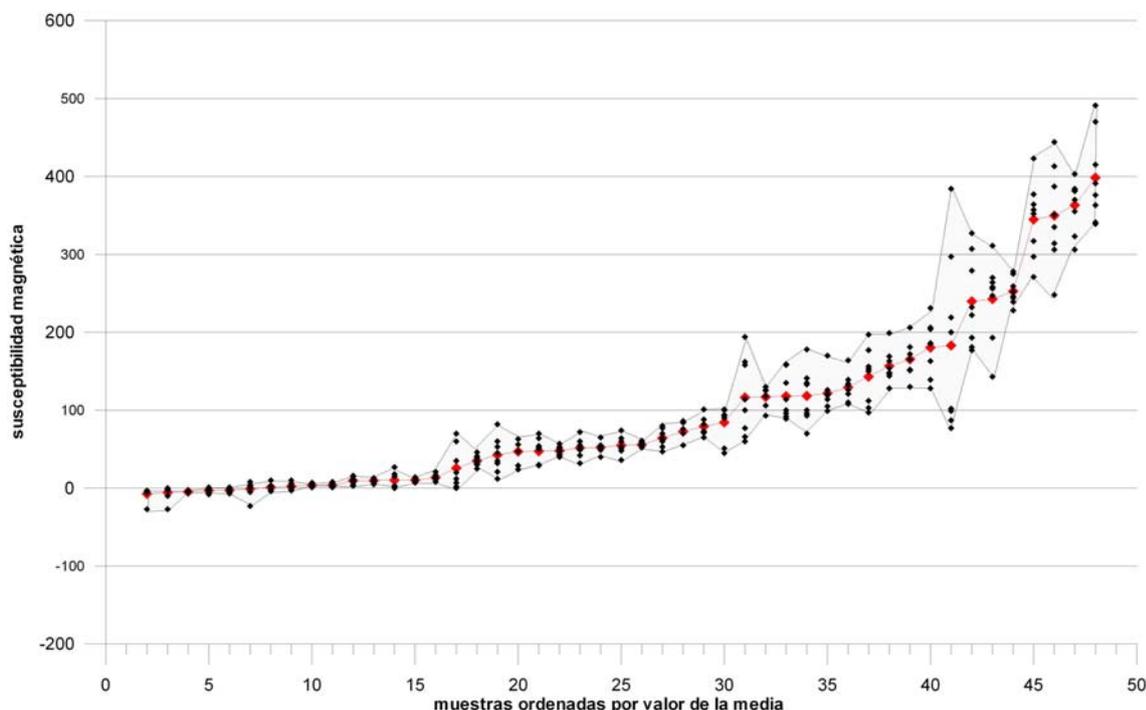


Fig. 150 Muestras clasificadas por orden de su valor medio de susceptibilidad, mostrando la dispersión de las 7 mediciones efectuadas en cada lugar. En rojo, valor medio.

Se ha establecido una clasificación en tres grupos de valores, cuya disposición geográfica puede verse en la Figura 149 y en la Figura 151:

- inferiores a 100, que suponen el 62% de las muestras, y se sitúan a lo largo de todo el perfil
- entre 100 y 300 (el 30 %), presentándose fundamentalmente en la parte central del perfil.

- superiores a 300 (8%), concentradas en una porción del norte del perfil.

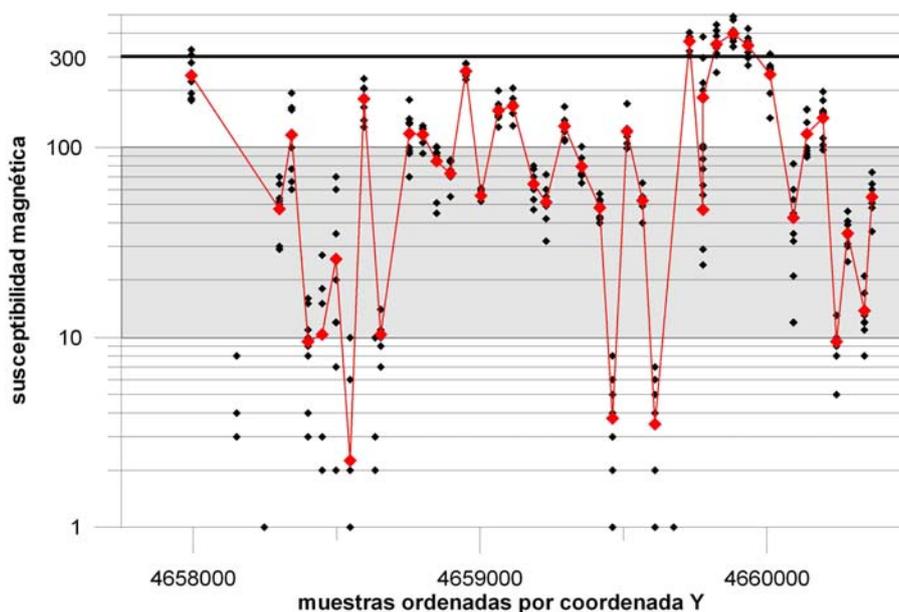


Fig. 151 Valores de susceptibilidad a lo largo del perfil. En rojo, valor medio para cada posición.

Utilizando la descripción efectuada (FORMACIÓN) para cada lugar de muestreo en el fichero **susceptibilidad.xls** (Figura 152, izquierda) se observa que el primer grupo pertenece a muestras de cualquier litología, el segundo se presenta en lugares clasificados como “suelos o campo de cultivo” o “Cuaternario”, así como el tercero.

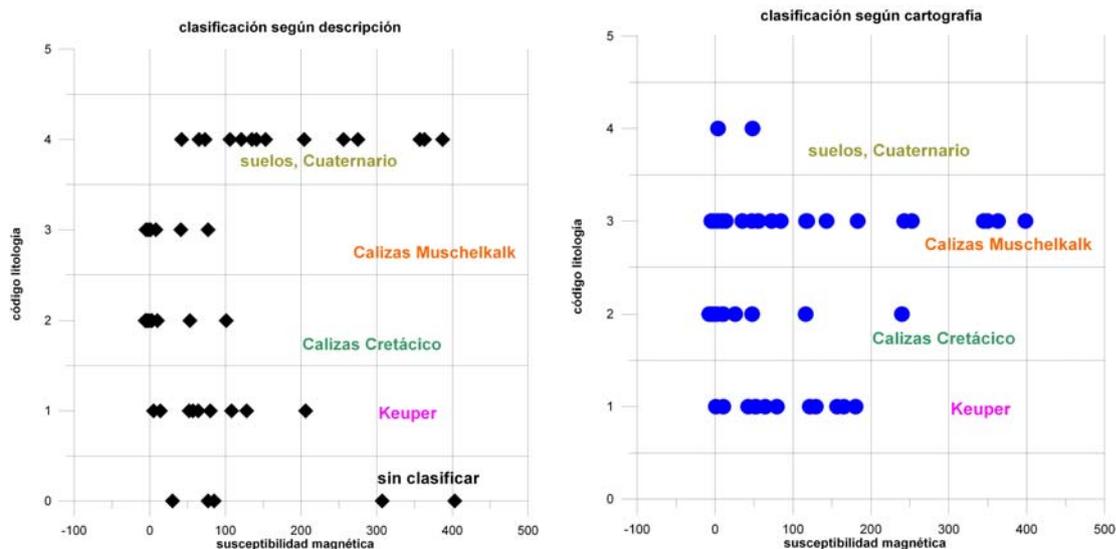


Fig. 152 Clasificación de las muestras según su susceptibilidad y litología: por descripción del lugar (izquierda), y por superposición a mapa geológico (derecha).

Sin embargo, clasificando las muestras según su posición en la cartografía geológica (Figura 153), se observa en la Figura 152-derecha que el segundo grupo se encuentra en zonas del Trías (Keuper y Muschelkalk), y el tercero, las de valor superior a 300, pertenecen, muy agrupadas, a un terreno del Muschelkalk. Pensamos que esta clasificación tiene más significado que la basada en la descripción de los lugares efectuada en el fichero de datos, estableciendo una diferencia (muy pequeña y sutil) entre algunas rocas del Trías y las del Cretácico, que tiene siempre menor susceptibilidad. Esto podría ser quizá debido a la presencia de rocas volcánicas básicas en las formaciones triásicas (las ofitas o diabasas tiene susceptibilidades medias de $54000 \cdot 10^{-6}$ uSI).

Hay 8 muestras con valores negativos de susceptibilidad (diamagnéticas), correspondientes todas ellas a calizas del Cretácico o del Muschelkalk; sin embargo, el yeso es la única litología presente que tiene un diamagnetismo característico. El resto de los valores oscilan entre 3 y 398. En cualquier caso, son valores muy bajos, como corresponde a las litologías muestreadas, y no cabe esperar que el contraste entre estas rocas de lugar a anomalías de significación en el campo magnético terrestre.

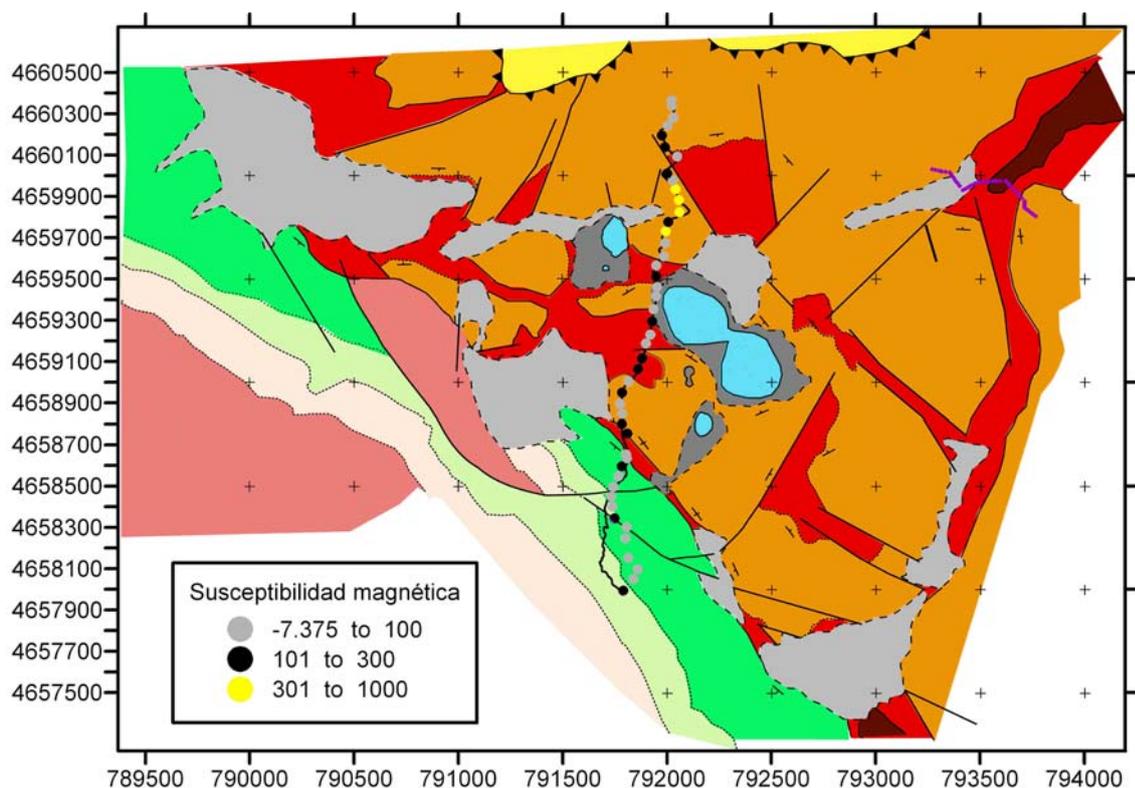


Fig. 153 Posición de las muestras de susceptibilidad sobre la cartografía geológica, clasificadas según los grupos que se han establecido para su valor.

4. Análisis de los datos de campo magnético.

4.1 Cadencia de lecturas sobre el perfil.

El perfil está medido prácticamente en dirección Norte-Sur (Figura 149), con una longitud de 2372 m y un total de 8933 mediciones, lo que supone una media estadística de unas 4 estaciones/m. En realidad, la distancia varía desde menos de 25 cm para el 63 % (menos de 10 cm para el 52 %) de las estaciones hasta 0.75-3 m para el 15 %, representándose esta variación del espaciado en la Figura 154.

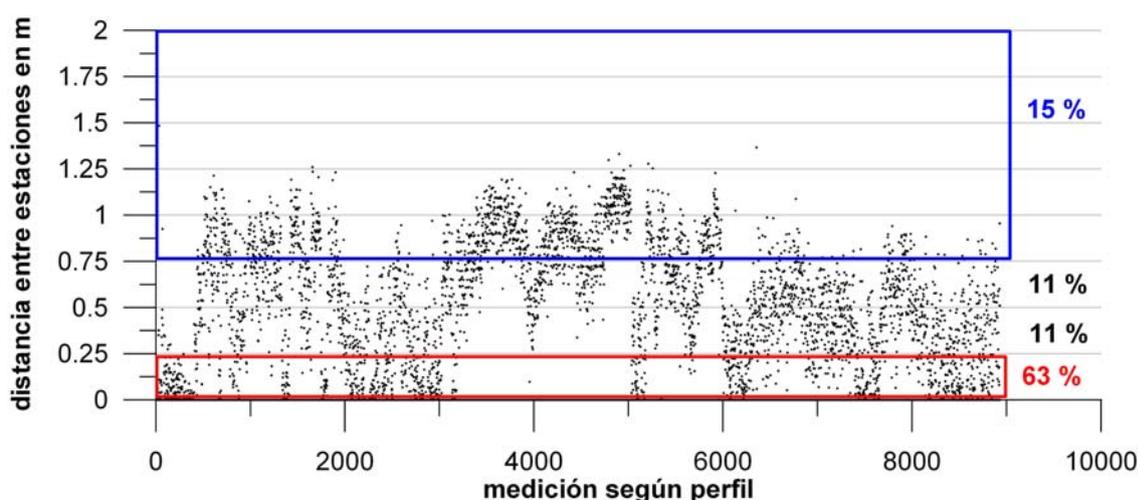


Fig. 154 Distribución del espaciado entre estaciones de medición con el magnetómetro a lo largo del perfil.

Esta distancia entre estaciones es totalmente inusual para este tipo de mediciones, siendo más propia de trabajos arqueológicos. En la Figura 155 se detallan dos fragmentos de 50 estaciones consecutivas, de 6 y 20 m de longitud respectivamente, donde se puede apreciar la carencia de significado de esta superabundancia de mediciones, con variaciones de 5 a 10 nT en el mismo punto.

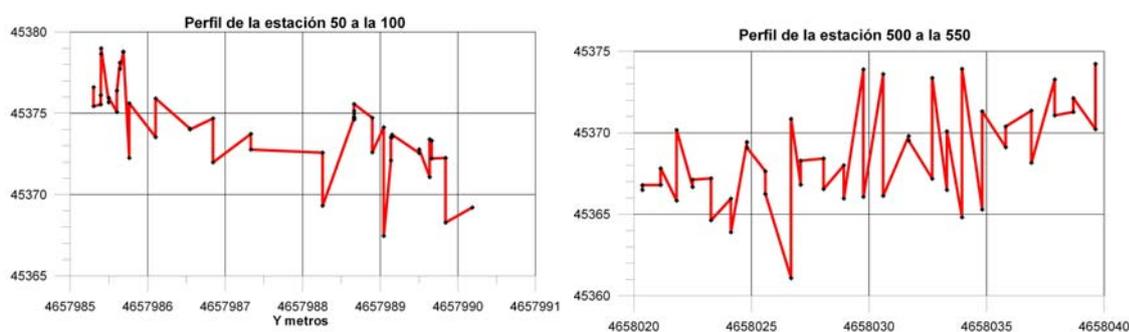


Fig. 155 Detalle de dos segmentos del perfil, de 6 m (izquierda) y 20 m (derecha).

De hecho, estas variaciones cabe quizá atribuir las a la alta sensibilidad del magnetómetro, que puede provocar el que mínimas diferencias entre su proximidad a cualquier objeto metálico del observador o en las proximidades, de lugar a cierta inestabilidad en el sensor en las sucesivas lecturas. De cualquier forma, no puede asignarse significado geológico a estas variaciones. Para un perfil de estas características hubiera sido suficiente con tomar mediciones mucho más espaciadas, como se muestra en la Figura 156.

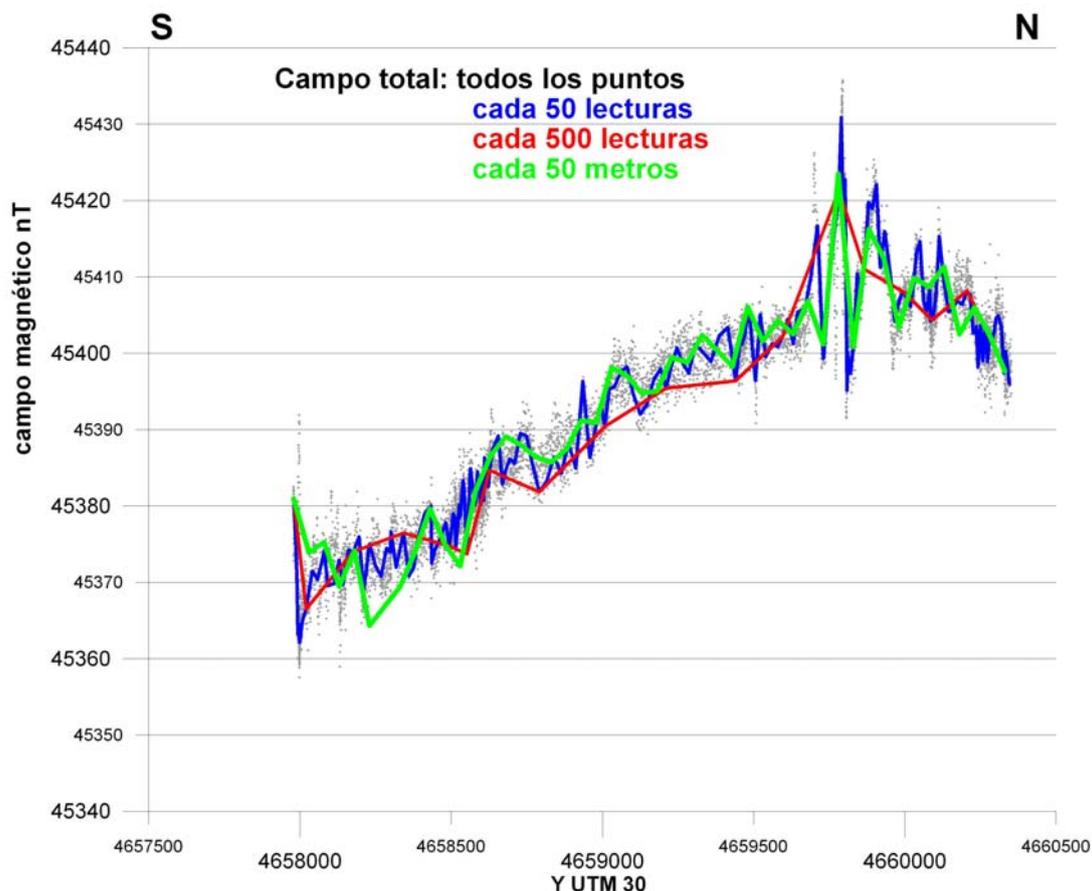


Fig. 156 Comparación de las lecturas tomadas con las que se hubieran obtenido con intervalos cada 50 y 500 lecturas. Se ha superpuesto además el resultado de haber tomado una lectura cada 50 metros.

Por otra parte, al no tratarse de lecturas equiespaciadas, no es posible hacer un análisis cualitativo de facies magnética, ya que las frecuencias resultantes en el perfil son aparentes. Para ello se han seleccionado las lecturas cada 50 metros, y se reproducen también en la Figura 156. Aunque es obvio que con este mismo intervalo, y como consecuencia del Teorema del muestreo, el perfil puede tener aspectos ligeramente diferentes según los puntos que se tomen, se aprecia un mayor contenido en altas frecuencias en la parte norte del perfil, lo que puede interpretarse como una mayor heterogeneidad magnética de los materiales en esa porción.

4.2 Corrección de Variación Diurna.

El perfil fue medido el día 3 de octubre de 2007, entre las 10 h 59 min 11 s y las 12 h 35 min 52 s, con lecturas cada 0.5 s.

El control de la V.D. se estableció mediante un magnetómetro en un punto fijo, leyendo entre las 10 h 59 min 11 s y las 12 h 58 min 31 s, con lecturas cada 20 s.

A fin de comparar las lecturas de cada registro (fijo y móvil) se ha calculado el tiempo en minutos transcurrido desde el inicio para las lecturas efectuadas sobre el perfil, estando representados sus valores y los de V.D. en la Figura 157. El perfil tiene una variación máxima de unas 60 nT (con un pico de unas 78 nT). Durante las dos horas de lectura la V.D. tiene una oscilación máxima de 7 nT, disminuyendo 5 nT durante los primeros 45 min (0.01 nT/min) y aumentando 6 nT durante los 75 min restantes (0.08 nT/min), con ligeras oscilaciones. Estos valores son, en términos absolutos, insignificantes para aplicar una corrección a las lecturas del perfil, y además son muy inferiores a la propia oscilación de las lecturas del magnetómetro, por lo que no cabe duda de que no se precisa efectuar esta corrección.

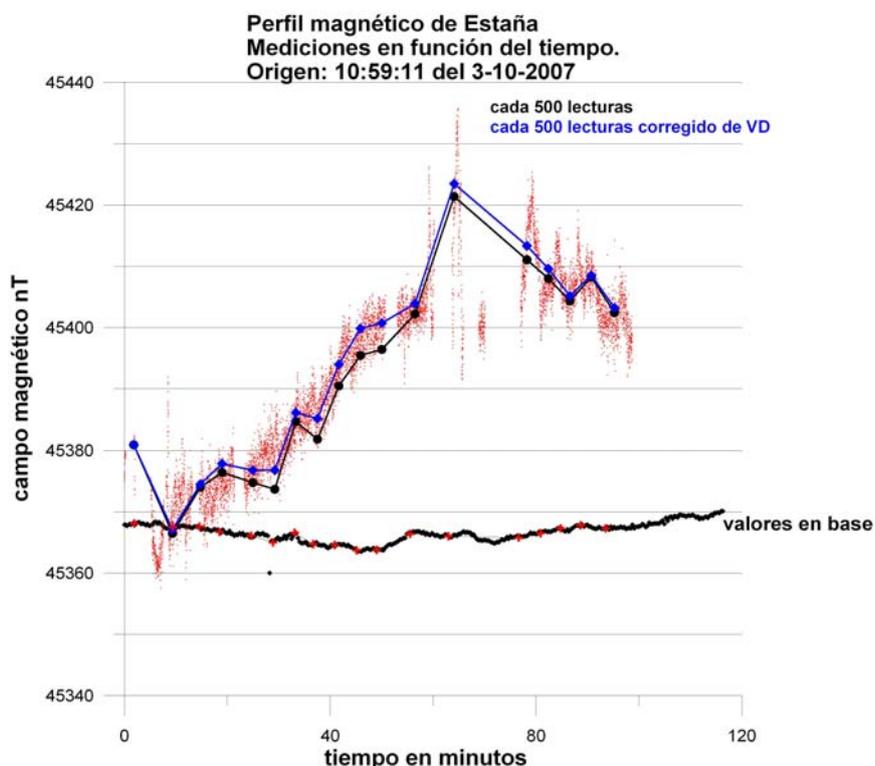


Fig. 157 Comparación de las lecturas de los magnetómetros fijo y móvil.

No obstante, para ilustrar esta afirmación, se han corregido las lecturas tomadas cada 500; como puede verificarse en la Figura 157, valores con y sin corrección están dentro de la propia "nube" de puntos de las lecturas del magnetómetro móvil.

4.3 Corrección de gradiente regional

No se ha encontrado ningún mapa de anomalías magnéticas para esta zona. Adoptando el gradiente regional del campo geomagnético para la península Ibérica, de unas 5 nT/km aumentando hacia el Norte, se han corregido las lecturas del perfil, representándose en la Figura 158 los valores corregidos o regionales cada 500 lecturas.

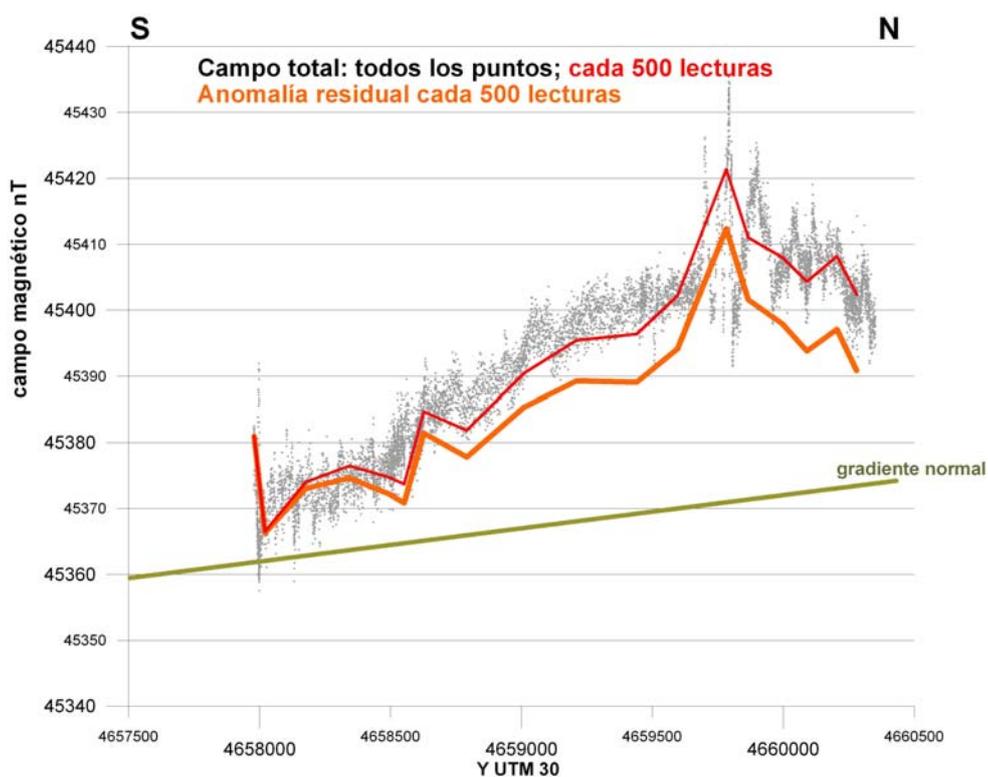


Fig. 158 Aplicación del gradiente normal del campo geomagnético, obteniendo la anomalía residual correspondiente.

Aunque para variaciones mayores del campo magnético ésta corrección sería también innecesaria, dado que en este caso supone una alteración significativa del gradiente medido, serán dichos valores residuales los que se utilizarán para la interpretación.

5. Interpretación cualitativa de las anomalías magnéticas

5.1 Relación con la susceptibilidad magnética y con la topografía

Los valores del perfil de anomalía residual muestran una suave tendencia de aumento hacia el Norte, incrementándose en unas 25 nT en los primeros 1500 m; en esa zona no se observa correspondencia con los valores de susceptibilidad, que son inferiores en la parte A de la Figura 159, que en la parte B. Puede observarse, en los segmentos A y B, una correlación inversa con la topografía, lo que puede ser indicio de que el aumento de campo magnético se deba a la mayor proximidad a rocas magnéticas hacia en Norte, por disminución de las cotas.

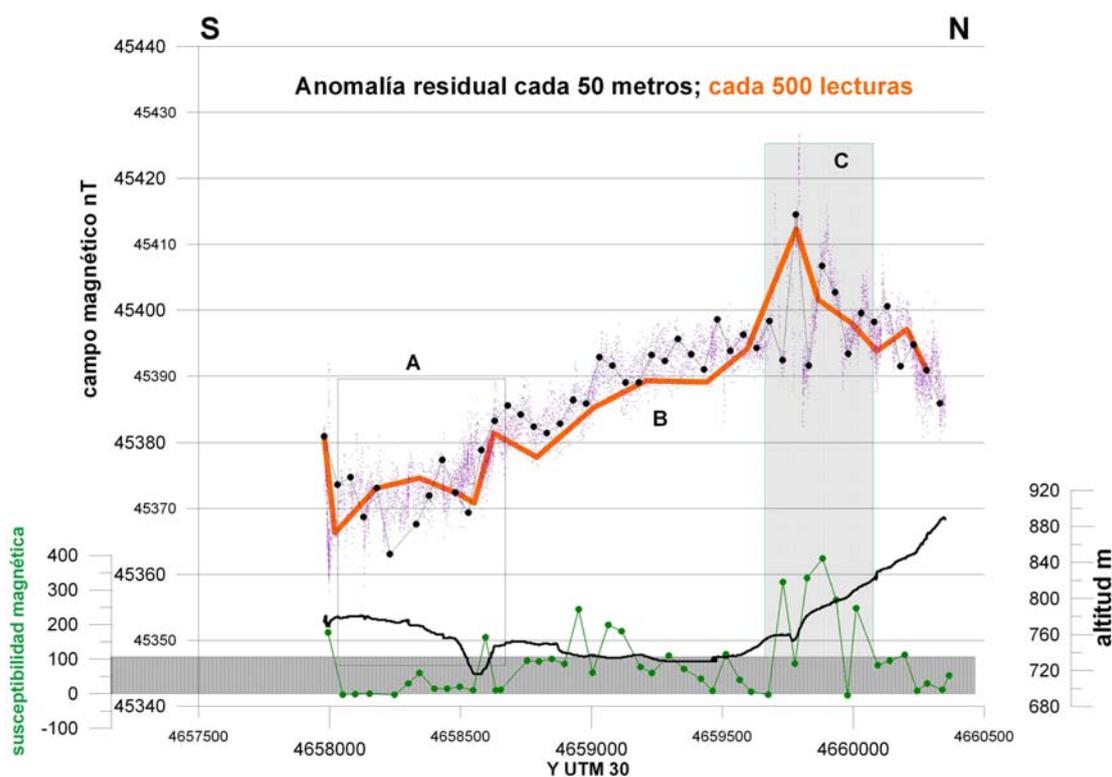


Fig. 159 Anomalía magnética residual junto con la topografía y susceptibilidad.

A partir de los 1500 m se produce una elevación en las cotas topográficas y una tendencia a la disminución del campo magnético, lo que ratifica la anterior hipótesis; esta disminución se ve interrumpida por una zona anómala C, de unos 400 m, con varias anomalías muy locales, cuyo origen es muy superficial (15 a 50 m de anchura), de unas 30-40 nT p/p de intensidad, totalmente correlacionadas con el aumento de la susceptibilidad en esa zona. Pasadas estas anomalías, el campo magnético disminuye mientras que la cota sigue aumentando.

5.2 Relación con la cartografía geológica y otras mediciones magnéticas

Durante la ejecución de las mediciones de SRM (Sondeos de Resonancia Magnética) en 2008, se han llevado a cabo mediciones de campo magnético en las mismas estaciones de SRM, así como en forma de perfil atravesando un afloramiento de ofitas en el NE de las lagunas (Figura 160).

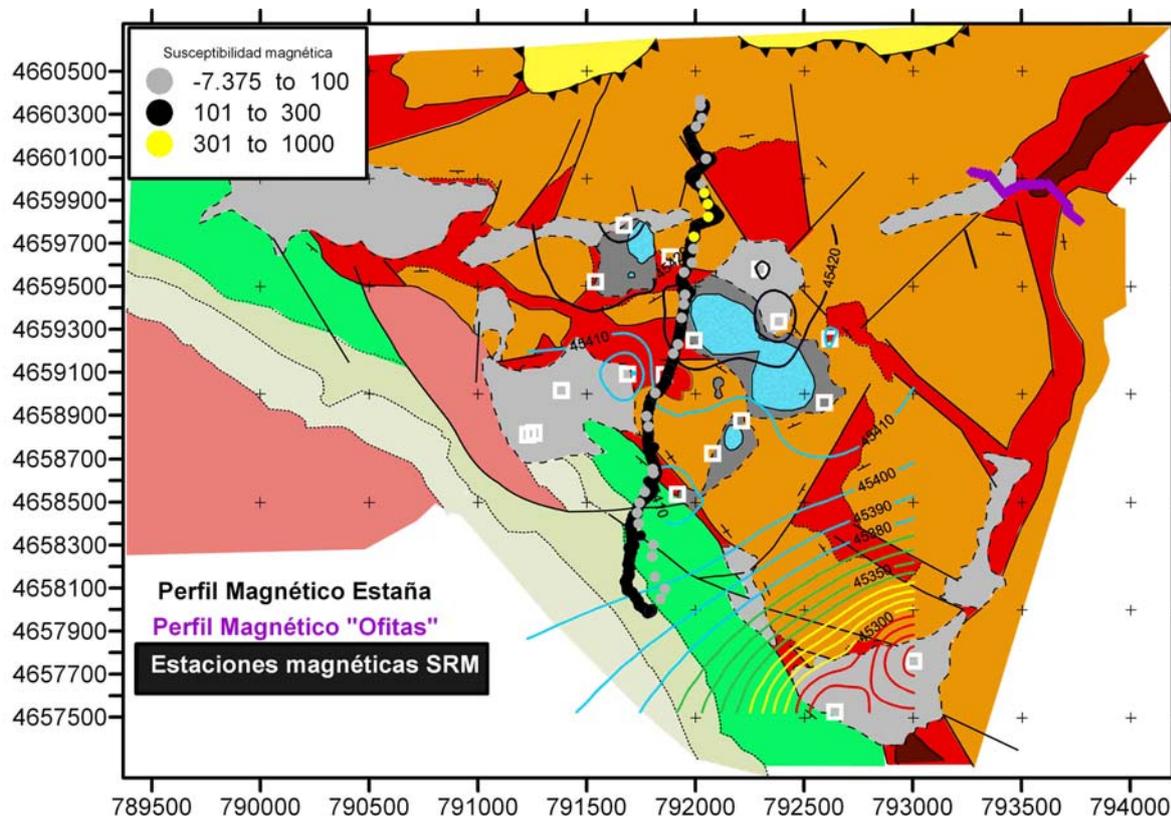


Fig. 160 Posición de todas las mediciones de campo magnético: perfil de 2007 (perfil N-S), y 2008 (estaciones de SRM y perfil de las ofitas). Se han posicionado las muestras de susceptibilidad clasificadas por valores, y superpuesto el mapa de anomalías magnéticas trazado con las lecturas en las estaciones de SRM.

Las mediciones en las estaciones de SRM se efectuaron para el cálculo de la frecuencia de Larmor de los protones de hidrógeno, tomando varias medidas en el interior del bucle de cable utilizado como antena (cuadrados de 50 a 150 m de lado). La oscilación del campo magnético dentro de estos cuadrados es pequeña, entre 2 y 12 nT, salvo en las estaciones SRM4 y SRM5 (las situadas más al Sur), donde las variaciones son mucho mayores: 75 nT. El mapa de campo magnético dibujado con el valor medio medido en estas pocas estaciones de SRM se representa en la Figura 161-izquierda, en la que se ha superpuesto la posición del perfil magnético medido en 2007. En la Figura 161-derecha se comparan los valores del perfil de 2007 con los deducidos del mapa de 2008.

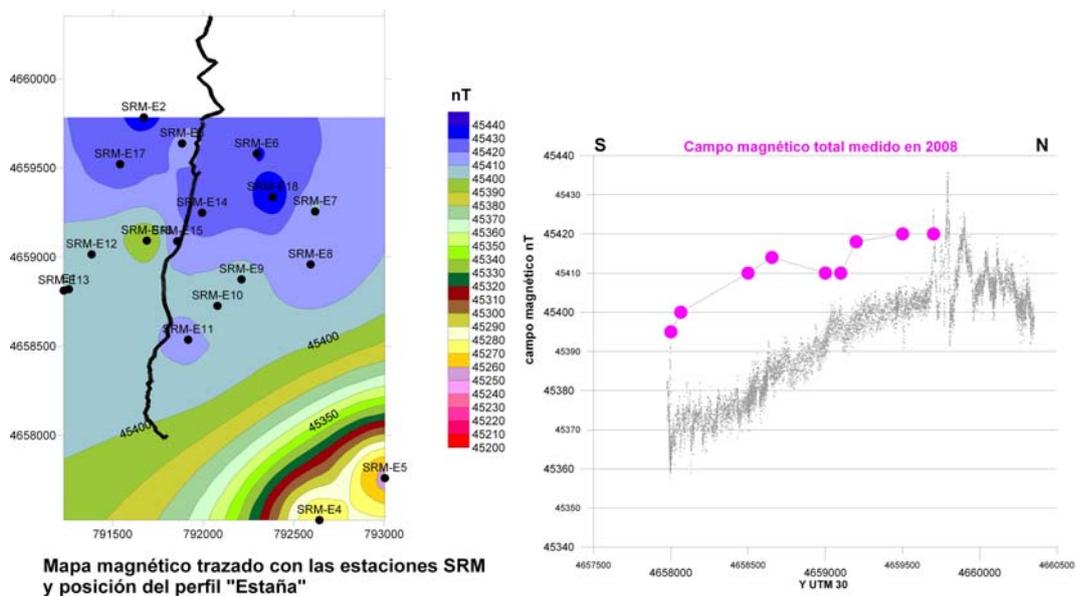


Fig. 161 Izquierda: mapa magnético trazado con los valores leídos en las estaciones de SRM en 2008. Derecha: comparación entre el perfil medido en 2007 y el campo magnético obtenido sobre el mismo con las lecturas de SRM en 2008.

Puede apreciarse que el mapa dibujado con las estaciones de SRM también indica un aumento de campo magnético hacia las lagunas (Figura 160), con el mismo gradiente que el medido por el perfil de 2007 (aunque el valor absoluto en 2008 es unas 25 nT mayor), según se observa en la Figura 161-derecha. Sin embargo, en el Sur, estaciones SRM4 y SRM5, el gradiente del campo magnético aumenta notablemente, perfilándose una anomalía de más de 150 nT, comentada en detalle en el capítulo 8, y que puede ser parte de la anomalía debida a la presencia de ofitas, cartografiadas aflorantes a menos de 500 m de las estaciones (Figura 160).

En la figura 162 se representan conjuntamente, y a las mismas escalas vertical y horizontal, los perfiles medidos en 2007 y en 2008, donde se pone en evidencia que en el perfil de 2007 no existen anomalías magnéticas debidas a la presencia de rocas básicas, siendo un perfil típico de rocas no magnetizadas.

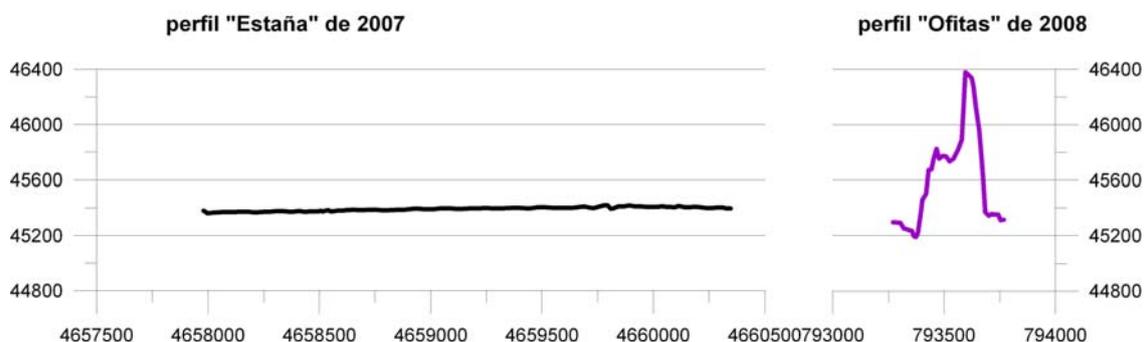


Fig. 162 Comparación de los perfiles magnéticos medidos en 2007 (sobre rocas carbonatadas y yesos) y el medido en 2008 sobre rocas básicas.

5.3 Conclusión sobre la interpretación

Finalmente, se presenta (Figura 163) la interpretación cualitativa dada a este perfil. El esquema geológico presentado sólo quiere indicar la cartografía de superficie, no las estructuras en profundidad. Las litologías presentes son rocas que no presentan ni valores ni contrastes de susceptibilidad suficientes para producir anomalías magnéticas, que es lo que manifiesta el perfil medido. En todo caso podría aventurarse un ligero aumento de 10 nT al pasar de las calizas cretácicas a las rocas triásicas. Dentro de estas últimas, no hay diferenciación entre las calizas del Muschelkalk y los yesos y lutitas del Keuper, aunque, según las estaciones que se tomen para formar el perfil, una interpretación forzada dejaría ver cierta correlación entre pequeños máximos relativos de unas 3 nT con algunas franjas de Keuper, que son visibles según las estaciones tomadas para formar el perfil; pensamos que esta asociación es casual, y no puede utilizarse como criterio de cartografía magnética.

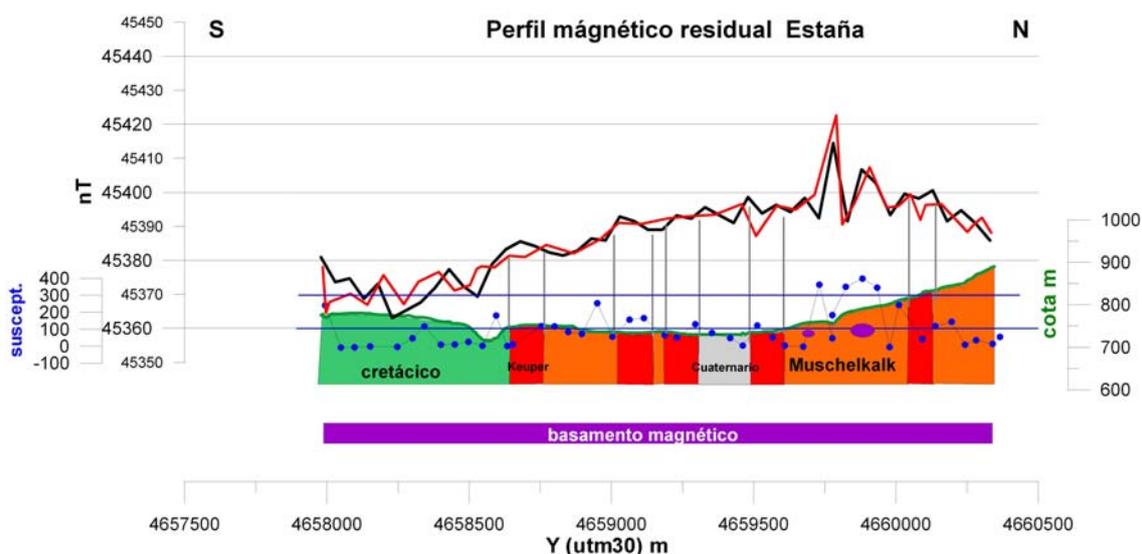


Fig. 163 Interpretación cualitativa del perfil magnético, con esquema de la cartografía de superficie y posición relativa de cuerpos magnéticos. Valores residuales cada 50 m (en negro) y valores utilizando un muestreo desplazado 10 m del anterior (en rojo).

La tendencia de aumento de campo magnético hacia el Norte debe pues ser adjudicada a la mayor proximidad a un basamento magnético, debido a la disminución de las cotas topográficas, ya que cuando éstas vuelven a elevarse, el campo magnético tiende de nuevo a disminuir. Es evidente la presencia de materiales algo más magnéticos en la porción de terrenos del Muschelkalk entorno de las coordenadas Y 4659750-4660000, quizá contaminados por detritos de ofitas. Cabe concluir que la magnetometría no resulta ser un método apropiado para aplicaciones geológico-estructurales en este entorno, excepto para la cartografía de las ofitas, que se manifiestan claramente por sus fuertes anomalías.

ANEXO I

GRÁFICOS DEL RESULTADO DE LA MEDICIÓN E INVERSIÓN DE LOS SRM

Los resultados del proceso de inversión de los SRM quedan expresados en la siguiente colección de gráficos (Figuras 164 a 181), donde se recogen las curvas $e(t)$ filtradas en el proceso, el sondeo $E_0(q)$ obtenido con dichas curvas, el resultado $w(z)$ y $T_1(z)$, así como los datos de calidad de campo: ruido, frecuencia y fase en función del momento de cada pulso q . Se han incluido también los distribuciones de permeabilidad y transmisividad acumulada $k(z)$ y $T(z)$ calculadas con un coeficiente de calibración de $7E-09$, por lo que su valor es meramente relativo.

SRM E1

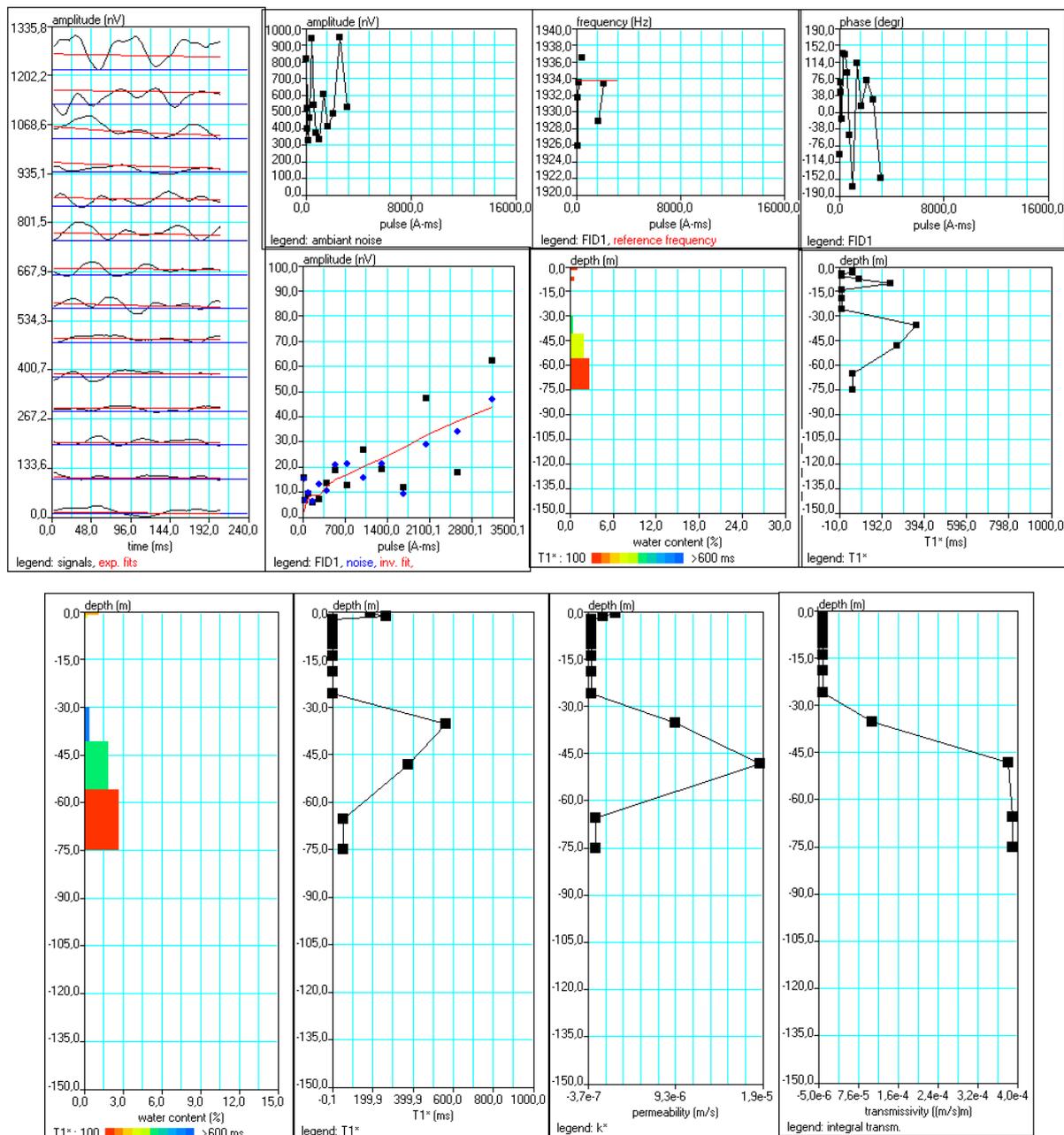


Fig. 164 Resultado del proceso de inversión del SRM E1

SRM E2

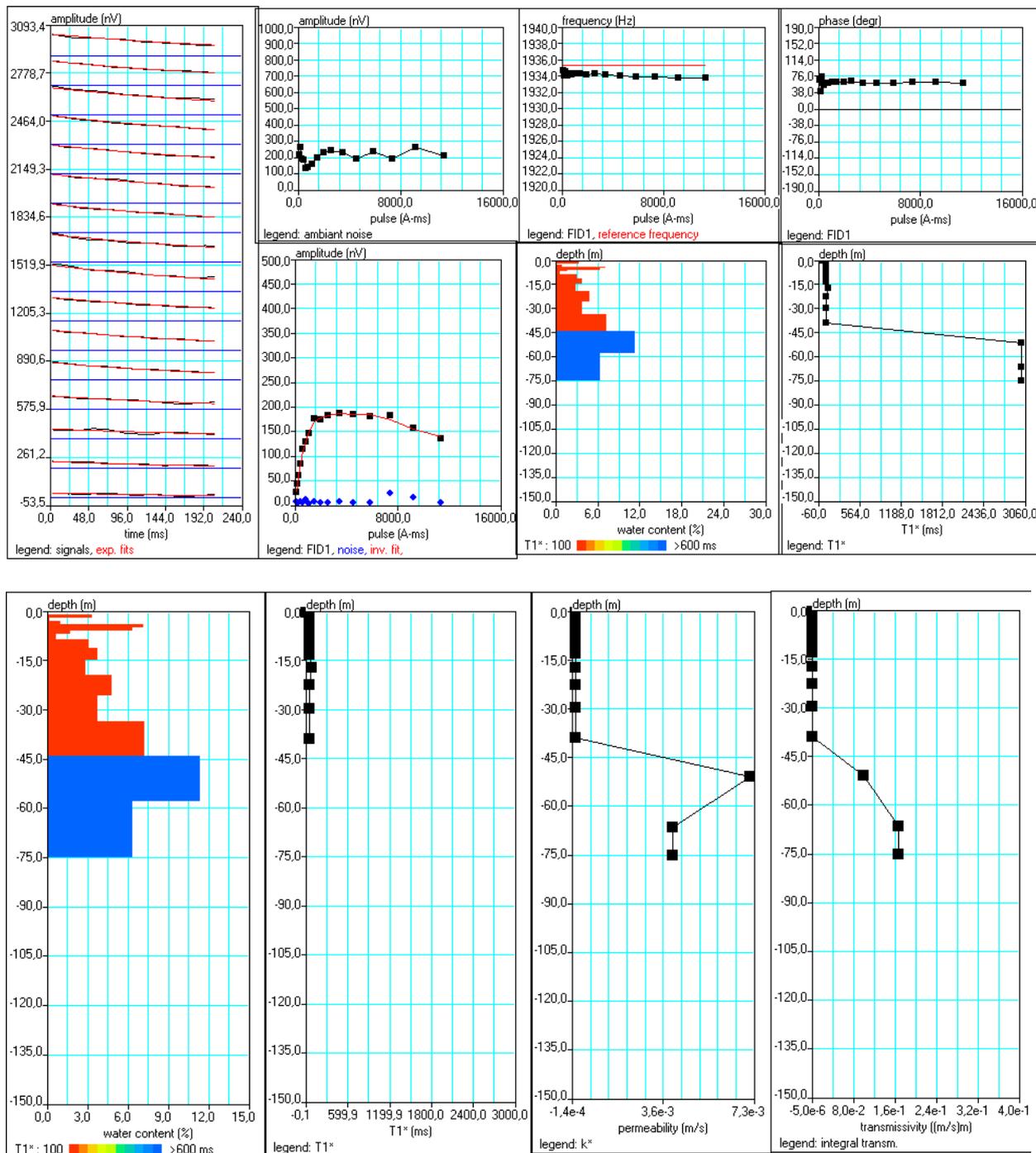


Fig. 165 Resultado del proceso de inversión del SRM E2

SRM E3

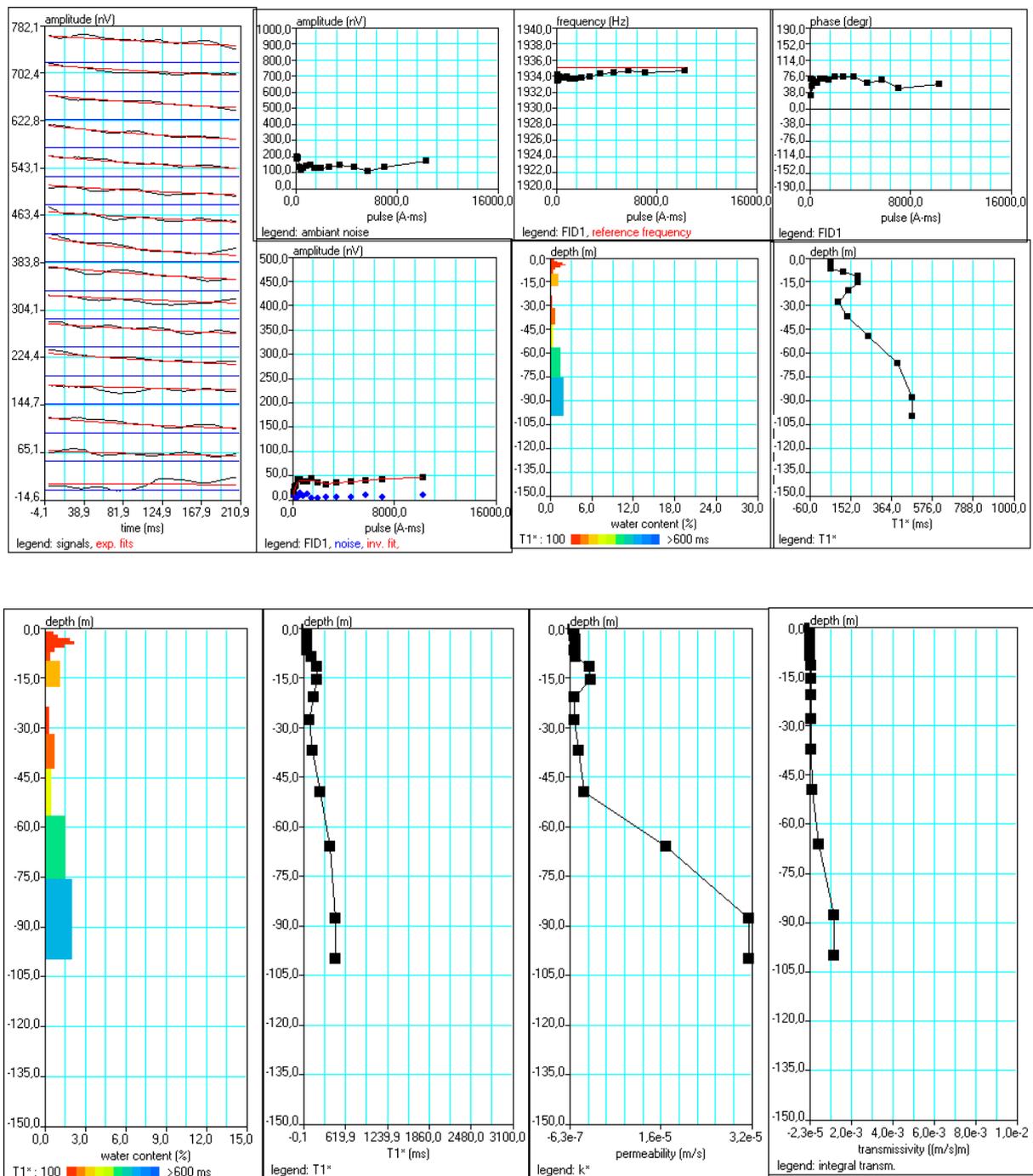


Fig.166 Resultado del proceso de inversión del SRM E3

SRM E4

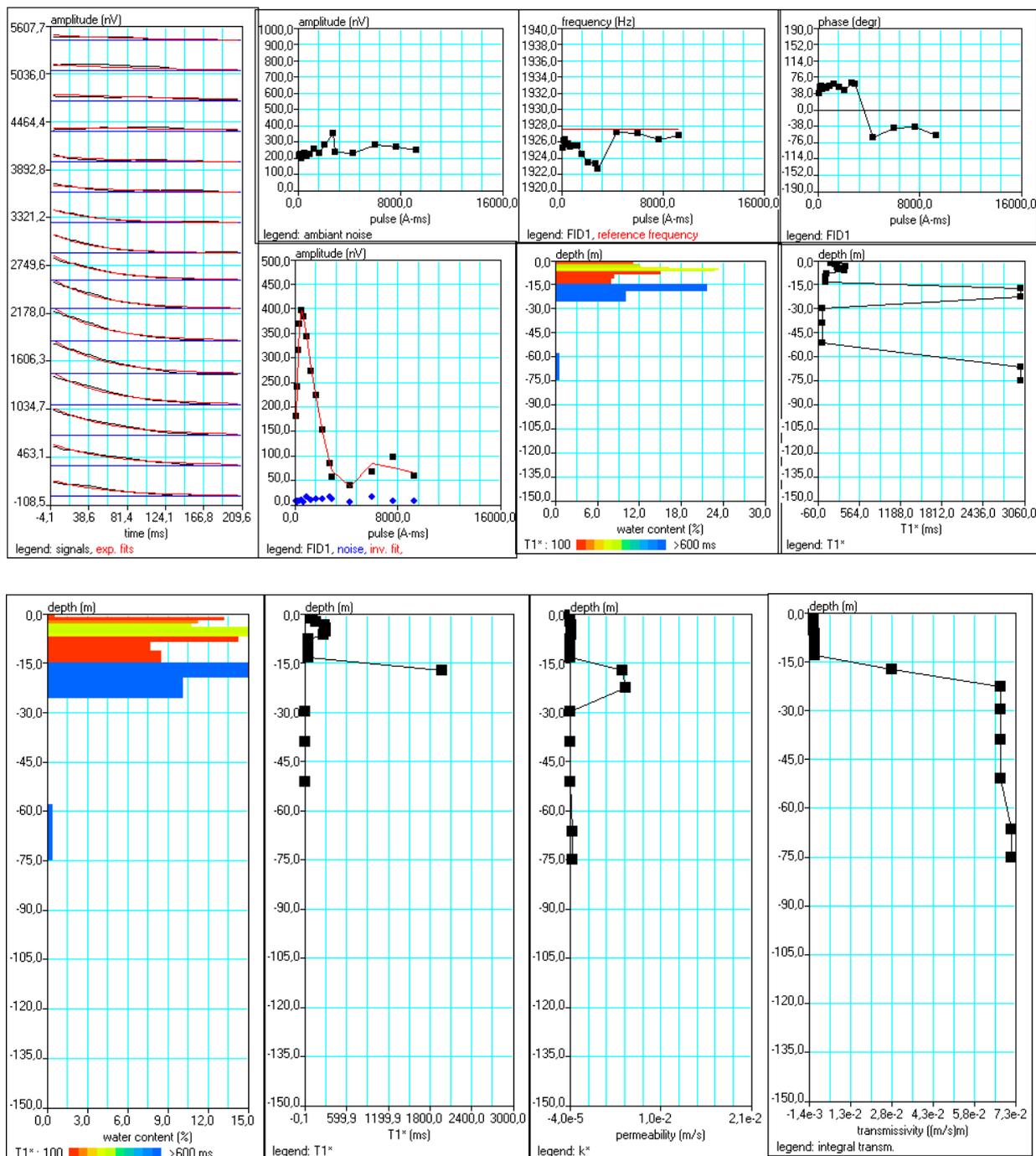


Fig. 167 Resultado del proceso de inversión del SRM E4

SRM E5

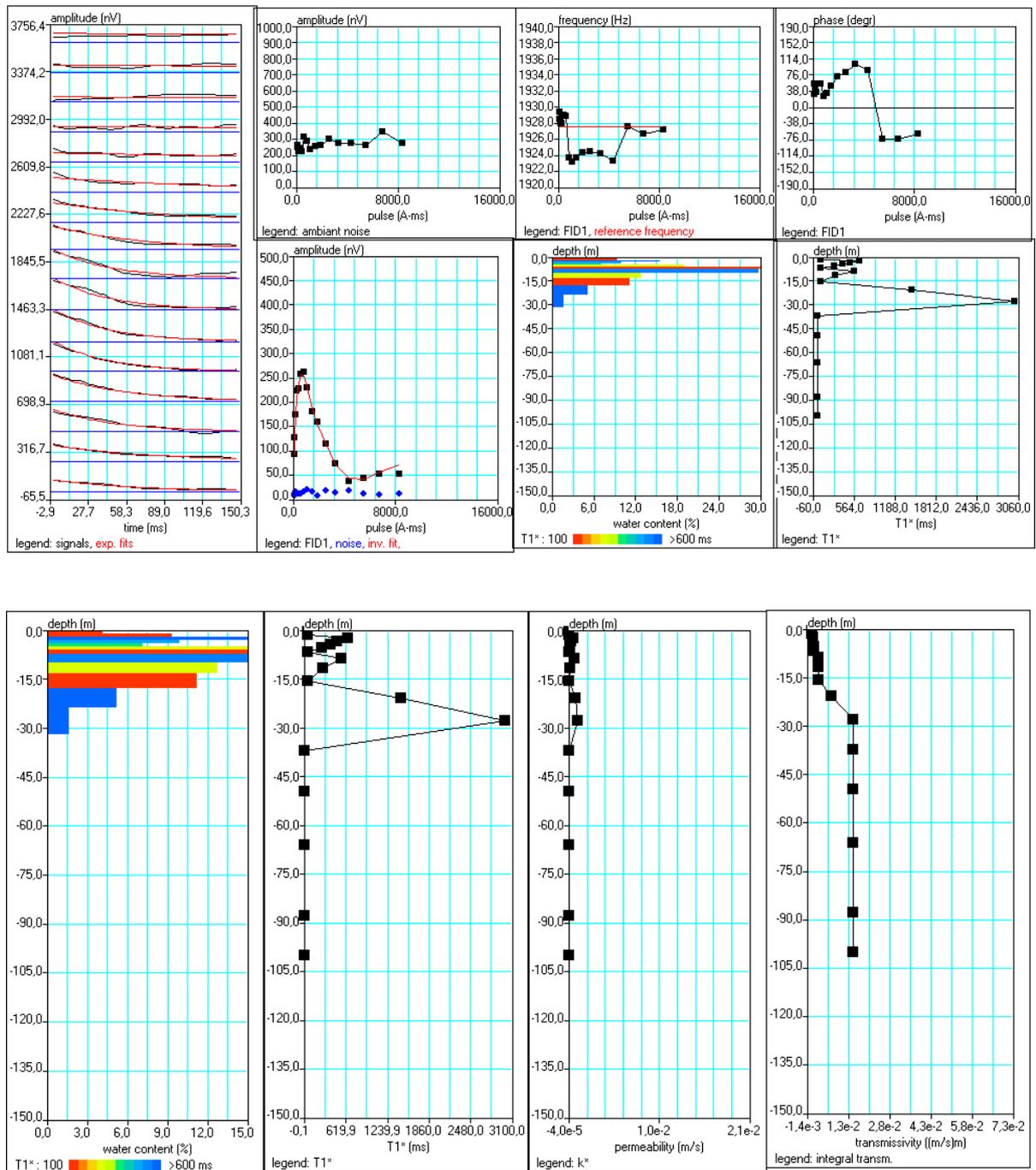


Fig.168 Resultado del proceso de inversión del SRM E5

SRM E6

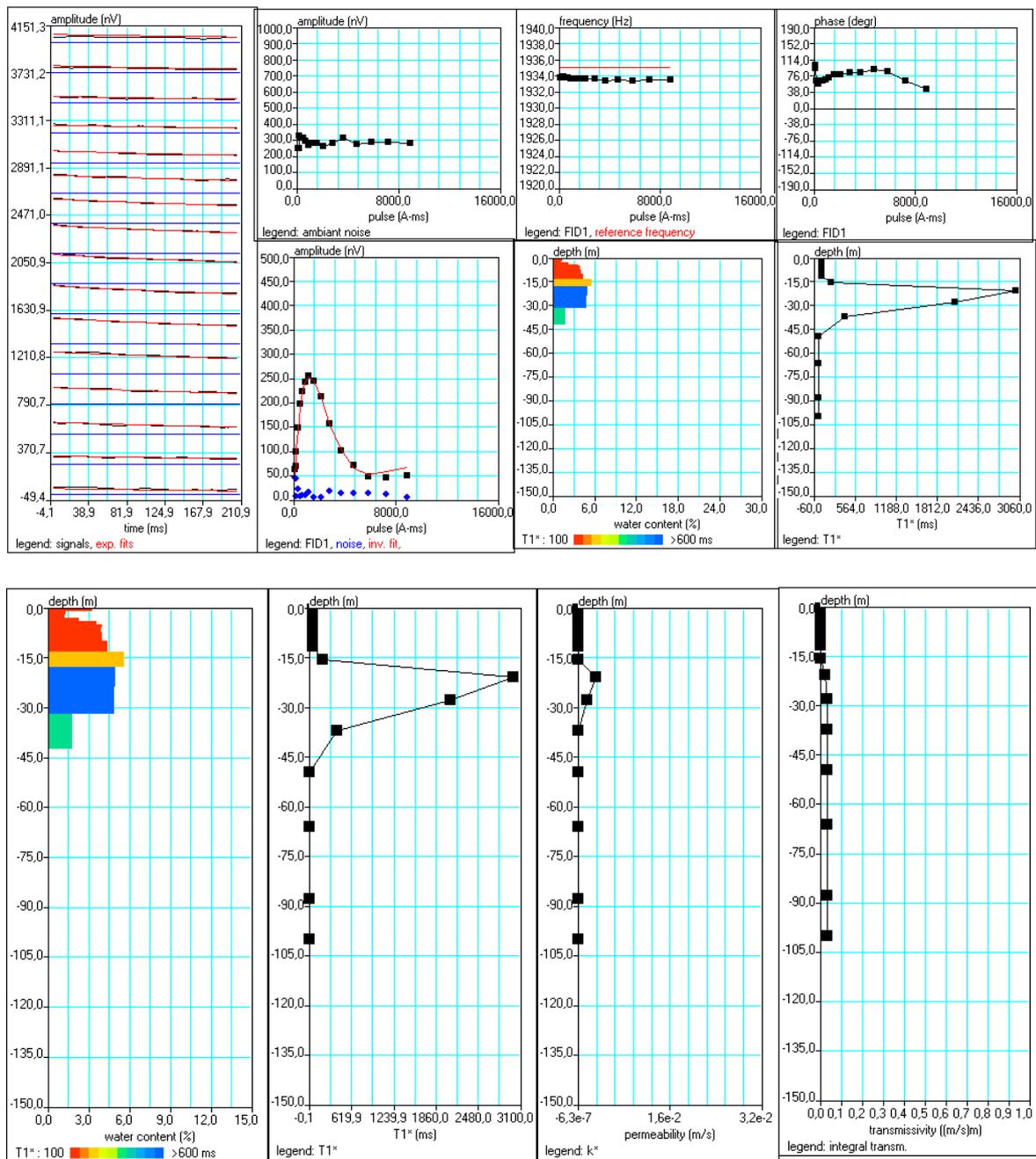


Fig.169 Resultado del proceso de inversión del SRM E6

SRM E7

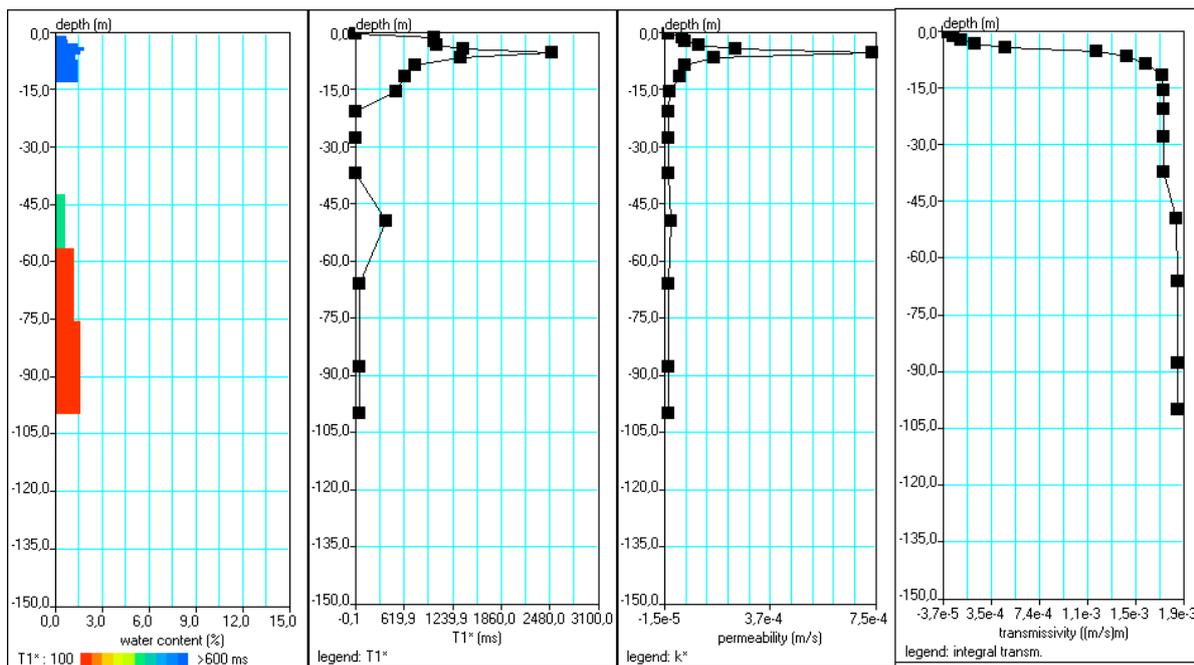
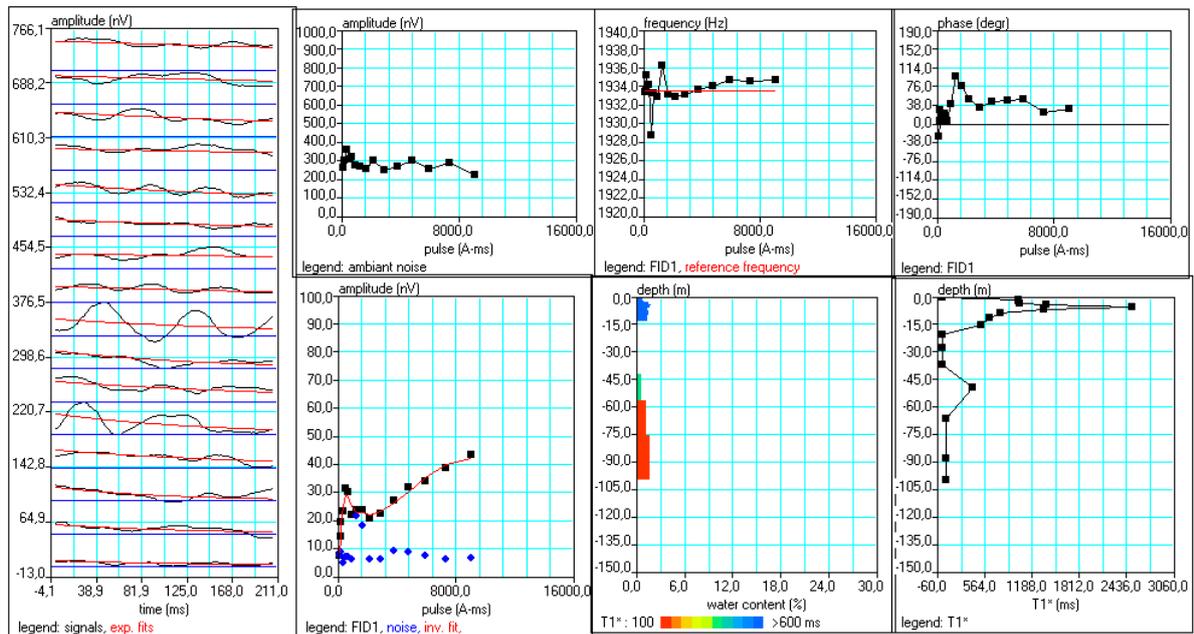


Fig. 170 Resultado del proceso de inversión del SRM E7

SRM E8

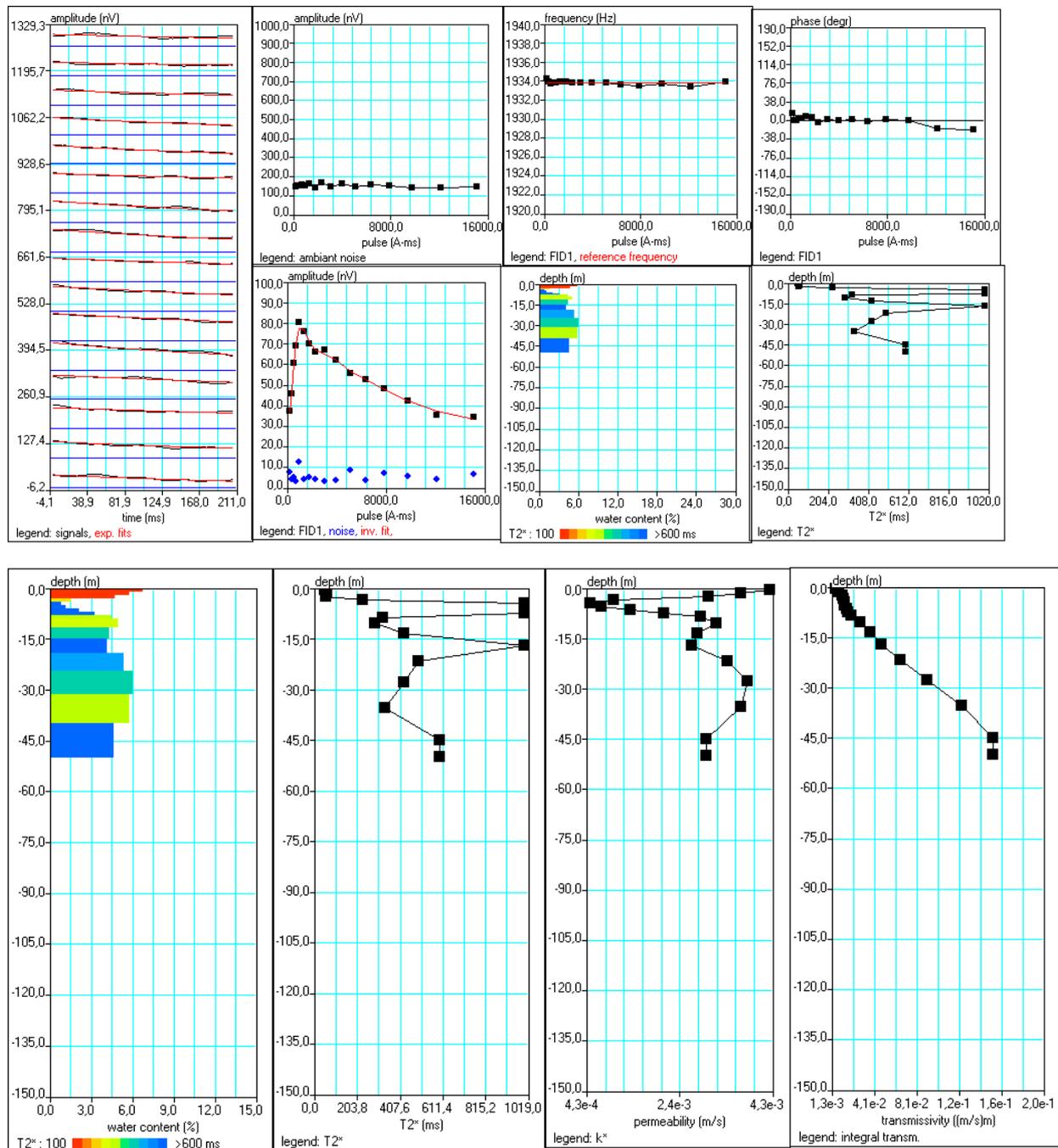


Fig. 171 Resultado del proceso de inversión del SRM E8

SRM E9

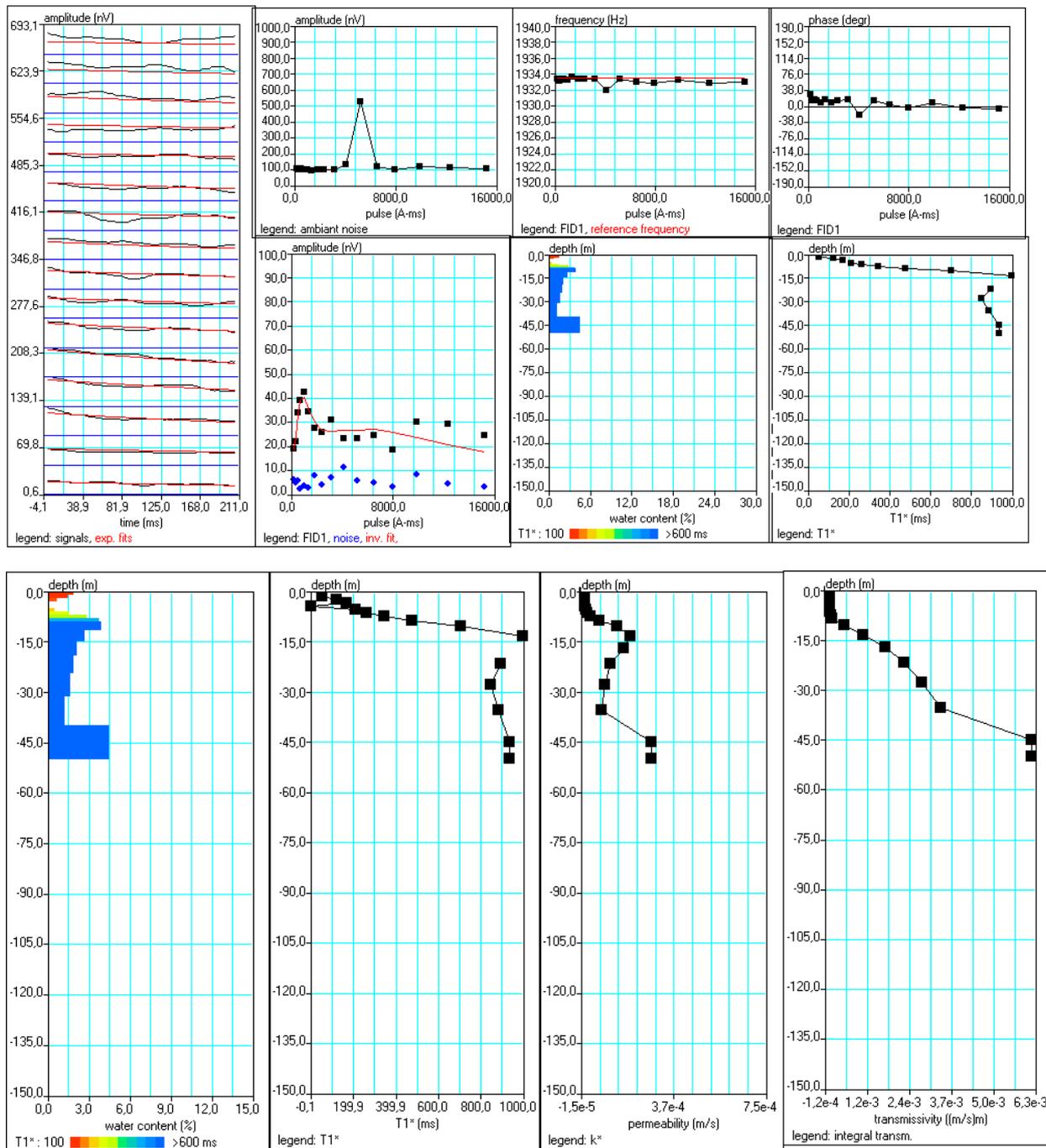


Fig. 172 Resultado del proceso de inversión del SRM E9

SRM E10

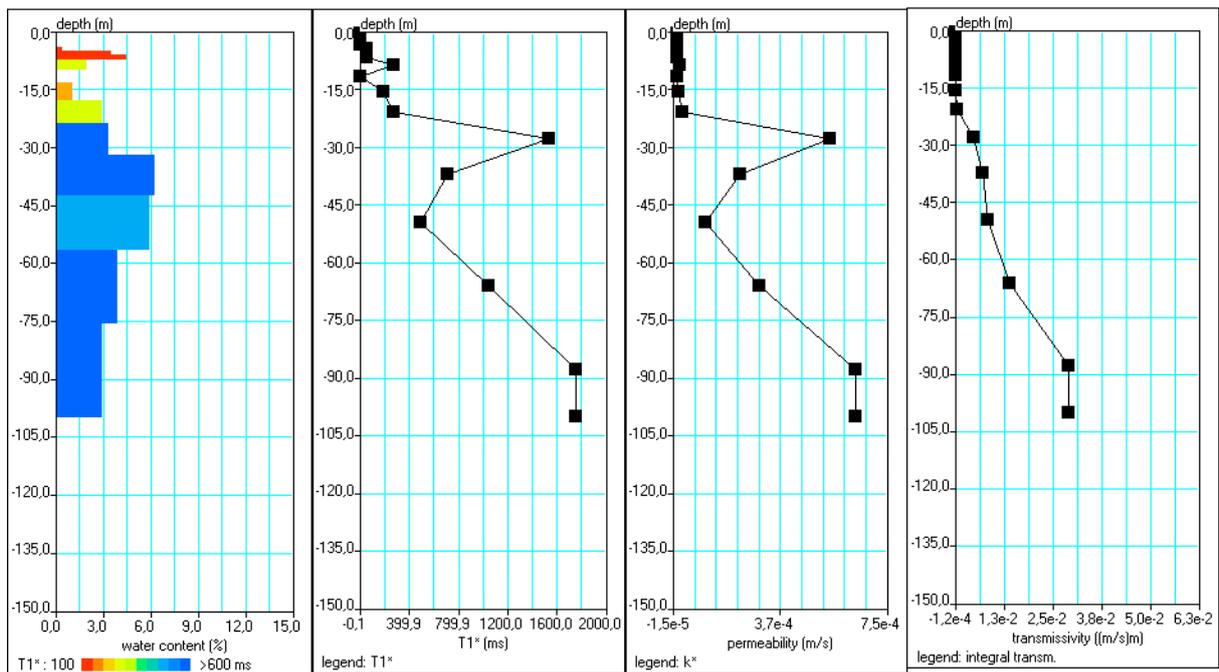
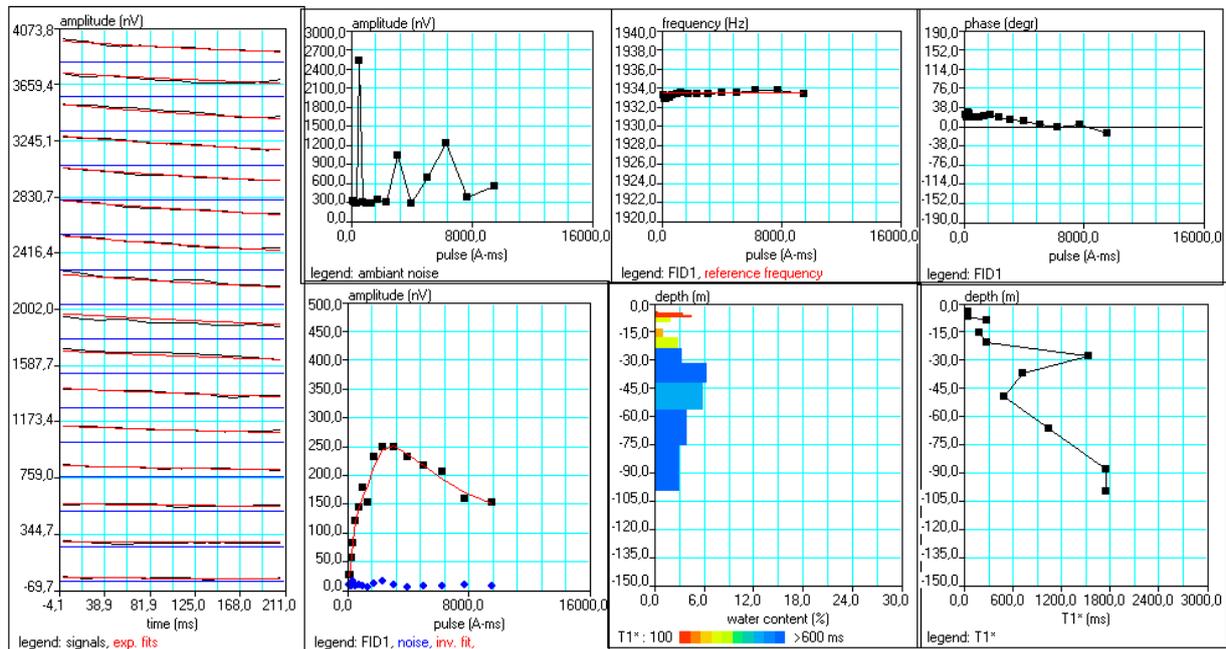


Fig. 173 Resultado del proceso de inversión del SRM E10

SRM E11

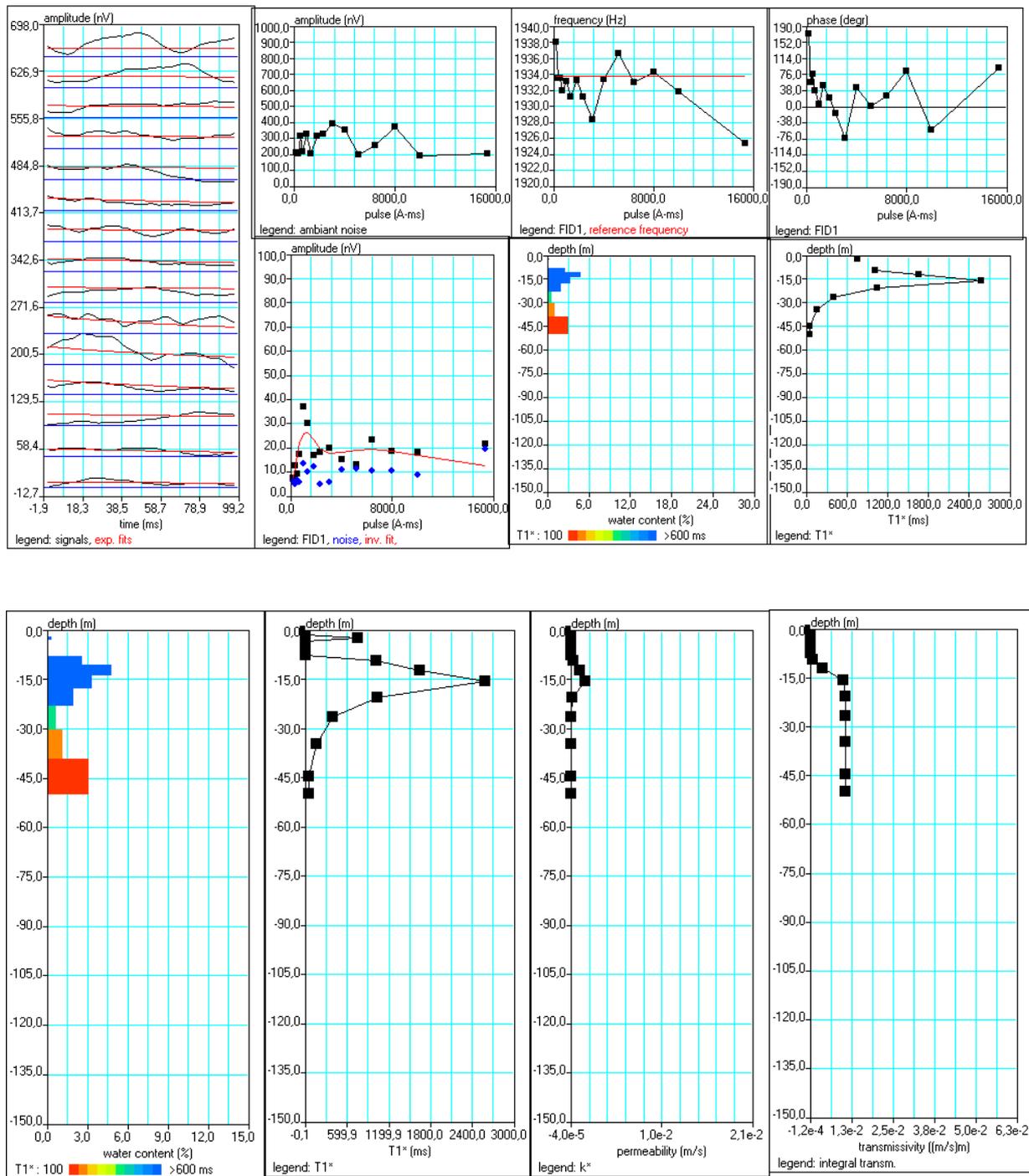


Fig. 174 Resultado del proceso de inversión del SRM E11

SRM E12

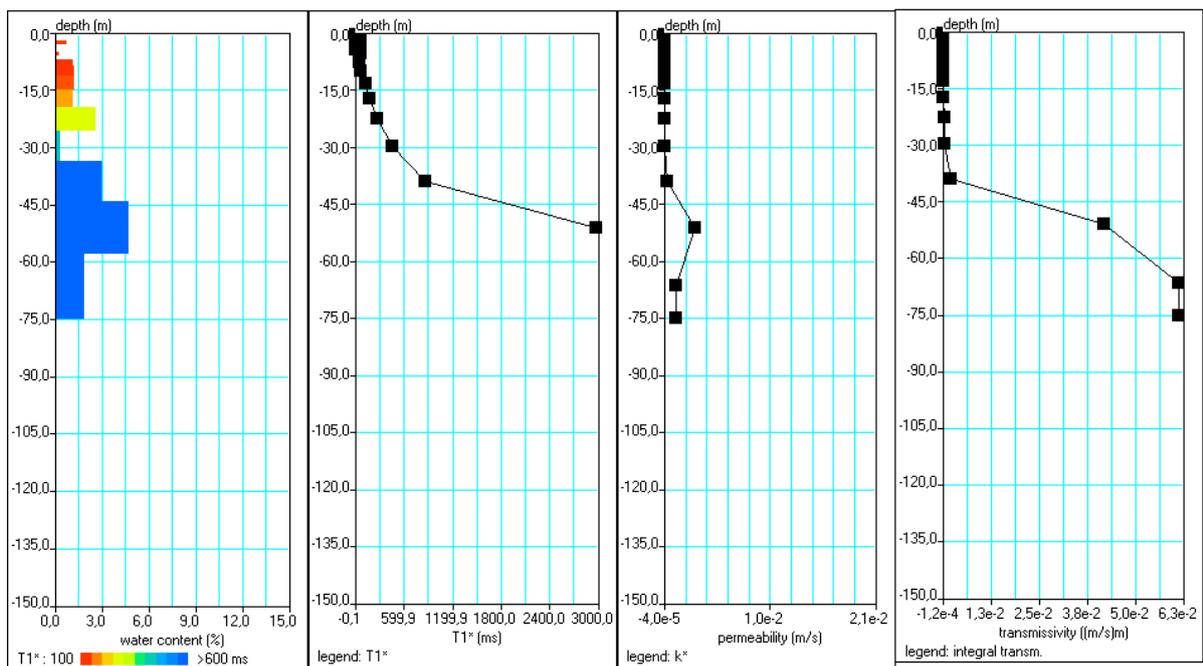
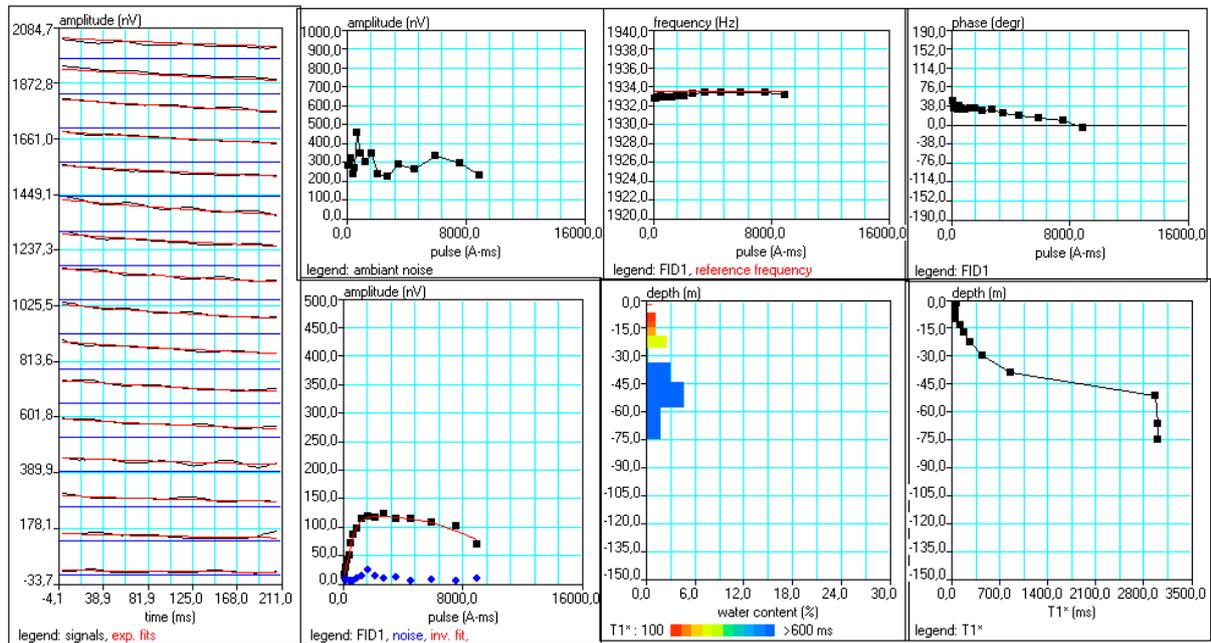


Fig. 175 Resultado del proceso de inversión del SRM E12

SRM E13

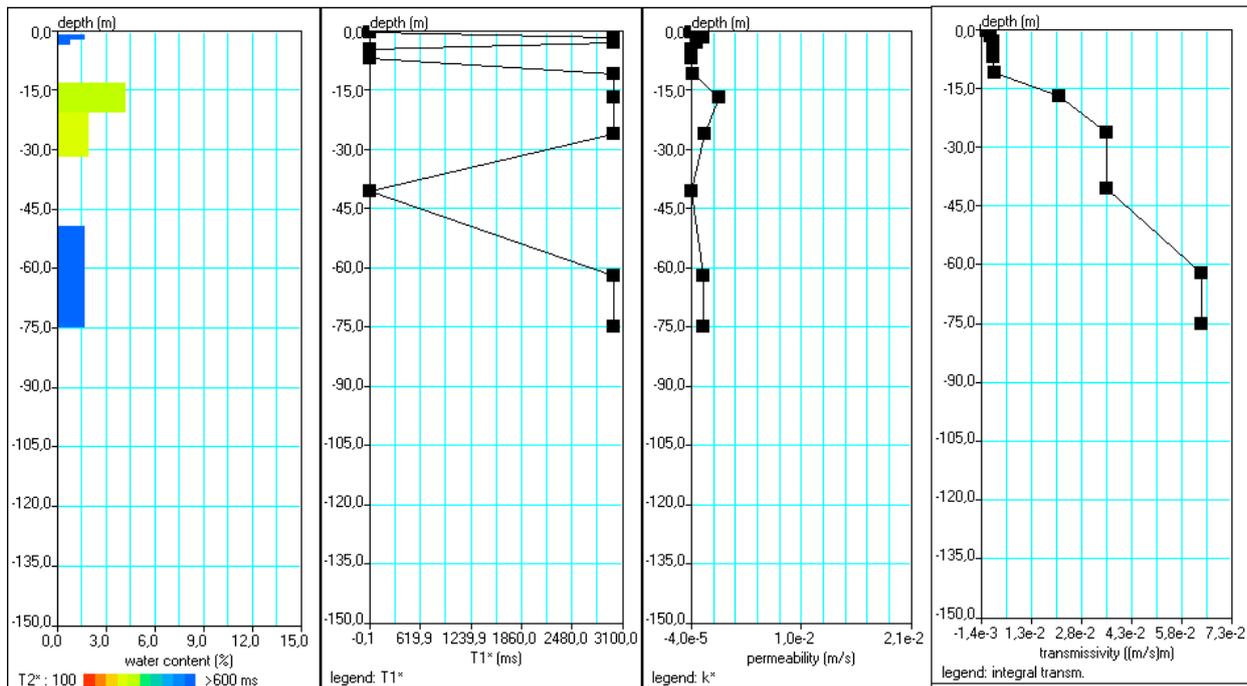
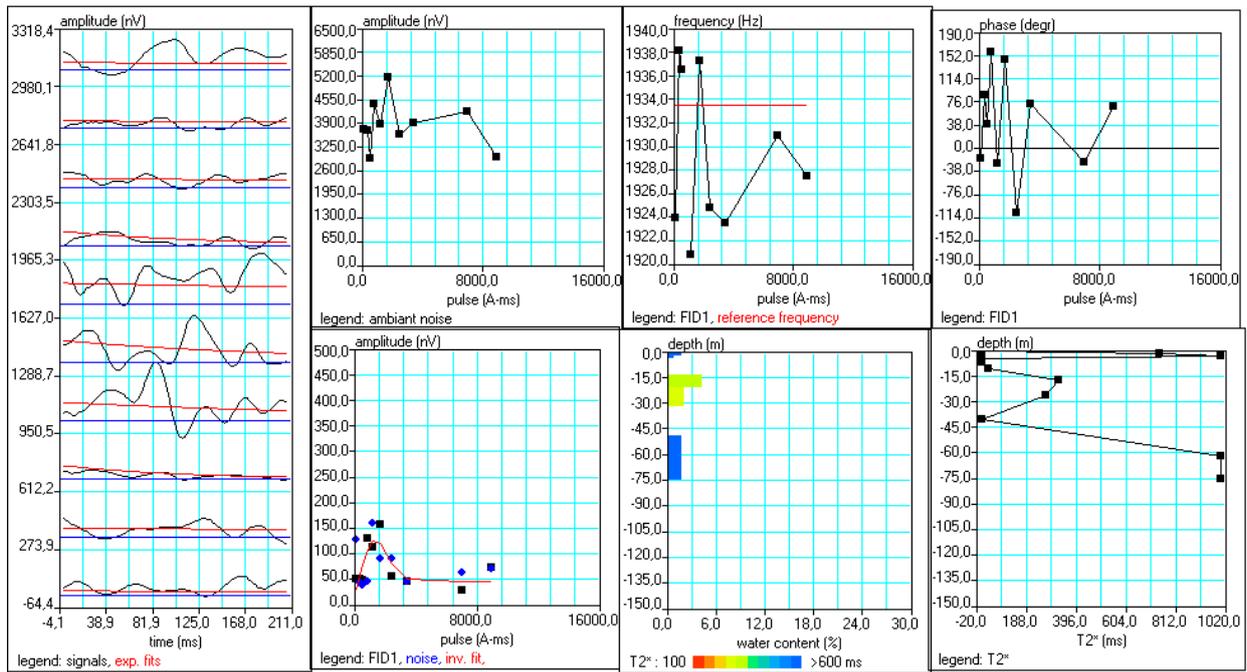


Fig. 176 Resultado del proceso de inversión del SRM E13

SRM E14

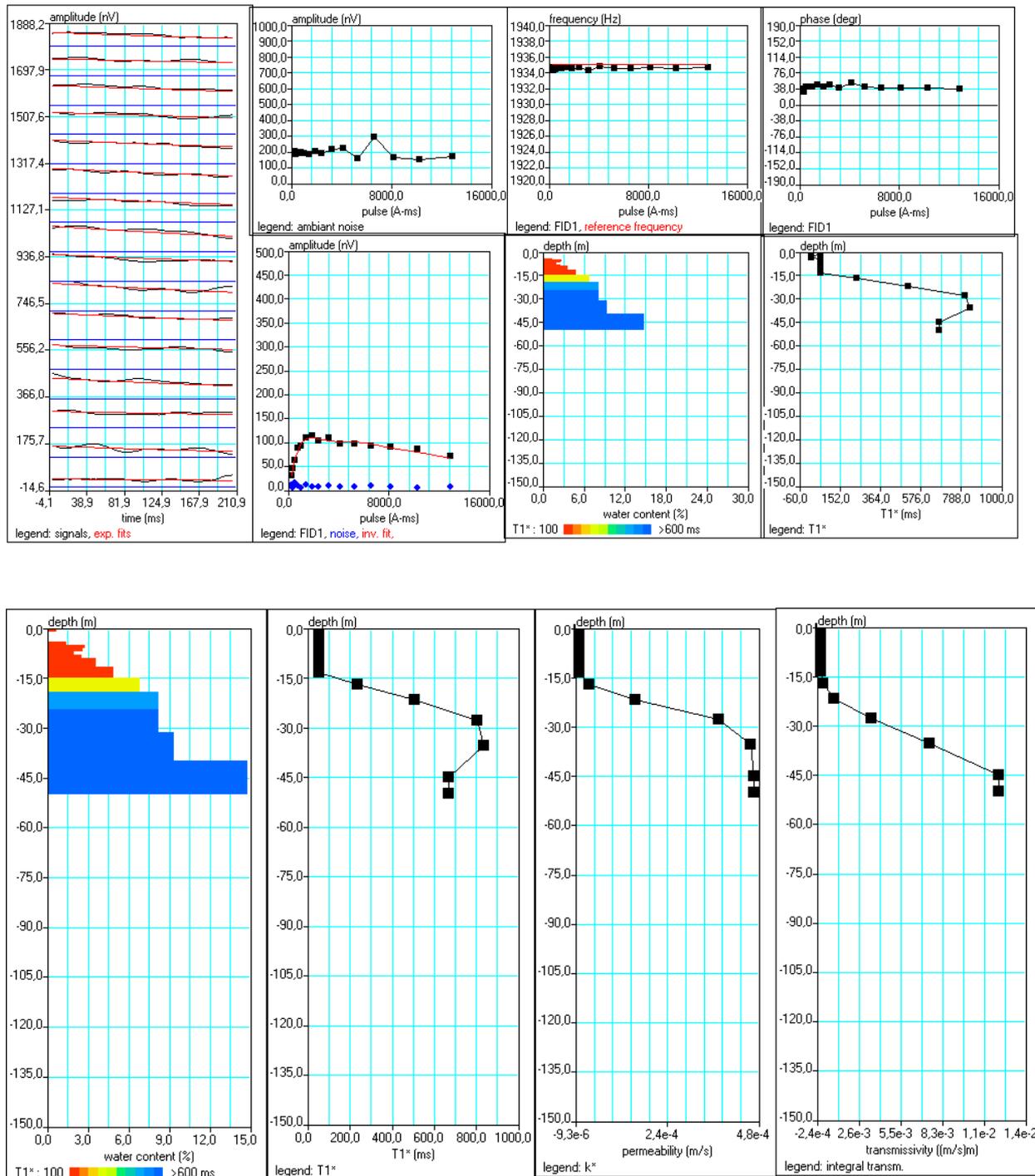


Fig. 177 Resultado del proceso de inversión del SRM E14

SRM E15

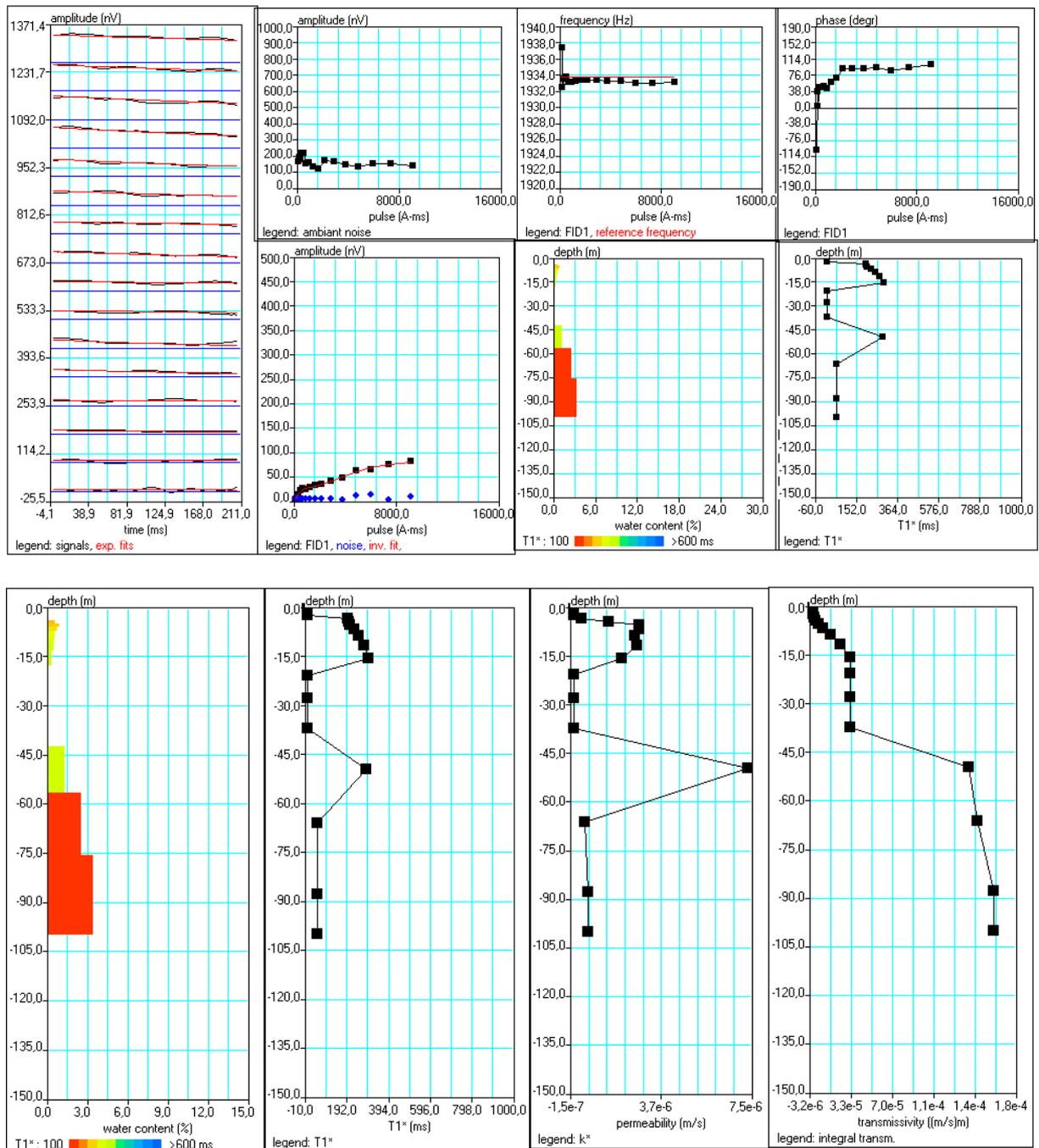


Fig. 178 Resultado del proceso de inversión del SRM E15

SRM E16

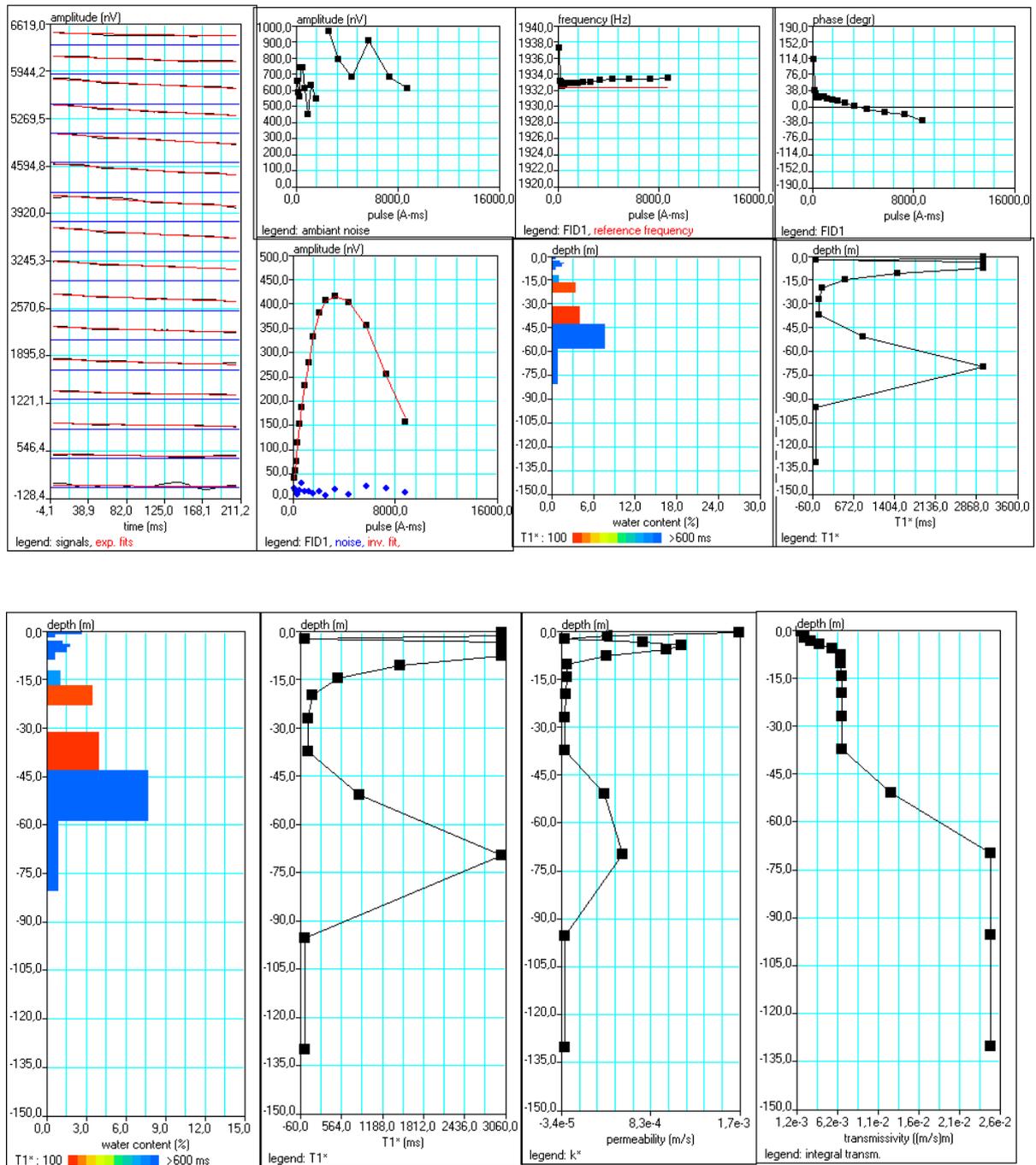


Fig. 179 Resultado del proceso de inversión del SRM E16

SRM E17

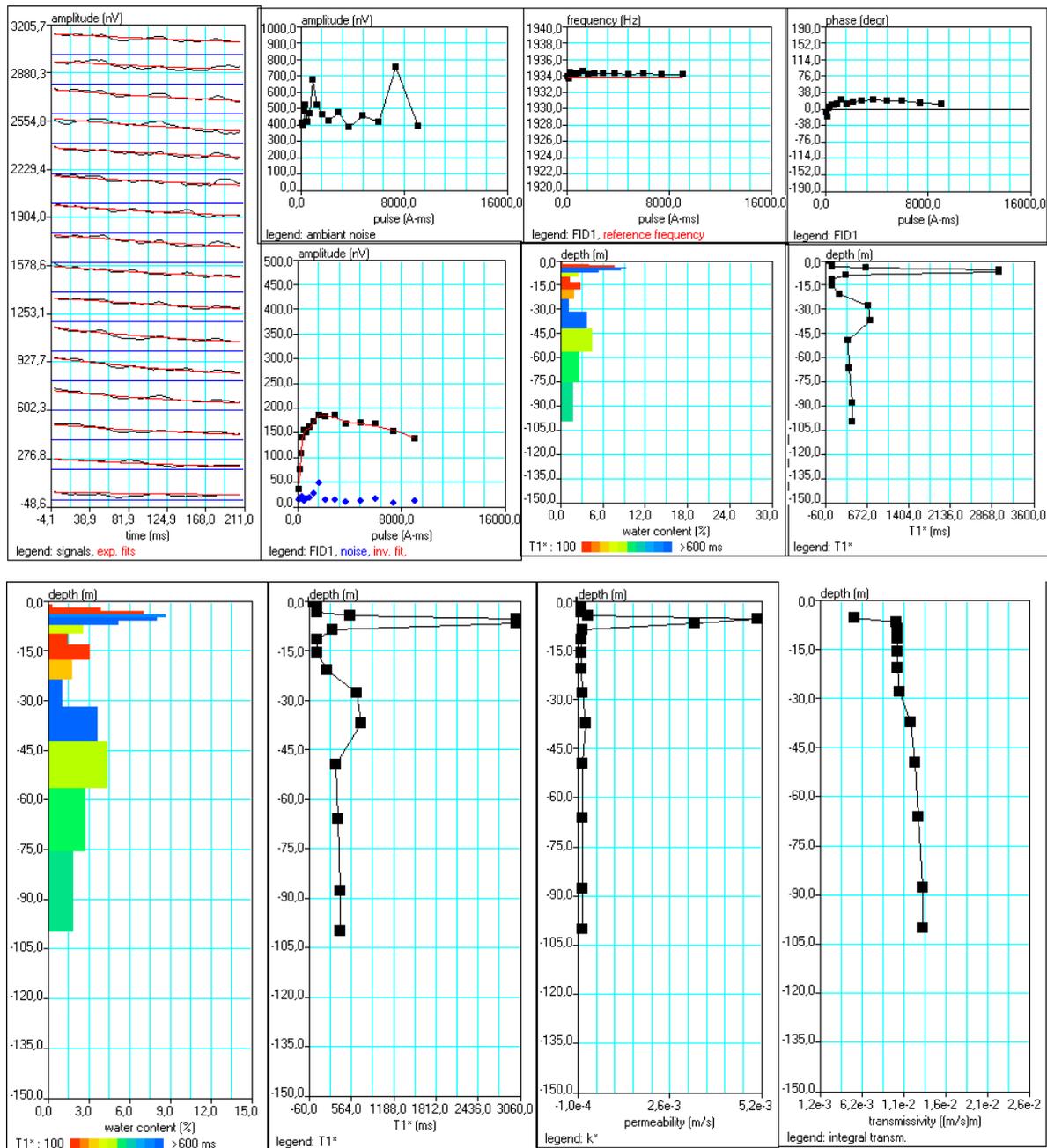


Fig. 180 Resultado del proceso de inversión del SRM E17

SRM E18

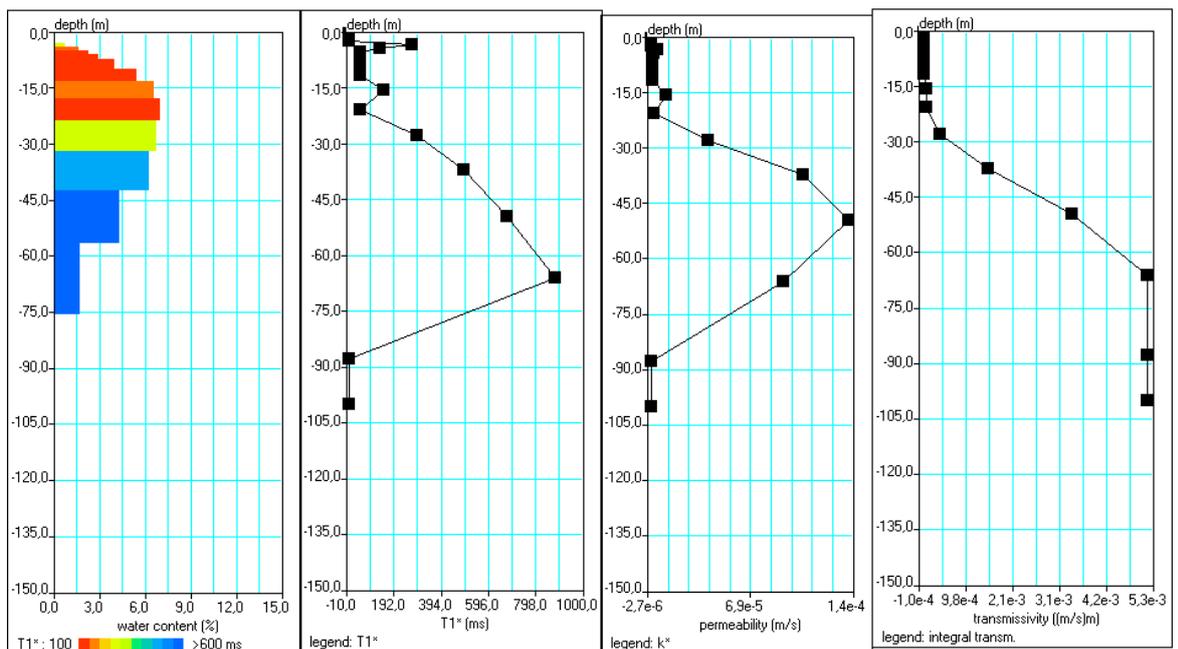
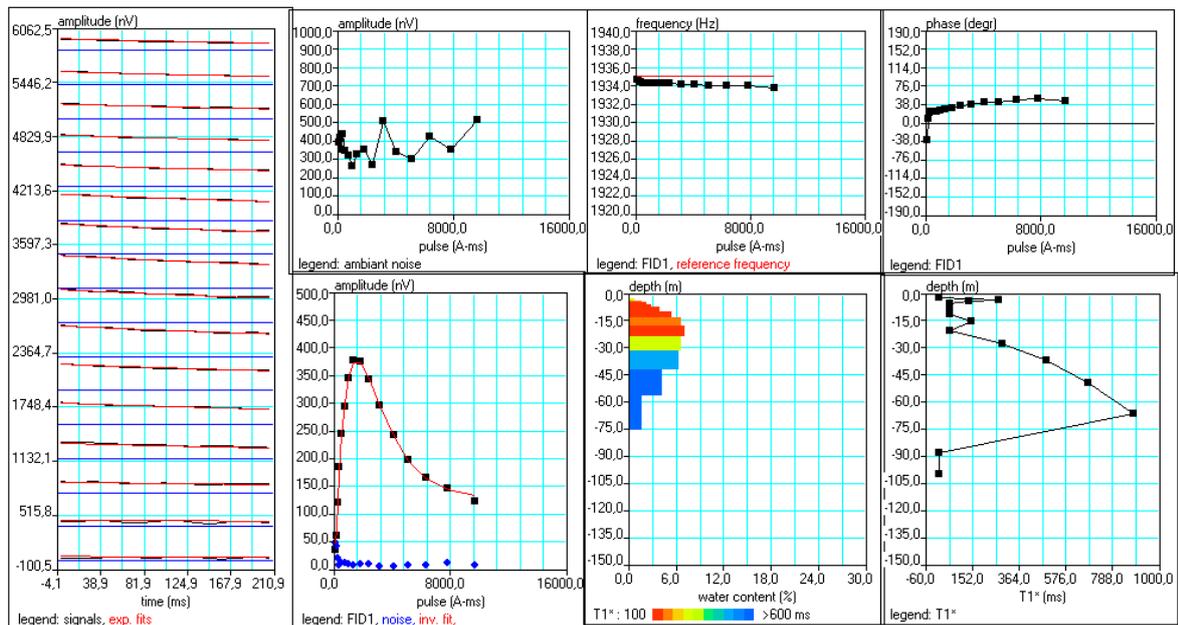


Fig. 181 Resultado del proceso de inversión del SRM E18

ANEXO II

RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS PERFILES ELÉCTRICOS

RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS PERFILES ELÉCTRICOS

El Anexo Informático, carpeta PE-Estaña2008, contiene los ficheros de datos de campo y de las interpretaciones de los perfiles mediante el programa Res2dinv.

Los tipos de ficheros que se encuentran en estas carpetas poseen las siguientes extensiones:

“.log” y “.s4k” ficheros de datos de campo generados en el equipo ABEM

“.dat” fichero ASCII con los datos de campo transformados al formato para el programa Res2dinv

“.inv”, “.rho”, “.rms”, “.inf”, “.GLF”, “.ref”, “.RLF” ficheros generados por el programa res2dinv, donde se almacenan los datos de la inversión (inv) y los ficheros necesarios para representar los perfiles con el programa Erigraph v2.2 (rho).

CARPETA perfil1sch:

“Irest02.s4k”: fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest02.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest02.2008.08.06.16.58.58.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil1schlumbergertopoeditadotrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil1schlumbergertopoeditadotriminverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo1.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

CARPETA perfil1wenner:

“Irest01.s4k” : fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest01.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest01.2008.08.06.16.58.58.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil1wennertopoedittrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil1wenneredittriminverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo1.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

CARPETA perfil2sch:

“Irest04.s4k”: fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest04.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest04.2008.08.06.16.58.58.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil2schlumbergertopoeditrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil2schlumbergertopoeditriminverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo2.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

CARPETA perfil2wenner:

“Irest03.s4k” : fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest03.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest03.2008.08.06.16.58.58.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil2wennertopoedit.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil2wennertopoeditinverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo1.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

CARPETA perfil3wenner:

Datos campo originales:

“Irest05.s4k ”: fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest05.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest05.2008.08.07.20.14.30.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

Datos modificados:

“perfil3mod.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, y modificado al espaciado de 5m..

“perfil3modtopoedittrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, modificado al espaciado de 5 m, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida.

“Irest05.2008.08.07.20.14.30.dat” : fichero de datos de campo tipo amp, modificado al espaciado de 5 m.

“topo1.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

NOTA: Durante el proceso de medición, por error, se mantuvo como parámetro de medida una distancia entre electrodos de 15 m, por lo que los ficheros de campo muestran una resistividad aparente mal calculada; los ficheros para proceso han sido corregidos de este error.

CARPETA perfil4sch(Ollas):

“Irest07.s4k ”: fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest07.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest07.2008.08.08.22.47.22.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil4scheeditadotopotrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil2scheeditadotopotriminverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner –schlumberger, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo2.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

CARPETA perfil4wenner(Ollas):

“Irest06.s4k ”: fichero binario con los datos almacenados por el equipo de medida en campo.

“Irest06.txt”: fichero de texto con los parámetros de medida del equipo en campo.

“Irest06.2008.08.08.22.47.22.amp”: fichero datos de campo formato ABEM

“perfil4wenereditadotopotrim.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores y con topografía incluida.

“perfil2wenereditadotopotriminverso.dat”: fichero de datos del perfil medido con el dispositivo wenner, ordenado, filtrado de errores, con topografía incluida y e invertido en su dirección con respecto a la de medida-

“topo1.xls” : fichero excel con la topografía del perfil 1

Se incluyen también los ficheros de coordenadas de posición de los perfiles.

ANEXO III

RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA

La carpeta del Anexo Informático SRMEstaña2008 contiene los ficheros generados en las mediciones de campo, las matrices preparadas para la inversión de los datos y los ficheros generados en dicha inversión. Se han conservado también las configuraciones empleadas en el programa de inversión SAMOVAR para la representación gráfica de los resultados, así como el fichero de coordenadas de posición de los perfiles.

El formato NUMIS de estos ficheros es el siguiente:

Format of output files of the program Samovar 6x2

1. synteth file : name.inp

First 5 lines:

Site and comments:

Loop: type and dimensions Date: Time:

N q e t2 noise Udc freq phase

AT Q Kaml

System 0 lines

Data lines

N = number of q value; q – first pulse parameter; e – FID1 amplitude; T2 – FID1 relaxation time T2*; noise – ambient noise; Udc – DC/DC voltage; freq – FID1 signal frequency; phase – FID1 signal phase

AT – antenna type; Q- number of q values; kaml

Attention : for the current format number of lines begins from 0 and hence there is (Q+1) lines

Ejemplo:

```

Site: est5 100 16q 32s
Loop: 2 - 100.0 Date: 8/14/2008 Time: 12:00:00 AM
N q e t2 noise Udc freq phase
0 2 16 5526.6 0 0.0 0 0.00 0
1 74 119.63 53 263.8 8 1927.86 350
2 114 148.45 76 246.9 10 1927.52 337
3 190 207.39 44 222.7 13 1927.64 358
4 273 258.23 53 242.2 18 1928.72 8
5 422 288.36 39 224.7 23 1928.82 14
6 579 308.72 41 311.0 30 1928.82 17
7 798 313.36 41 288.8 39 1923.91 349
8 1072 296.97 38 236.2 52 1924.38 9
9 1447 216.27 69 253.7 68 1924.22 19
10 1905 162.93 118 263.8 88 1924.77 40
11 2536 127.56 158 300.2 115 1924.81 49
12 3320 97.72 162 273.3 147 1924.19 59
13 4341 50.78 229 273.3 193 1923.14 38
14 5492 42.07 1000 263.8 253 1926.19 204
15 6757 54.12 1000 342.8 330 1926.62 245
16 8325 57.69 320 272.6 429 1926.80 243
    
```

2. synteth file : name.in2

igual al inp; contiene los datos del segundo pulso

Site:

Loop: number and size0 Date: Time:

N q2 e2 t22 noise power freq2 ph2 delay Enorm Emean
AT Q Kaml

N = number of q value; q2 – second pulse parameter; e2 – FID2 amplitude; T2 – FID2 relaxation time T2*; noise – ambient noise; Udc – DC/DC voltage; freq – FID2 signal frequency; phase – FID2 signal phase; delay – interval between the pulses; Enorm – FID2 mean amplitude normalized; Emean – FID2 mean amplitude.

3. data files : name.00, name.01, name.02, ... , name.016

Each file contains results of stacking of data with one value of pulse parameter q.

A1 - clock frequency (Hz)

A2 - phase shift of the generator (degr)

A3 - phase shift of the amplifier (degr)

A4 - antenna type :

1 - c. r=50m, 2 - c. r=75m, 3 - 8 r=2x25m, 4 - 8 r=2x37m, 5 - c. r=2x25m.

A5 - average noise evaluation (nV)

A6 - Udc/dc

A7 - coefficient of amplification

A8 - antenna impedance for generation of the pulse (ohm)

A9 - number of lines in the file for data

line with data 'B' is a content of the vector conf[11]

B1 - number of readings of the noise (recording time= $B1*(4/cfreq)$ ms)

B2 - pause between recording of the noise and the pulse (pause duration= $B2*(0.25/cfreq)$ ms)

B3 - duration of the pulse (pulse duration= $B3*(4/cfreq)$ ms)

B4 - pause between the pulse and recording of the signal (pause duration= $B4*(0.25/cfreq)$ ms)

B5 - number of readings of the signal (recording time= $B5*(4/cfreq)$ ms)

B6 - pause (pause duration= $B6*(0.25/cfreq)$ ms)

B7 - duration of the second pulse (pulse duration= $B7*(4/cfreq)$ ms)

B8 - pause (pause duration= $B8*(0.25/cfreq)$ ms)

B9 - number of readings of the signal (recording time= $B9*(4/cfreq)$ ms)

B10 - pause (pause duration= $B10*(0.25/cfreq)$ ms)

B11 - number of readings of the signal (recording time= $B11*(4/cfreq)$ ms)

readings of the noise, the pulse and the signal

C1 - recording time (ms)

C2 - noise X (nV)

C3 - noise Y (nV)

C4 - pulse X current= $(300.*0.9375)*(C4/8192)$ (A)

C5 - pulse Y $\text{current}=(300.*0.9375)*(C5/8192)$ (A)
 C6 - signal 1 X (nV)
 C7 - signal 1 Y (nV)
 C8 - second pulse X $\text{current}=(300.*0.9375)*(C8/8192)$ (A)
 C9 - second pulse Y $\text{current}=(300.*0.9375)*(C9/8192)$ (A)
 C10 - signal 2 X (nV)
 C11 - signal 2 Y (nV)
 C12 - signal 3 X (nV)
 C13 - signal 3 Y (nV)

Example of real file with added comments (marked by *)

```
* A 1      A2  A3  A4  A5  A6  A7  A8  A9
2005.20    17 -30  1 1244  40 38829.7 10.466 522

* B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11
521 80 20 240 521 0 0 240 0 0 0

* C1  C2  C3  C4  C5  C6  C7  C8  C9  C10  C11  C12  C13
0.00 -390 -707 515 -115 -350 174 0 0 0 0 0 0
1.99 -307 -316 1202 219 -156 197 0 0 0 0 0 0
3.99 -250 -72 1517 374 62 322 0 0 0 0 0 0
5.98 92 -40 1731 517 -42 136 0 0 0 0 0 0
.....
.....
```

4. filtered signal files : name.f0, name.f1, name.f2, ... , name.f16

```
105
C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8 C9 C10 C11
0.0 36.061 0.441 4.137 4.070 36.753 -2.144 -17.386 7.140 0.000 0.000
2.0 36.096 -0.271 4.488 3.439 36.688 -2.648 -17.807 7.093 0.000 0.000
4.0 36.126 -1.007 4.740 2.784 36.657 -3.176 -17.924 6.842 0.000 0.000
6.0 36.150 -1.780 4.903 2.513 36.760 -3.741 -17.870 6.357 0.000 0.000
7.9 37.169 -2.584 4.964 2.710 37.095 -4.384 -17.719 5.675 0.000 0.000
.....
.....
```

Comments:

1. 105 – number of lines
2. C1 – time (ms); C2, C3 signals FID1x and FID1y after phase detector; C4, C5 – filterd noise (x,y); C6, C7 FID1 filterd (x,y), C8, C9 – FID2 filterd (x,y); C10, C11 – SE filtered (x,y)

5. Inversion information file (*.nvi)

Site: autheuil Fe1

Loop: 4 - 56.0 Date: 27.08.2001 Time: 09:24

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\reg_centre_2001\INTERPR\auto\auth_f1.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\reg_centre_2001\MATRIX\MS856_55.MRM

loop: eight square, side = 56.0 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47260.56 nT

filtering window = 198.7 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 11.06

fitting error: FID1 = 4.28%; FID2 = 7.75 %

param. of regular.: E,T2* = 427.2; T1* = 2.000

permeability constant Cp = 7.00e-09

6. inversion results (*.nov)

```

120 160 20 324 120 120 21 324 120 8 0
40 17 55 2013.3 4 56.0
A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 A9
0.0 1.0 0.5 0.0269 30.0 0.0986 332.8 7.646767e-07 7.646767e-07
1.0 2.0 1.5 0.6623 277.3 0.7652 338.6 6.139975e-06 6.139975e-06
2.0 3.0 2.5 0.1813 1000.0 0.1887 326.4 1.407344e-06 1.407344e-06
3.0 4.0 3.5 0.1652 1000.0 0.1720 324.7 1.269105e-06 1.269105e-06
4.0 5.0 4.5 0.0774 1000.0 0.0806 326.2 6.003744e-07 6.003744e-07
5.0 6.0 5.5 0.5128 129.9 0.6974 327.0 5.219481e-06 5.219481e-06
6.0 7.0 6.5 1.3266 109.8 1.9074 321.3 1.378062e-05 1.378062e-05
7.0 8.0 7.5 2.2758 107.8 3.2938 293.6 1.987194e-05 1.987194e-05
8.0 9.0 8.5 2.9594 108.0 4.2803 234.6 1.648534e-05 1.648534e-05
9.0 10.0 9.5 3.3541 107.8 4.8547 166.4 9.408911e-06 9.408911e-06
10.0 11.0 10.5 3.5473 103.1 5.2211 90.6 3.002188e-06 3.002188e-06
11.0 12.0 11.5 3.3369 99.6 4.9778 90.6 2.861296e-06 2.861296e-06
12.0 13.0 12.5 2.7747 100.1 4.1313 90.6 2.374694e-06 2.374694e-06
13.0 14.0 13.5 2.1551 113.9 3.0584 90.6 1.758018e-06 1.758018e-06
14.0 15.0 14.5 1.7696 153.3 2.2968 90.6 1.320235e-06 1.320235e-06
15.0 16.0 15.5 1.7129 227.7 2.0424 90.6 1.174001e-06 1.174001e-06
16.0 17.0 16.5 1.9273 321.4 2.1835 90.6 1.255083e-06 1.255083e-06
17.0 18.0 17.5 2.3180 418.2 2.5515 140.8 3.540738e-06 3.540738e-06
18.0 19.0 18.5 2.8234 504.4 3.0573 203.6 8.870126e-06 8.870126e-06
19.0 20.0 19.5 3.4368 541.3 3.7014 270.1 1.890415e-05 1.890415e-05
20.0 21.0 20.5 4.1745 509.7 4.5166 341.5 3.688016e-05 3.688016e-05
21.0 22.0 21.5 5.0533 436.5 5.5400 411.2 6.558298e-05 6.558298e-05
22.0 23.0 22.5 6.0798 358.5 6.7996 471.7 1.058916e-04 1.058916e-04
23.0 24.0 23.5 7.2408 294.0 8.2988 520.4 1.572965e-04 1.572965e-04
24.0 25.0 24.5 8.5088 245.1 10.0199 550.4 2.124691e-04 2.124691e-04
25.0 26.0 25.5 9.8407 209.5 11.9137 554.7 2.566153e-04 2.566153e-04
26.0 27.0 26.5 11.1858 182.5 13.9286 539.8 2.841118e-04 2.841118e-04
27.0 28.0 27.5 12.4912 164.3 15.9331 517.3 2.985071e-04 2.985071e-04
28.0 29.0 28.5 13.7099 151.3 17.8536 483.4 2.920196e-04 2.920196e-04
29.0 31.9 30.4 14.7989 142.1 19.6046 435.0 2.596870e-04 7.426145e-04
31.9 35.8 33.8 15.3689 138.7 20.4977 368.5 1.948879e-04 7.593531e-04
35.8 40.1 37.9 15.2053 142.9 20.1121 286.0 1.151836e-04 5.036834e-04
40.1 45.0 42.6 14.5077 153.7 18.8153 210.6 5.839470e-05 2.865817e-04
45.0 50.5 47.8 13.5971 169.7 17.2118 146.1 2.570575e-05 1.415837e-04
50.5 56.7 53.6 12.7380 188.2 15.7570 90.6 9.057242e-06 5.598698e-05
56.7 63.7 60.2 12.0619 207.9 14.6239 90.6 8.405950e-06 5.831576e-05
63.7 71.4 67.6 11.5970 222.8 13.8812 90.6 7.979030e-06 6.212369e-05
71.4 80.2 75.8 11.3145 232.7 13.4403 90.6 7.725590e-06 6.750670e-05
80.2 90.0 85.1 11.1677 238.1 13.2144 90.6 7.595758e-06 7.448938e-05
90.0 100.0 95.0 11.1140 239.9 13.1340 90.6 7.549499e-06 7.554063e-05

B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12 B13 B14 B15 B16 B17 B18 B19
85.565 36.793 36.649 293.254 2012.8 15.891 9.8 27.69 2.81 635.8 81.4 16.787 548.67 36.649 25.622 278.3 18.420 36.793 16.787
148.140 69.597 60.293 179.384 2013.1 30.888 12.6 43.41 3.44 560.7 141.0 46.360 304.73 60.293 42.602 272.6 27.848 69.597 46.360
242.448 80.432 93.205 384.119 2013.0 17.081 10.3 63.82 6.21 450.9 230.9 83.235 90.62 93.205 66.062 271.0 36.230 80.432 83.235
333.789 122.262 124.180 220.400 2013.3 29.679 13.7 81.70 5.95 469.0 318.2 97.791 207.80 124.180 88.278 269.4 38.760 122.262 97.791
    
```

469.489 174.206 166.237 147.491 2013.4 36.128 9.4 98.39 10.47 595.2 448.2 110.123 334.26 166.237 118.502 267.9 56.259 174.206
 110.123
 622.301 199.664 205.081 155.018 2012.9 31.444 13.2 114.72 8.71 641.8 594.1 113.969 395.20 205.081 146.408 267.1 62.932 199.664
 113.969
 835.939 248.435 246.287 219.694 2012.8 21.690 19.4 165.25 8.51 619.3 799.5 200.717 202.61 246.287 175.845 267.1 90.250 248.435
 200.717
 1104.644 290.897 281.221 164.392 2013.0 33.030 16.0 170.70 10.70 658.4 1056.1 187.903 321.95 281.221 198.238 273.9 100.378 290.897
 187.903
 1445.780 300.896 310.193 190.083 2013.1 38.877 14.2 188.56 13.24 524.6 1383.5 237.258 215.17 310.193 213.419 287.0 109.646 300.896
 237.258
 1879.500 329.822 339.251 186.772 2013.1 38.045 19.2 205.11 10.67 363.8 1799.0 231.249 276.77 339.251 227.181 301.8 123.128 329.822
 231.249
 2438.049 344.052 362.949 204.568 2012.9 41.393 7.5 222.22 29.71 441.9 2337.8 225.459 313.85 362.949 244.502 298.5 151.273 344.052
 225.459
 2446.275 396.087 363.108 156.658 2013.0 38.380 17.1 226.85 13.26 668.9 2344.8 229.156 386.87 363.108 244.700 298.3 134.049 396.087
 229.156
 3127.773 360.636 366.985 181.926 2013.2 44.501 17.1 221.74 12.96 398.3 3022.4 263.204 255.42 366.985 257.314 276.8 137.383 360.636
 263.204
 3859.701 360.372 356.014 153.963 2013.2 43.476 7.7 204.97 26.53 475.0 3791.5 283.223 216.87 356.014 263.663 247.7 141.762 360.372
 283.223
 4727.382 341.429 335.336 165.862 2013.0 43.070 15.1 201.38 13.35 518.6 4692.3 257.328 238.58 335.336 264.270 215.5 135.570 341.429
 257.328
 5748.208 314.423 310.501 172.178 2012.9 38.806 14.2 188.71 13.32 559.2 5745.0 251.280 208.23 310.501 258.568 186.9 140.591 314.423
 251.280
 6966.212 275.470 287.611 192.292 2013.1 45.297 18.4 174.08 9.44 323.4 7004.0 254.760 129.17 287.611 248.880 166.7 135.545 275.470
 254.760

Comments :

1. line 1 – timing (like files *.0)
2. line 2 – 40 – number of layers; 17 – number of Q values; 55 – inclination of the geomagn. Field (matrix); 20133 – kampl; 4 – antenna type; 56 – antenna size
3. A1 depth from(m); A2 – depth to (m); A3 – depth centre layer (m); A4 – water content non-extrapolated (%); A5 – T2* (ms); A6 – water content extrapolated (%); A7 – T1 (ms); permeability (m/s) for this layer; a8 – transmissivity (m²/s) for this layer.
4. B1 – first pulse parametr Q; B2 – FID1 amplitude; B3 – FID1 reconstructed after inversion; B4 – T2* for FID1; B5 – freq FID1; B6 – phase FID1; B7 – mean noise (nV); B8 – mean sign FID1; B9 – signal to noise ration (B8/B9); B10 – amb. noise (nV); B11 – second pulse Q2; B12 – amplitude FID2; B13 – T1 (ms); B14 – reconstructed FID1; B15 – reconstructed FID2; B16 – reconstructed T1; B17 – mean amplitude FID2; B18 – amplitude FID1; B19 – FID2 model.

