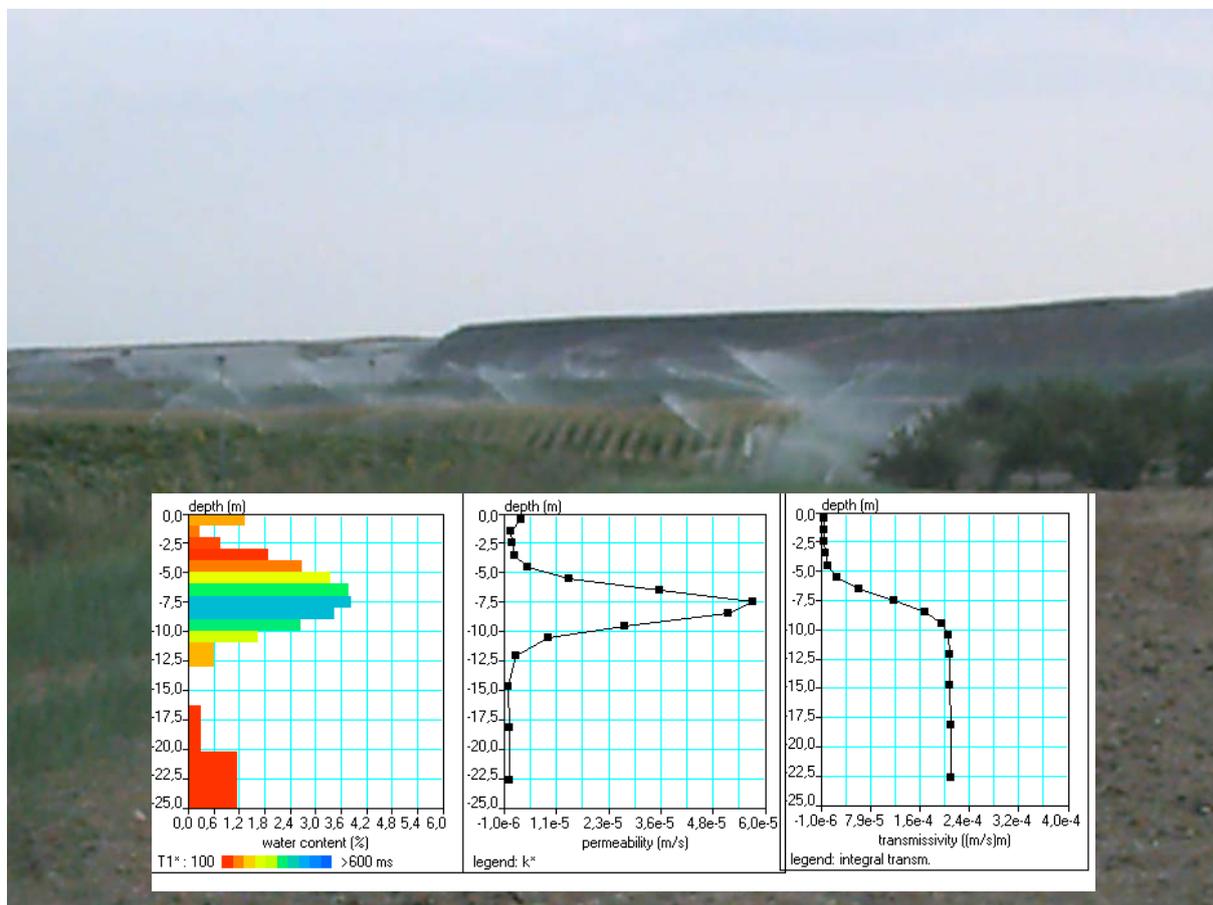


**PROYECTO  
EVALUACIÓN IMPACTO AGRO-AMBIENTAL POR LA TRANSFORMACIÓN  
EN RIEGO Y EFICACIA DEPURADORA DE HUMEDALES**

**EIA-TRANSRIEGO**



**INFORME SOBRE LOS SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA  
EFECTUADOS EN EL BARRANCO DE LERMA (ZARAGOZA). 2011-2012.**

Juan Luís Plata Torres



**Grupo de Geofísica del IGME  
Tres Cantos  
Marzo 2012**



**GOBIERNO  
DE ESPAÑA**

**MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD**



**Instituto Geológico  
y Minero de España**



**PROYECTO  
EVALUACIÓN IMPACTO AGRO-AMBIENTAL POR LA TRANSFORMACIÓN  
EN RIEGO Y EFICACIA DEPURADORA DE HUMEDALES**

**EIA-TRANSRIEGO**

**INFORME SOBRE LOS SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA  
EFECTUADOS EN EL BARRANCO DE LERMA (ZARAGOZA). 2011-2012.**

**Juan Luis Plata Torres**

**Grupo de Geofísica del IGME  
Tres Cantos  
Marzo 2012**



## ÍNDICE

- 0. Resumen y conclusiones**
- 1. Introducción**
- 2. El método de Sondeos de Resonancia Magnética SRM**
  - 2.1 Fundamentos de la teoría y medición de los SRM**
  - 2.2 Interpretación de los datos de campo de un SRM**
  - 2.3 Presentación de los resultados**
  - 2.4 Determinación de la permeabilidad**
  - 2.5 Aspectos concernientes al diseño de las antenas**
    - 2.5.1 Mejora de la relación Señal/Ruido**
    - 2.5.2 Dimensiones de la antena y resolución**
    - 2.5.3 Circuito de resonancia de la antena**
- 3. Planificación y ejecución de los trabajos de campo en el barranco de Lerma**
  - 3.1 Instrumentación utilizada**
  - 3.2 Equipo de trabajo**
  - 3.3 Medición de los SRM**
- 4. Análisis de los datos de campo**
- 5. Conclusiones del análisis**
- 6. Calculo de las matrices para el proceso de inversión**
- 7. Criterios para efectuar la inversión de los datos de campo**
  - 7.1 Criterios de calidad y resolución**
  - 7.2 Alcance de la inversión de los SRM**
- 8. Inversión e interpretación**
- 9. Conclusiones sobre el registro y la inversión**
  - 9.1 Presencia de la señal del agua en los datos registrados**
  - 9.2 Interpretación cuantitativa y cualitativa**
  - 9.3 Reproceso con SAMOVAR v11**
- 10. Cálculo de la permeabilidad en los SRM L2 y SRM L27**
  - 10.1 Utilizando los datos de los SRM procesados por Samovar v6**
  - 10.2 Utilizando los datos de los SRM procesados por Samovar v11**
- 11. Verificación con los resultados de ensayos de bombeo**
  - 11.1 Comparación de valores obtenidos**
  - 11.2 Verificación de la diferencia**

## **ANEXO de FICHEROS DIGITALES (EN CD)**



## 0. Resumen y conclusiones

Para establecer un modelo hidrogeológico del Barranco de Lerma (Zaragoza) es necesario conocer sus propiedades hidráulicas. Con este objetivo se ha utilizado el método geofísico de Sondeos de Resonancia Magnética (SRM), que permite evaluar la porosidad y permeabilidad de un acuífero mediante mediciones efectuadas en la superficie. La posibilidad de detectar el agua del subsuelo mediante SRM está limitada por razones instrumentales (umbral de amplitud de la señal y tiempo de respuesta), por la cantidad de agua existente en el subsuelo y por el tipo de litología. El ruido electromagnético externo y rocas de alta susceptibilidad magnética pueden impedir o distorsionar la señal. La interpretación cuantitativa de los resultados sólo es posible cuando los datos de campo no están distorsionados por el ruido.

El objetivo de esta prospección es detectar la presencia de capas de glacia saturadas de 0.5 a 4 m de potencia, con un nivel freático del orden de 3 a 5 m, estando la base impermeable constituida por arcillas muy conductoras a los 5 a 9 m de profundidad. La poca profundidad y potencia del acuífero investigado hace que el diseño de los parámetros de adquisición de los SRM sea especialmente crítico. Para ello se efectuaron numerosos ensayos, con la conclusión de que no ha sido posible diseñar una antena de las dimensiones más adecuadas para la profundidad de investigación, debido principalmente a la incompatibilidad de la capacidad de los condensadores del instrumento para formar un circuito de resonancia. Por lo tanto se optó por utilizar una antena formada por dos cuadrados conectados en ocho de 30 m de lado; con esta dimensión sigue siendo posible obtener una resolución métrica dentro de la profundidad de investigación, y detectar tanto el nivel freático como la base del acuífero.

Se han medido 9 SRM, tres de ellos junto a piezómetros (P4, P10 y P11), siendo los datos de campo de todos ellos de mala calidad, de tal forma que el resultado es de imposible interpretación cuantitativa en la mayoría de los emplazamientos. El ruido electromagnético exterior existente no justifica que no se haya recuperado bien la señal de resonancia. Sólo la existencia de muy poca cantidad de agua (porosidad muy pequeña) y/o una matriz muy arcillosa pueden justificar valores tan bajos de amplitud de la posible señal y/o de tiempos tan cortos de relajación en los registros de campo. La dispersión observada de la frecuencia pudiera también ser una indicación de la presencia de minerales magnéticos en los sedimentos en alguna de las mediciones.

Se ha efectuado un riguroso análisis de los datos de campo, con el objetivo de identificar si se ha recibido la señal del agua y validar la calidad de los registros. El criterio adoptado es

que la amplitud de la señal sea superior a la del ruido, y que además presente carácter de decaimiento exponencial en todo o en parte del tiempo registrado, además de la coherencia en las variaciones de frecuencia, fase y amplitud de los valores medidos en función del momento de excitación. El análisis pone de manifiesto que sólo en los sondeos L2, L27, L48 y L8 es claramente visible que la señal es superior al ruido y tiene decaimiento exponencial; en el resto es más dudoso, y en cualquier caso existiría con tiempos de relajación inferiores a 150 ms. Las curvas de sondeo  $E_0(q)$  son en general amorfas, con excepción de las obtenidas para los SRM P10, P11, L2 y L27. A esta falta de morfología puede contribuir el que el apilamiento de pulsos efectuado no sea el mismo para todos los momentos de excitación. La amplitud máxima  $E_0$  es en general inferior a 20 nV, e incluso del orden de 10 nV (umbral de ruido instrumental) en algunos sondeos. Este bajo valor, aunque viene en parte condicionado por las dimensiones de la antena, es sin duda atribuible a un bajo contenido en agua dentro del volumen de investigación. La frecuencia presenta una gran oscilación de un pulso de excitación a otro, con desviaciones respecto de la de resonancia que llegan a ser hasta de 5 Hz para los SRM L12, L2, L27, L19 y L48 y de 10 Hz para el resto. Esta oscilación de la frecuencia se refleja netamente en los espectros FFT de las señales  $e(t)$ , indicando que aún en los casos en los que es más clara la existencia de señal resonante, ésta presenta cierto carácter multifrecuencial. Un análisis de las frecuencias emitidas y recibidas, permite concluir que una variación superior a 5 Hz entre la frecuencia de Larmor y la frecuencia de la señal registrada puede considerarse como evidencia de que no existe resonancia porque no se ha detectado la presencia de agua (ausente o en cantidad inferior a la detectable).

De los resultados de este análisis cabe deducir que se dan una serie de circunstancias que no favorecen la detectabilidad de la señal de resonancia: poca cantidad de agua, posibles tiempos de relajación inferiores a 100-150 ms (baja permeabilidad) y existencia de materiales con susceptibilidad magnética media-alta (variación de frecuencias). Para ratificar este análisis se ha llevado a cabo un proceso de datos mediante la aplicación Samovar v.6, que permite la utilización de filtros para mejorar las curvas de campo  $e(t)$ , así como verificar si la limitación del tiempo para el ajuste de una exponencial proporciona mejores valores del tiempo de relajación y sobre todo de la amplitud máxima inicial  $E_0$ .

Según los diversos criterios utilizados, tanto en el análisis de los datos brutos de campo, como tras su proceso de inversión, puede aceptarse el resultado cuantitativo de la inversión como una aproximación a la realidad para el SRM L2 y en menor medida para el SRM L27. Para ambos se obtienen curvas  $E_0(q)$  con una morfología coherente y valores de señal superiores al ruido para los primeros pulsos. El modelo hidrogeológico obtenido coincide

bien con los datos conocidos a partir de los SEV, presentando un tiempo de relajación  $T_1$  nulo en la zona donde se conoce que se encuentran las arcillas. La capa saturada tiene un tiempo de relajación  $T_1$  del orden de 400 ms, lo que indica la presencia de materiales tipo arenas-gravas gruesas, con una porosidad del 3-5 %, siendo inferior en el SRML2. Los SRM L2 y L27 se han procesado también con una nueva versión de la aplicación utilizada, que permite una mejor selección de parámetros, con la conclusión de que la inversión que resulta de mayor fiabilidad es la del SRM L27. El resto de las mediciones sólo pueden interpretarse de forma cualitativa.

De los ensayos realizados junto a piezómetros son nulos los SRM P10 y P11. El modelo obtenido para el SRM P4 indica la presencia de agua a las profundidades esperadas y una capa totalmente impermeable bajo el acuífero, pero ni los valores de porosidad y ni del tiempo de relajación son fiables, por lo que queda descartada la posibilidad de utilizar los ensayos de bombeo como método para la calibración de los SRM, que además no podría trasladarse nada más que al SRM L2 y L27.

Es más fiable desde el punto de vista cualitativo la inversión de los SRM L12, L19, L48 y L8, indicando porosidades bajas, del orden de 1-4%?, y tiempos de relajación correspondientes a granulometrías gruesas (de 200-400 ms ?), excepto en la localización del SRML48, donde la arcillosidad sería elevada (tiempo de 50 ms?). Lo más evidente de estos SRM es la aceptable morfología de los modelos obtenidos para la distribución del agua y tiempo de relajación con la profundidad, que se corresponde muy bien con la indicada por los SEV. Esta circunstancia resulta notable, dada la mala calidad de los datos de campo. El que exista sólo esta pequeña cantidad de agua puede explicar la baja amplitud de la señal y la calidad de los resultados obtenidos. En todos los casos la aparente detección de un acuífero inferior es fruto de la falsa amplitud de la señal para armónicos superiores.

El cálculo de transmisividad se ha efectuado para el SRM L2 y SRM L27 utilizando el sistema directo o de autocalibración, basado en el valor del parámetro  $F=wT^2z$  ( $w$ : porosidad,  $T$ : tiempo de relajación y  $z$ : potencia del acuífero) obtenido del modelo de inversión del SRM. Se ha tomado como zona saturada el tramo de porosidad superior al 2%, con un máximo del orden del 4 %, y potencias del orden de los 5-6 m, lo que arroja un valor de  $F$  bajo. El coeficiente de calibración correspondiente a estos valores de  $F$  es  $C_p=1.5 \times 10^{-6}$  y una permeabilidad del orden de 400-900 m/día ( $5-10 \times 10^{-3}$  m/s).

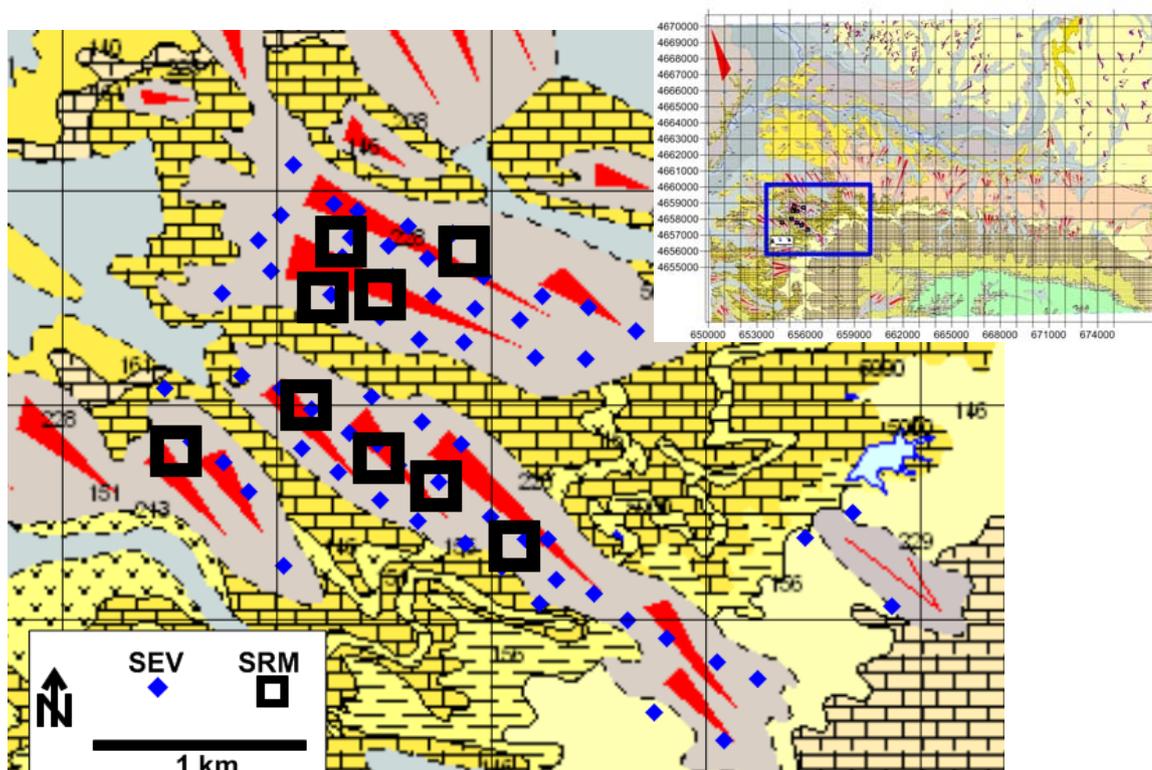
Sin embargo, los valores de transmisividad medidos en ensayos de inyección y de bombeo en todos los piezómetros de la zona están en el rango  $1.8 \times 10^{-5}$  a  $1.3 \times 10^{-4}$  m/s. Un detallado

estudio del método de autocalibración permite explicar la anomalía encontrada; por una parte, en los acuíferos utilizados para desarrollar el método se encontró una relación de correspondencia directa entre la transmisividad (medida en ensayos de bombeo) y el coeficiente de calibración de los SRM, de tal forma que el valor de  $C_p=1.5 \times 10^{-6}$  resulta efectivamente muy superior al que correspondería según la baja transmisividad existente en este acuífero. Por otra parte, se ha encontrado así mismo (con excepciones) una correspondencia entre altos valores del parámetro F y baja transmisividad, porque en los acuíferos de baja permeabilidad hasta ahora estudiados se da la circunstancia de ser de gran potencia y porosidad; esta regla no se cumple en el acuífero de Lerma, ya que debido a su poca potencia y bajo contenido en agua presenta bajos valores de F. En consecuencia, el procedimiento de cálculo que hay que utilizar en este caso consiste en aplicar la función de ajuste deducida para altos valores del parámetro F (en general asociados a baja permeabilidad) en vez de la correspondiente a los bajos valores encontrados en el Barranco de Lerma. De esta manera los valores obtenidos por autocalibración SRM están en el rango  $2.5 \times 10^{-4}$  a  $3.2 \times 10^{-4}$  m/s (2.2 a 2.8 m/d), completamente análogos a los medidos. En definitiva, este ensayo confirma que siempre es necesario controlar los resultados geofísicos con otro tipo de determinaciones.

## 1. Introducción

Uno de los objetivos del Proyecto “Evolución del impacto agro-ambiental por la transformación en riego y eficacia depuradora de humedales” (EIA-TRANSRIEGO), englobado dentro del Proyecto CGL2009-13410-C02-01 del Plan Nacional de Investigación Científica ejecutado por el IGME, es calibrar y validar modelos hidrogeológicos acoplados de flujo que permitan simular la respuesta hidrogeológica del sistema a eventos hidroclimáticos (precipitación y evotranspiración) y de origen antropogénico (riego y fertilización).

La zona de estudio es la puesta en regadío dentro del denominado Barranco de Lerma (Zaragoza) (Figura 1.1), con unos 9 km<sup>2</sup> de extensión. Está formada por un sustrato impermeable del Mioceno Inferior de margas, calizas margosas y lutitas, de varios centenares de metros de potencia, sobre la que reposa un glacis del Holoceno-Pleistoceno, que forma conos de deyección, compuesto por cantos, gravas calcáreas, arenas, limos y arcillas, con potencia máxima inferior a unos 10 m. El glacis constituye el acuífero, que drena en sus contactos con el Mioceno, y cuya recarga fundamental es el agua de riego, de tal forma que el nivel freático es mayor en la época estival que en invierno, de acuerdo con el control efectuado en la red de piezómetros disponible.



**Fig. 1.1** Zona del Barranco de Lerma sobre el Mapa geológico de Geode (IGME), con indicación de su posición dentro de la hoja 50.000 Ejea de los Caballeros nº 284. Se indica la posición de los SEV medidos en 2010 y los SRM medidos en 2011.

Para el establecimiento del modelo hidrogeológico es necesario determinar la geometría del acuífero y sus propiedades hidráulicas, para lo que se va a utilizar el apoyo de técnicas geofísicas. La geometría (variación de potencia del glacis) ha sido estudiada mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) [*Informe sobre la determinación de la potencia de glacis en el barranco de Lerma (Zaragoza) mediante SEV, 2011*], dado el gran contraste de resistividad existente en esta zona entre los materiales permeables e impermeables; para la determinación de la porosidad y permeabilidad se han utilizado los Sondeos de Resonancia Magnética (SRM), método de probada eficacia en este tipo de determinaciones. Mientras que los SEV es conveniente efectuarlos en época de bajo o nulo nivel freático a fin de poder diferenciar correctamente el paso de materiales resistivos (glacis no saturado) a conductores (arcillas de base), el método SRM sólo puede ser empleado cuando el acuífero tiene la mayor cantidad de agua. Por esta razón las campañas de toma de datos en campo se han efectuado en épocas diferentes: la de SEV se llevó a cabo de octubre de 2010 a febrero de 2011, mientras que los SRM se han medido en agosto de 2012.

Para una zona de las dimensiones de la considerada, sería probablemente suficiente con la medición de dos o tres sondeos; sin embargo, dado el grado de detalle con el que está definido el presente Proyecto se tratará de obtener una información de la mayor cobertura posible, a fin de que pueda deducirse el grado de homogeneidad del acuífero.

## 2. El método de Sondeos de Resonancia Magnética SRM

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 investigación hidrogeológica, ya que permite detectar la presencia de agua libre en el subsuelo mediante mediciones efectuadas en la superficie. 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 (Tiempo de relajación de la señal medida) relacionado con el tamaño de los poros de la formación y su permeabilidad.

Una característica especial del trabajo realizado en el Barranco de Lerma es la poca profundidad del acuífero, lo que repercute de forma importante en el diseño de los parámetros de adquisición de datos; por esta razón, además de incluir en este capítulo una síntesis de las bases teóricas y de la metodología para la medición e interpretación de los SRM, se hará una descripción más detallada de cuestiones relativas al diseño de las antenas y a la sintonía con la denominada señal del agua.

### 2.1 Fundamentos de la teoría y medición de los SRM

Este método se basa en que toda partícula atómica puede variar su estado energético cuando es excitada por un campo electromagnético de una determinada frecuencia, exclusiva para cada elemento y partícula atómica. Dicha frecuencia, denominada de precesión de Larmor  $f_L$ , 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. [fuerza electromotriz en nano Voltios, nV] con un decaimiento exponencial característico, que se denomina señal de resonancia  $e(t)$  o señal del agua. Otra forma de explicar este fenómeno es el modelo vectorial, en el que el campo electromagnético de excitación cambia la orientación de los momentos magnéticos de los protones de hidrógeno, inicialmente orientados en dirección del campo magnético terrestre; al cesar la excitación dichos momentos tienden a recuperar su orientación, girando con la frecuencia de precesión de Larmor, lo que genera la señal  $e(t)$ .

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 excitar a los protones de hidrógeno. La señal de resonancia  $e(t)$  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.

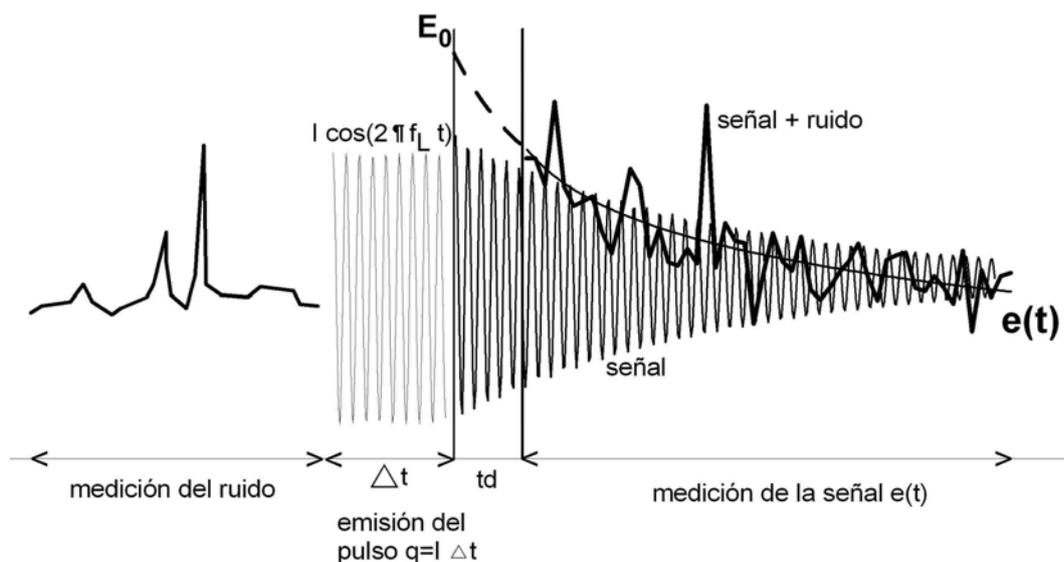
Para hacer un SRM, se comienza por medir con un magnetómetro la intensidad de campo magnético terrestre  $B$ , a fin de calcular la frecuencia de precesión de los protones de hidrógeno en ese sitio mediante la ecuación  $f_L = 0.04258 B$ . Una variación del campo magnético de 20 nT produce una variación de 1 Hz en la frecuencia de resonancia. 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 intensidad  $I$  durante un corto tiempo  $\Delta t$  (pulso de excitación de momento  $q = I \Delta t$ , medido en A.ms [Amperio por milisegundo]), creando un campo electromagnético 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 o energía adquirida 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 el movimiento de 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 una exponencial (Figura 2.1) de la forma

$$e(t) = E_0 \cos(2\pi f_L t + \varphi) e^{-t/T_2^*}$$

siendo  $\varphi$  el desfase entre la frecuencia del campo de excitación y el de resonancia, que depende de la resistividad eléctrica de los terrenos.

Antes de emitir el pulso se mide el ruido ambiental (Figura 2.1), y tras el pulso se precisa de un tiempo  $t_d$  para la conmutación de los circuitos, de tal forma que la antena pase de ser emisora a receptora. La intensidad máxima (inicial o valor extrapolado para  $t=0$ )  $E_0$  de esta f.e.m. inducida depende de la cantidad de protones presentes o cantidad de agua. El tiempo  $T_2^*$  (constante de tiempo de decaimiento o tiempo de relajación transversal) que tarda en amortiguarse la señal depende del tamaño medio de los poros donde está contenida el agua, de tal forma que es corto para las arcillas y largo para las gravas sueltas; no obstante,

el tiempo de relajación también depende de la susceptibilidad magnética de las rocas y de su mineralogía, por lo que no existe una relación universalmente válida. No resultarán detectables con la instrumentación NUMIS señales  $e(t)$  cuya amplitud sea inferior al umbral de ruido instrumental (unos 10 nV) o cuyo tiempo de relajación sea inferior al tiempo  $t_d$  de conmutación (unos 40 ms).



**Fig. 2.1** Secuencia de la medición de señales de resonancia en un SRM.

Si antes de que se amortigüe la señal debida al primer pulso se emite un segundo pulso del mismo momento, la amplitud máxima de f.e.m. obtenida para cada pulso y el intervalo de tiempo entre ambos permiten evaluar un segundo tiempo de decaimiento o de relajación longitudinal  $T_1$ ; el tiempo de relajación  $T_1$  está también relacionado con el tamaño medio de los poros, pero con menor dependencia de la heterogeneidad del campo magnético terrestre, por lo que es más efectivo para deducción de la permeabilidad de la formación. Desde el punto de vista instrumental, la emisión de este segundo pulso exige disponer de dos unidades de convertidores y una mayor duración del tiempo de registro. A la señal registrada con el primer pulso se la denomina FID1 (Free Induction Decay 1) y a la del segundo pulso FID2. 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 emitido, por lo que para obtener información a mayor profundidad, se emite un nuevo pulso con mayor intensidad de corriente, y así sucesivamente (Figura 2.2). 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 (o lado del cuadrado, si se emplea esta

forma). 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 porosidad y la permeabilidad de una formación son parámetros dependientes 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. en función del tiempo producidas por la excitación de cada pulso de momento  $q$  emitido (en la Figura 2.2 sólo se presentan 10 de estas curvas, por simplificación; en una secuencia estándar se utilizan 16 pulsos). Los valores  $e(t)$  se registran en  $n$  ficheros data.0q, correspondientes a los  $n$  pulsos utilizados, además de recogerse en un fichero binario NumisBin.mrs. En el mismo instrumento de medición se efectúa un primer cálculo del valor máximo inicial  $E_0$  y del tiempo de relajación  $T_2^*$  utilizando todo el tiempo de registro de cada señal; estos valores quedan recogidos en un fichero denominado data.inp. Las funciones  $E_0(q)$  y  $T_2^*(q)$  son el resultado final del proceso de medición. Si se ha medido con dos pulsos por momento, se obtiene además una función  $T_1(q)$ .

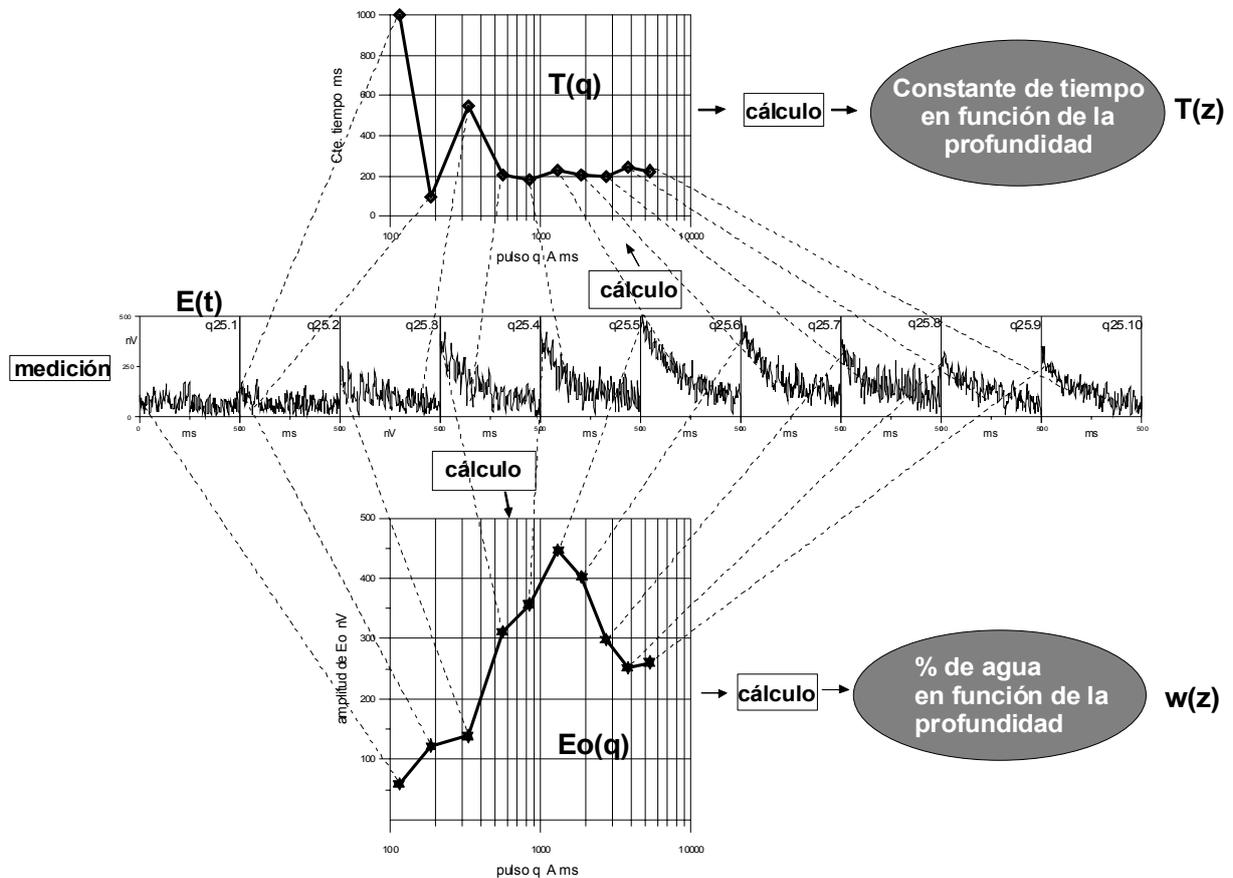
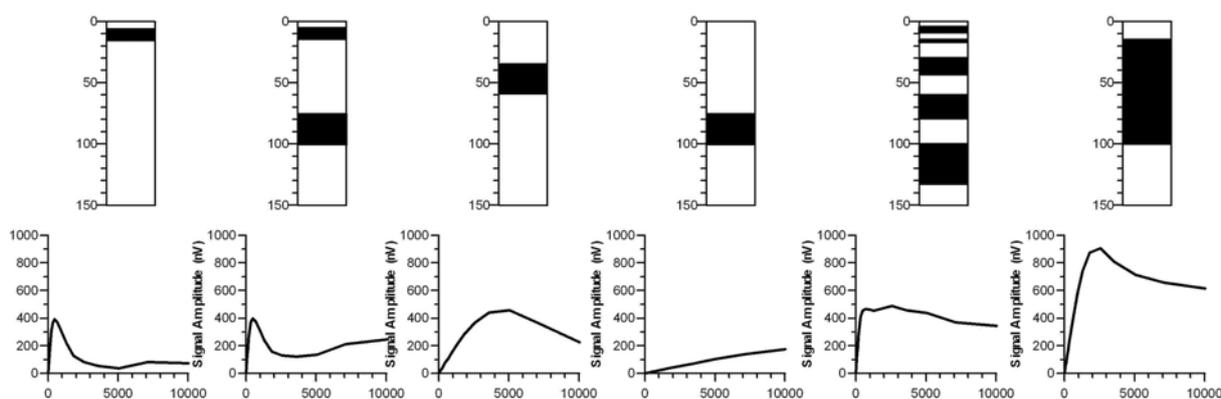


Fig. 2.2 Esquema de la secuencia para el registro y elaboración de los datos de un SRM.

## 2.2 Interpretación de los datos de campo de un SRM

Los datos de campo  $e(t)$  y  $E_0(q)$  permiten efectuar un primer análisis e interpretación cualitativa de los resultados de un SRM. La variación de la amplitud de la señal  $e(t)$  entre emplazamientos es una indicación de variación de contenido en agua o porosidad; el tiempo de relajación es una indicación de la granulometría y posible permeabilidad. 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 2.3. Cuanto más somero está el nivel freático, menor es el momento del pulso para el que se obtiene el máximo de la curva; cuanto más potente es la capa de agua, durante más pulsos se obtendrá la señal de resonancia, de tal forma que si el nivel impermeable se situara por debajo de la profundidad de investigación según las dimensiones de la antena utilizada y valores máximos del momento de excitación, la curva  $E_0(q)$  será abierta.



**Fig. 2.3 Diferente morfología de la curva  $E_0(q)$  resultado de un SRM según la profundidad y potencia del acuífero.**

La inversión de los datos de campo consiste en convertir los valores  $E_0(q)$  y  $T(q)$  en la distribución en función de la profundidad  $z$  del tanto por ciento de agua  $w(z)$  (porosidad), de  $T_2^*(z)$  y de  $T_1(z)$  (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 es 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  $\Delta z$  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  $w(z)$  de cada tramo.

El proceso de inversión de los datos de campo consta de dos fases:

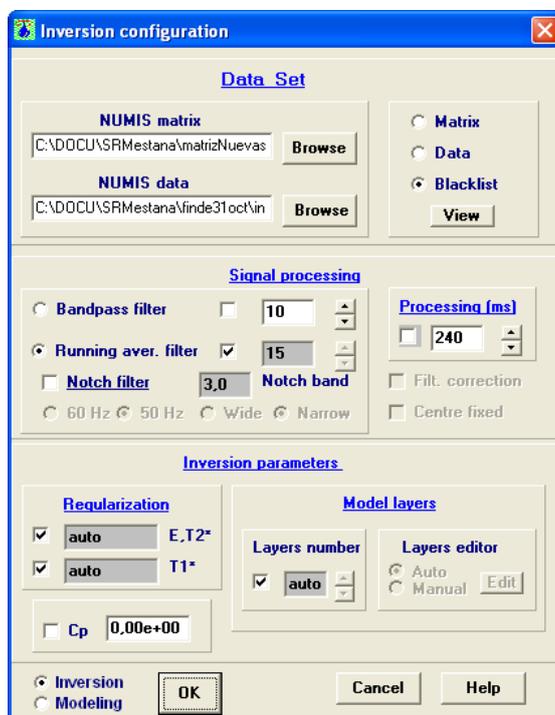
1/ obtención de los valores  $E_0$ ,  $T_2^*$  y  $T_1$  a partir de las curvas  $e(t)$ , para cada pulso de emisión de momento  $q$  A.ms, utilizándose para ello todo o parte del tiempo de registro efectuado.

2/ conversión de las funciones  $E_0(q)$ ,  $T_2^*(q)$  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 la calidad de los valores medidos y de los parámetros seleccionados en el proceso de cálculo (Figura 2.4), 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  $E_0$ ,  $T_2^*$  y  $T_1$  a partir de las curvas  $e(t)$  (contenidas en los ficheros data.0q), proporcionando las correspondientes funciones  $E_0(q)$ ,  $T_2^*(q)$  y  $T_1(q)$  (ficheros con extensión denominada .inp e .in2). Estos valores son brutos, se refieren a la longitud total de tiempo registrado sin aplicar a las medidas más filtros que los propios del proceso analógico de detección síncrona de la señal.
- en la fase de proceso se parte de nuevo de los valores  $e(t)$ , pero antes de calcular  $E_0$ ,  $T_2^*$  y  $T_1$  se someten a un filtrado digital, con la finalidad de eliminar el ruido en la medida de lo posible, así como pudiendo limitar el cálculo a parte del tiempo registrado 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 tienden a ser los valores de  $E_0$  y en ocasiones, puede disminuir el valor de  $T_2^*$



**Fig. 2.4** Consola de entrada de datos y parámetros de proceso en la inversión de un SRM mediante el programa SAMOVAR 6.2.

Un filtro opcional es el tipo 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 está 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.

Otros parámetros del proceso de inversión son: 1/ el tiempo seleccionado para el proceso de la señal  $e(t)$ , que puede ser distinto del tiempo de registro; si se aprecia que el tiempo de relajación es muy inferior al de registro, los valores registrados al final contribuirían a distorsionar los resultados. 2/ el parámetro o factor de regularización; 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). 3/ El número de capas. Al igual que el parámetro de regularización, afecta 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  $7 \times 10^{-09}$ . 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 varios SRM). El sistema de proceso también permite eliminar alguna de las mediciones  $E_0$  que hayan resultado muy influenciadas por el ruido.

### 2.3 Presentación de los resultados

Los resultados de la medición e inversión de cada SRM se presentan de forma numérica y gráfica. Se generan  $q$  ficheros tipo data.fq, para los  $q$  momentos de excitación, con los nuevos valores de las curvas  $e(t)$  filtradas, así como un fichero (data.nov) con los resultados del modelo (profundidad, potencia, porosidad, tiempos de relajación, permeabilidad y transmisividad de cada capa). Los gráficos que se van a emplear en este estudio son los siguientes:

- Curvas  $e(t)$  [nV-ms] para cada pulso de momento  $q$ . En la presentación estándar del programa SAMOVAR se añade 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. Las curvas están organizadas desde el primero al último pulso emitido empezando por la parte inferior del gráfico (Figura 2.5, NUMIS signals).
- Curvas  $E_0(q)$  [nV-A.ms], 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 2.5, FID1)
- Curvas  $T_2^*(q)$  y/o  $T_1(q)$  [ms-A.ms](Figura 2.5)

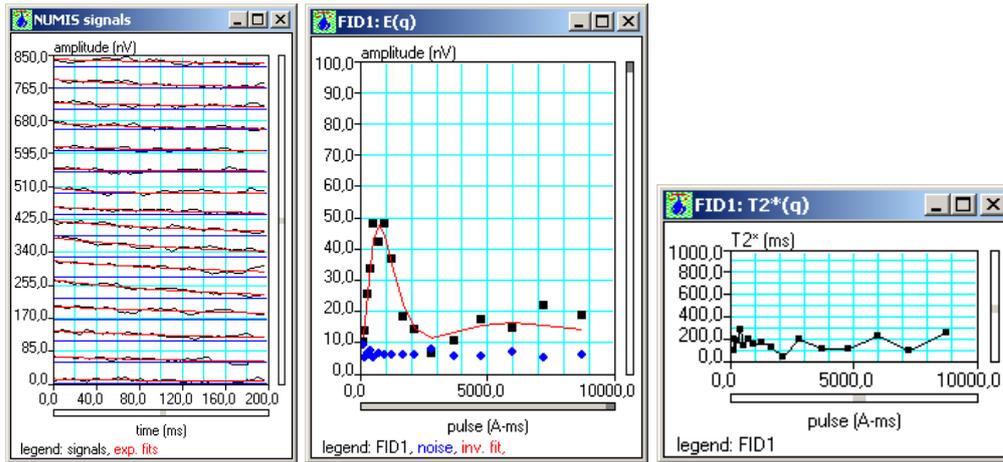


Fig. 2.5 Curvas  $e(t)$ ,  $E_o(q)$  y  $T_2^*(q)$ .

- Curvas de **ruido ambiental** en función del momento  $q$  aplicado [nV-A.ms] (Figura 2.6, ambient noise)
- Curvas de **frecuencia(q)** en Hz [Hertzios-A.ms] y **fase(q)** [grados-A.ms]. Dan indicación de la calidad de las mediciones. (Figura 2.6).

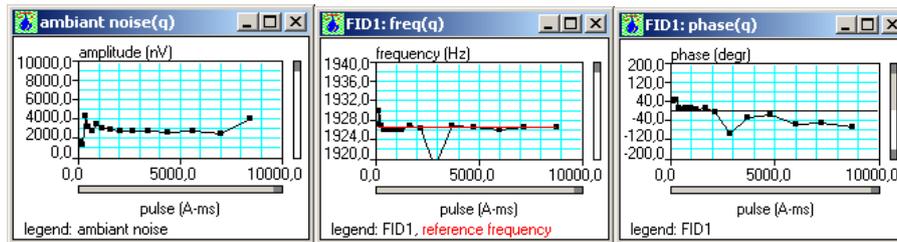


Fig. 2.6 Funciones de variación del ruido ambiental, frecuencia y fase en función del pulso  $q$ .

- Gráfico de distribución de valores de porosidad o contenido en agua  $w(z)$  en %, con escala superpuesta de color indicativa del valor del parámetro  $T_1$  en ms de cada capa del modelo. Si no se ha medido con dos pulsos por momento, sólo se calcula la constante de tiempo  $T_2^*$  (Figura 2.7).

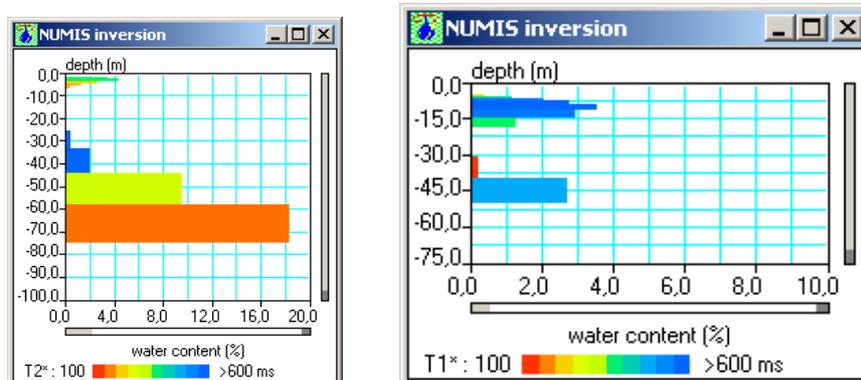


Fig. 2.7 Ejemplos de funciones  $w(z)$  resultado de la inversión en dos SRM medidos con uno y dos pulsos por momento.

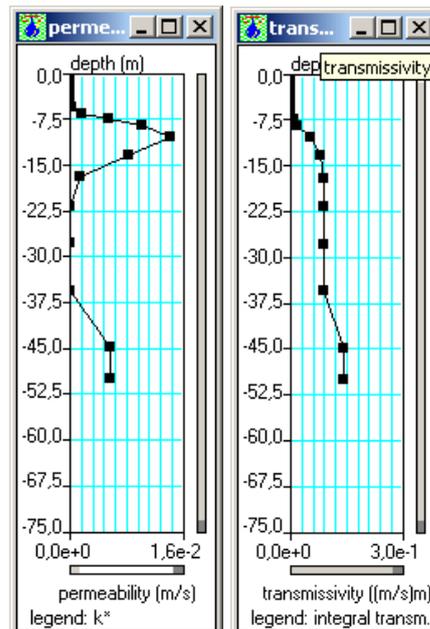
En la Tabla 2.1 se indica la relación empírica entre el valor de  $T_2^*$  y la litología (tamaño medio de los poros), y a su vez con  $T_1$  (supuesto que vale aproximadamente  $1.5 T_2^*$ ). Se indica también la gama de colores de representación que corresponde a cada tiempo en la representación  $w(z)$ . En el uso de esta información debe tenerse en cuenta que se trata de valores generales no calibrados expresamente para la zona de trabajo.

<i>relación entre valores de los tiempos de relajación, la litología y el color de las escalas de representación</i>				
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 2.1** Relación empírica entre el valor del tiempo de relajación y la litología-granulometría.

La asignación del valor 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)  $m^2/s$** , calculadas a través del factor de calibración  $C_p$ . La transmisividad se representa acumulada (Figura 2.8).



**Fig. 2.8** Distribución de permeabilidad y transmisividad en función de la profundidad.

Para la determinación la permeabilidad y transmisividad se precisa de una fase de calibración, explicada en el apartado siguiente, permitiendo 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.

## 2.4 Determinación de la permeabilidad

A partir de las mediciones de campo de un SRM es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, en particular de la porosidad eficaz y de la permeabilidad. La respuesta de un SRM se debe fundamentalmente al agua libre, ya que el agua ligada a los poros tiene tiempos de relajación inferiores al de conmutación del circuito de la antena (con la instrumentación utilizada en este trabajo). El valor de  $w$  estimado a partir de  $E_0$  es la relación entre el volumen de agua que ha provocado la respuesta medida  $V_{\text{libre}}$  y el volumen total de subsuelo afectado por la medición  $V_{\text{total}}$ . En rigor, para obtener la porosidad eficaz  $m_e$  a partir del valor  $w$  se precisaría un factor de calibración  $C_w$ , que puede ser obtenido por mediciones en laboratorio ( $m_e = C_w \cdot V_{\text{libre}} / V_{\text{total}} = C_w \cdot w$ ). Para acuíferos confinados, en zona saturada  $w$  puede considerarse igual a  $m_e$ . El contenido en agua libre por metro cuadrado vendría dado por:

$$V_{\text{libre}}^m = C_w \cdot \sum w(z) \cdot \Delta z$$

siendo  $w(z)$  el contenido en agua calculado para una capa a la profundidad  $z$  y potencia  $\Delta z$ .

La permeabilidad hidráulica  $k$  (m/s) puede obtenerse mediante calibración a partir de los valores de  $T_1$  o de  $T_2^*$ , aunque es más fiable hacerlo con  $T_1$ , por su menor variación con la susceptibilidad magnética de las rocas. Ambos tiempos representan un valor dependiente de la relación entre el volumen ocupado por los poros que contienen el agua libre y la superficie total de dichos poros. En determinaciones de laboratorio se ha encontrado la siguiente relación empírica entre la permeabilidad y los valores de  $w$  y  $T$  ( $T$  se refiere aquí tanto a  $T_1$  como a  $T_2^*$ ):

$$k = C_p \cdot w^a \cdot T^b$$

donde a y b son constantes dependientes del tipo de rocas, cuyos valores empíricos actualmente más empleados oscilan entre a=1-4, b=2, y  $C_p$  es el factor de calibración, cuyo valor será distinto según el tiempo de relajación utilizado. Para los cálculos,  $w$  se expresa en tanto por uno y el tiempo en milisegundos.

El valor obtenido para el coeficiente  $C_p$  a partir de mediciones de la permeabilidad  $k$  en laboratorio no ha demostrado ser representativo de las condiciones reales de ejecución de un Sondeo de Resonancia Magnética, posiblemente debido a las diferencias del volumen de roca considerado. Para su determinación debe, por tanto, utilizarse el valor de la transmisividad  $T_{eb}$  conocido a partir de ensayos de bombeo. La transmisividad  $T_{srm}$  ( $m^2/s$ ) viene dada por  $T_{srm} = k \Delta z$  para cada capa, y para el conjunto de capas pertenecientes a un mismo acuífero por:

$$T_{srm} = C_p \cdot \sum w^a \cdot T^b \cdot \Delta z = C_p \cdot F_i$$

donde se asume que se trata de litologías uniformes, por lo que el coeficiente  $C_p$  de todas las capas es único. De esta forma el factor de calibración se obtendrá haciendo  $T_{srm} = T_{eb}$  y por lo tanto:

$$C_p = T_{eb} / F_i$$

siendo obvio que los valores de  $T_{eb}$  y de  $F_i$  deben referirse a las mismas capas del acuífero (mismo intervalo de profundidades  $\Delta z$ ). Una vez obtenido, este coeficiente de calibración podrá utilizarse para calcular la transmisividad a partir de las mediciones de SRM efectuadas en otros lugares del mismo acuífero, aunque en esos sitios no se disponga de ensayos de bombeo, mediante

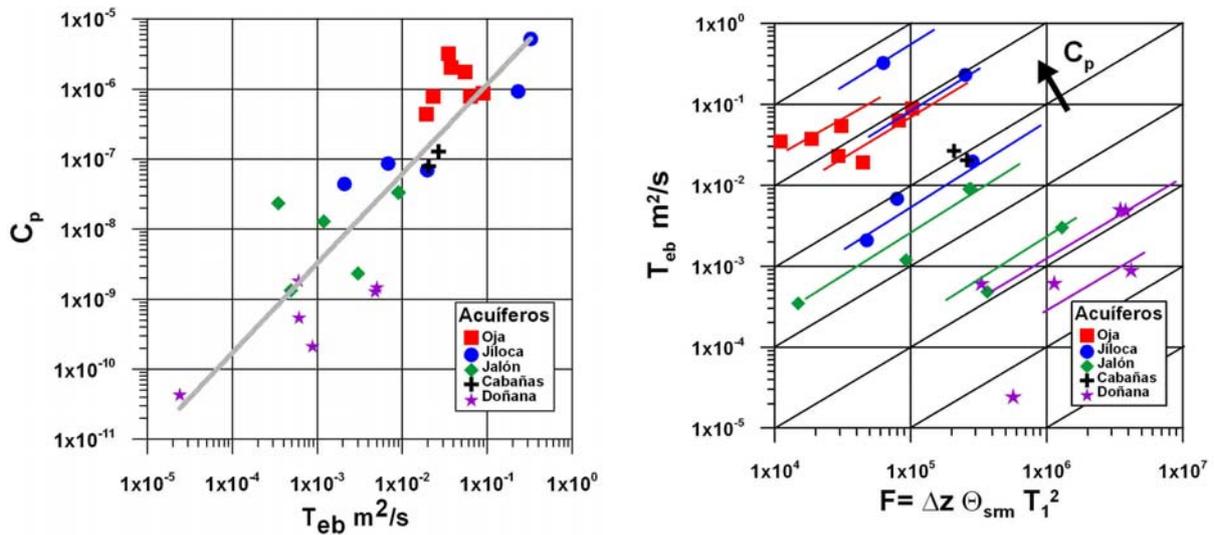
$$T_{srm} = C_p \cdot F_i$$

Cuando en una zona existe un conjunto de SRM donde se conoce el valor de  $T_{eb}$  puede calcularse un factor de calibración único para todo el acuífero (siempre que éste sea de litología uniforme, para asumir que el valor del coeficiente es parecido), mediante:

$$C_p = \sum T_{eb} / \sum F_i$$

La utilidad de este sistema de calibración estriba en poder suministrar un valor más representativo para utilizar las mediciones de un SRM en la estimación de los valores de permeabilidad y transmisividad en un lugar donde no existan ensayos de bombeo, siendo de nuevo obvio que esto no tendrá sentido si las condiciones litológicas no son análogas a las de los lugares de calibración.

La experiencia adquirida en varios acuíferos aluviales de España muestra que el valor de  $C_p$  evaluado en un lugar puede no ser válido en otro sitio del mismo acuífero, cuando éste tiene mucha heterogeneidad. Es evidente que la demanda de un ensayo de bombeo en cada lugar donde se efectúa un SRM invalida la metodología propuesta. Por esta razón se ha desarrollado un nuevo sistema basado en relaciones entre los propios parámetros obtenidos en un SRM. Utilizando datos de varios acuíferos detríticos en los que se disponía de SRM efectuados junto a sondeos con ensayos de bombeo, se ha encontrado una relación entre la transmisividad  $T_{eb}$  y el factor  $C_p$ , según la cual cuanto mayor es  $T_{eb}$ , mayor es  $C_p$ , aunque sin embargo dentro de un mismo acuífero puede darse la relación inversa (Figura 2.9-izquierda).



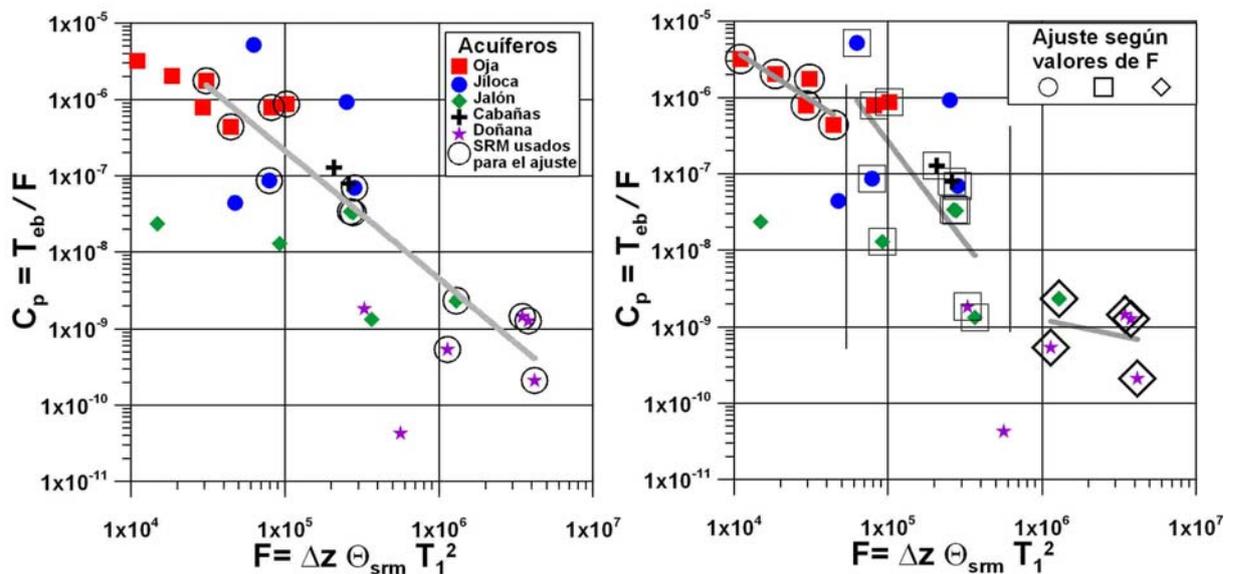
**Fig. 2.9 Izquierda: Relación entre la transmisividad obtenida mediante ensayos de bombeo  $T_{eb}$  y el factor de calibración calculado en un SRM por  $C_p = T_{eb}/F$ . Derecha: Relación entre la transmisividad obtenida mediante ensayos de bombeo  $T_{eb}$  y el factor  $F$  calculado en un SRM próximo.**

Por otra parte, para un mismo acuífero (o zonas del mismo) a mayores valores de  $T_{eb}$  corresponden en general mayores valores de  $F$  (Figura 2.9-derecha), manteniéndose aproximadamente constante el factor  $C_p$ , lo que trae como consecuencia que a mayores valores de  $F$  corresponden en general menores valores del factor  $C_p$ . Analizando entonces la relación entre  $C_p$  y  $F$  (Figura 2.10) se ha podido determinar que puede ajustarse una función  $C_p(F)$  del tipo

$$C_p = m \cdot F^{-n} \quad \text{con} \quad F = \sum w^a \cdot T^b \cdot \Delta z$$

que permite la evaluación de la transmisividad sin la necesidad de disponer de  $T_{eb}$ . Se observa que para valores de  $F$  inferiores a  $5 \times 10^4$  (transmisividad superior a un orden de

magnitud de  $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ), una pequeña disminución en el valor de  $F$  (o aumento de la transmisividad), produce grandes variaciones en el coeficiente  $C_p$ . En el otro extremo, para valores de  $F$  mayores de  $5 \times 10^5$  (transmisividad menor de un orden de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ), una gran variación de  $F$  produce modificaciones muy pequeñas en el valor de  $C_p$ . Para el rango entre  $5 \times 10^4$  y  $5 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$  la variación de  $C_p$  con  $F$  es suave. Por lo tanto, desde un punto de vista de ajuste matemático de funciones, es probablemente mejor usar diferentes rangos de valores  $C_p$ - $F$  para obtener funciones del tipo  $C_p = m \cdot F^{-n}$  de acuerdo con el rango de valores de  $F$ , como se indica en la parte derecha de la Figura 2.10. Este método puede tener excepciones ya que, como puede apreciarse en la dispersión de puntos  $F$ - $C_p$  de la Figura 2.10, hay casos que no cumplen la regla general obtenida en los ajustes realizados, por lo que es aconsejable utilizar alguna referencia adicional de verificación.



**Fig. 2.10 Relación entre el factor  $F (= \Delta z \cdot w_{srm} T_1^2)$  y el coeficiente  $C_p$  calculado mediante  $C_p = T_{eb}/F$ , utilizando una única función (izquierda) o tres funciones diferentes (derecha) dependientes del valor de  $F$ . [J.L. Plata y F. M. Rubio.2008. The use of MRS in the determination of hydraulic transmissivity: The case of alluvial aquifers. Journal of Applied Geophysics 66, 128-139]**

En este estudio, solamente se han considerado para efectuar los ajustes matemáticos los valores de  $F$  obtenidos con SRM de muy buena calidad (funciones  $E_0(q)$  sin puntos desajustados y relaciones Señal/Ruido superiores a 1.5). Utilizando todos los punto el valor de los coeficientes del mejor ajuste es  $m=51.2321$  y  $n=1.6764$ , que es la función representada en la parte izquierda de la Figura 2.10. Considerando un ajuste distinto a cada grupo de SRM según los valores de  $F$ , los coeficientes vienen dados en la Tabla 2.2 (funciones de la parte derecha de la Figura 2.10), que son considerablemente diferentes de los obtenidos para el conjunto de los valores.

<b>INTERVALOS</b>	<b><i>m</i></b>	<b><i>n</i></b>
<b><math>F &lt; 5 \cdot 10^4</math></b>	<b>0.6974</b>	<b>1.3062</b>
<b><math>5 \cdot 10^4 &lt; F &lt; 5 \cdot 10^5</math></b>	<b>4.89E+06</b>	<b>2.6533</b>
<b><math>F &gt; 5 \cdot 10^5</math></b>	<b>4.05E-07</b>	<b>0.4186</b>
<b>Para todo <i>F</i></b>	<b>51.2321</b>	<b>1.6764</b>

**Tabla 2.2 Valores de los coeficientes *m* y *n*.**

El uso de la ecuación

$$C_p = m \cdot F^{-n} = m \cdot (T^2 \cdot w_{srm} \cdot \Delta z)^{-n}$$

abre por lo tanto la posibilidad de utilizar los parámetros **w**, **T**, **Δz** calculados en la inversión de los valores medidos  $E_0(q)$  y  $T_d(q)$ , para evaluación directa de la transmisividad, mediante

$$T_{srm} = C_p \cdot F = m \cdot (w_{srm} \cdot \Delta z_i)^{1-n} \cdot T_i^{2(1-n)}$$

sin necesidad de disponer de un ensayo de bombeo, y admitiendo así mismo la variación del coeficiente de calibración entre diferentes zonas de un acuífero. Considerando que tanto la determinación con un ensayo de bombeo como con un SRM están sujetas a desviaciones debidas a errores experimentales y de evaluación, la predicción dada por esta función es bastante buena. No obstante, la dispersión de valores entorno a las funciones ajustadas aconseja, como en cualquier método geofísico, la utilización de algún punto de control que valide la efectividad de los cálculos.

Como se indicó en el apartado 2.2 de este Informe, en ausencia de otra información puede adoptarse como valor por defecto del factor de calibración  $C_p = 7 \times 10^{-09}$ . Si este valor no es el correcto, las transmisividades calculadas no tienen más significación que orientar sobre su variación relativa (entre capas y/o entre emplazamientos de SRM).

## **2.5 Aspectos concernientes al diseño de las antenas**

Para la mejor comprensión de cuestiones especiales de la campaña de SRM efectuada en el barranco de Lerma se ha considerado conveniente explicar con mayor detalle algunos aspectos concernientes al diseño de las antenas y su relación con la calidad de las mediciones.

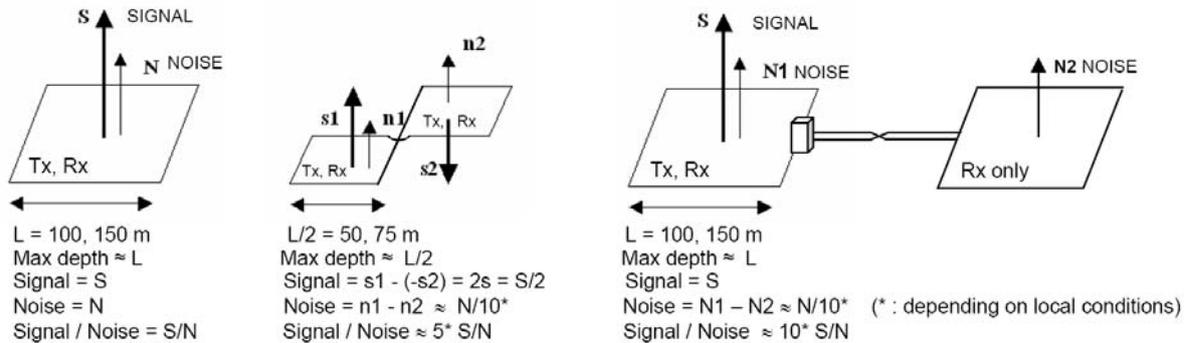
### 2.5.1 Mejora de la relación Señal/Ruido

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 resonancia  $e(t)$  es del orden de decenas o unos pocos centenares de nV, mientras que el ruido puede ser de varios miles de nV. A fin de mejorar la relación señal/ruido, la técnica empleada sistemáticamente consiste en emitir el mismo pulso varias veces, sumando la señal recibida (stacking o apilado de señales). Si el ruido es aleatorio, esta suma tenderá a reducir su influencia. En la secuencia de medición de un SRM primeramente se mide, durante un tiempo  $t$ , el ruido  $n(t)$  (Figura 2.1), que es también sometido a un proceso de apilado; la primera vez que se emite el pulso los valores de  $n(t)$  y  $e(t)=s(t)+n(t)$  [denominado aquí a  $s(t)$  a la parte de señal debida sólo a la presencia de agua] serán parecidos, pero según se van adicionando los registros para varias emisiones del mismo pulso el valor de  $n(t)$  irá disminuyendo de amplitud. Si existe señal  $s(t)$ , el stacking conseguirá que  $s(t)+n(t)$  sea mayor que  $n(t)$ , e idealmente que  $s(t)+n(t)$  acabe siendo prácticamente  $s(t)$ , de tal forma que llegará un momento en el que continuar adicionando pulsos no hace variar los valores medidos. Por esta razón, debe de mantenerse el mismo nivel de adición de señales para todos los momentos de excitación, a fin de que sus valores sean comparables.

Otra forma eficaz de disminuir el efecto del ruido es diseñar la antena en forma de doble bucle en “ocho” (Figura 2.11), que puede mejorar la relación señal/ruido de 2 a 10 veces, aunque de esta manera, con la misma longitud de cable, la penetración disminuye, ya que el área eficaz de la antena es menor. Otra posibilidad es situar una antena  $N_x$  alejada del lugar de emisión, conectada a la antena Rx-Tx (receptora-transmisora) mediante un interruptor electrónico (de diodos), de tal forma que  $N_x$  no actúa de bobina emisora (la corriente de excitación no circula por esa antena); cortada la corriente, la bobina  $N_x$  lejana actúa también de receptora, pero sólo recoge el ruido, que es sustraído (la conexión que hace el interruptor de diodos es de tal forma que la corriente inducida circula en “ocho”, con la corriente inducida en sentido opuesto al de Rx-Tx) de la señal+ruido recibida en la antena principal Rx-Tx, mejorando la relación señal/ruido. La ventaja de este tipo de dispositivo es que se mantiene la fiabilidad y penetración del circuito Rx-Tx de bobina coincidente, reduciendo la influencia del ruido. Sin embargo, la posición relativa de los circuitos  $N_x$  y Rx-Tx puede generar señales anómalas o artefactos, sobre todo para los pulsos de mayor momento en presencia de acuíferos someros.

Si la frecuencia de precesión está próxima a un armónico de 50 Hz, la eliminación del ruido producido por las líneas e instalaciones eléctricas resulta más problemática, pudiendo

utilizarse filtros específicos tanto en la fase de adquisición como en la del proceso de los datos.



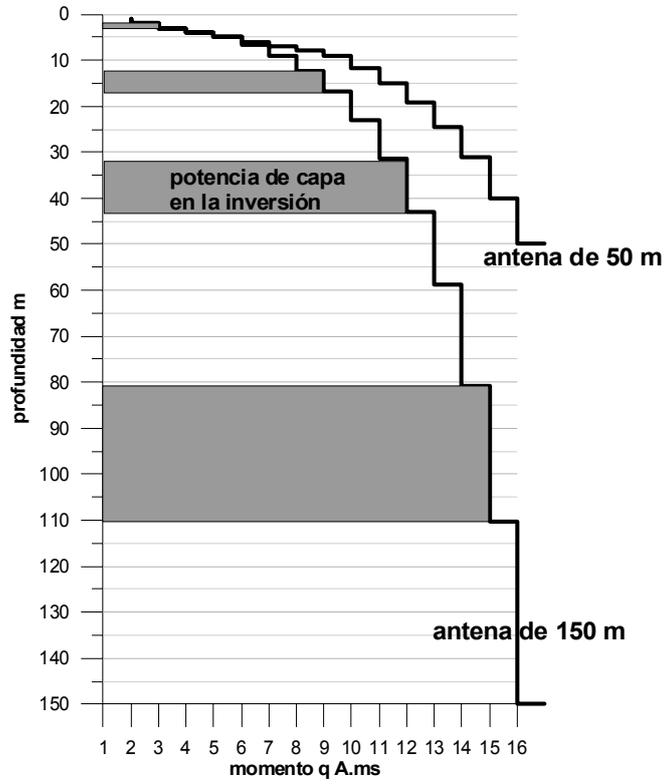
**Fig. 2.11** Diseño de antenas para mejorar la relación Señal/Ruido.

### 2.5.2 Dimensiones de la antena y resolución

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 limitada por las dimensiones de la antena utilizada (una vez y media el lado del cuadrado, o el de uno de los cuadrados en caso de utilizar una antena en forma de “ocho”). La potencia de cada capa del modelo es creciente con la profundidad (iguales en escala logarítmica) y depende de la antena utilizada. En la Figura 2.12 se indica esta distribución para 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 si se mantiene el momento máximo, pero la potencia de cada capa se ajusta convenientemente. Es posible, no obstante, realizar una distribución de capas 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 (sobre todo para las capas más profundas) puede encontrarse realmente condensado en sólo una parte del tramo obtenido como resultado de la inversión.

Para la profundidad de investigación requerida en el presente trabajo del Barranco de Lerma sería suficiente emplear antenas de 15 m de lado, con lo que se consigue una resolución métrica hasta los 15 m de profundidad utilizando 16 momentos de excitación (Tabla 2.3) o hasta los 5 m empleando solamente 8 momentos. Una antena de estas dimensiones se extiende sobre el terreno con facilidad, sobre todo considerando la posibilidad de tener que trabajar en zonas cultivadas. Por otra parte, al reducir el área eficaz de la antena, también

se reduce la f.e.m. de la señal inducida, por lo que solamente las pruebas sobre el terreno permitirán seleccionar las dimensiones más apropiadas.



**Fig. 2.12 Resolución (potencia de las capas) obtenida en la inversión estándar de un SRM en función del número de momentos de emisión y de las dimensiones de la antena.**

16 momentos			8 momentos		
inicio	fin	potencia	inicio	fin	potencia
0	1	1	0	1	1
1	2	1	1	2,1	1,1
2	3	1	2,1	3,3	1,2
3	4	1	3,3	4,6	1,3
4	5	1	4,6	6,7	2,1
5	6	1	6,7	9,8	3,1
6	7	1	9,8	14,4	4,6
7	8	1	14,4	20	5,6
8	9	1			
9	10	1			
10	11	1			
11	12	1			
12	13	1			
13	14	1			
14	15	1			

**Tabla 2.3 Resolución estándar del modelo de inversión utilizando una antena de 15 m de lado, para 8 o 16 momentos de excitación. Los valores están expresados en metros.**

### 2.5.3 Circuito de resonancia de la antena

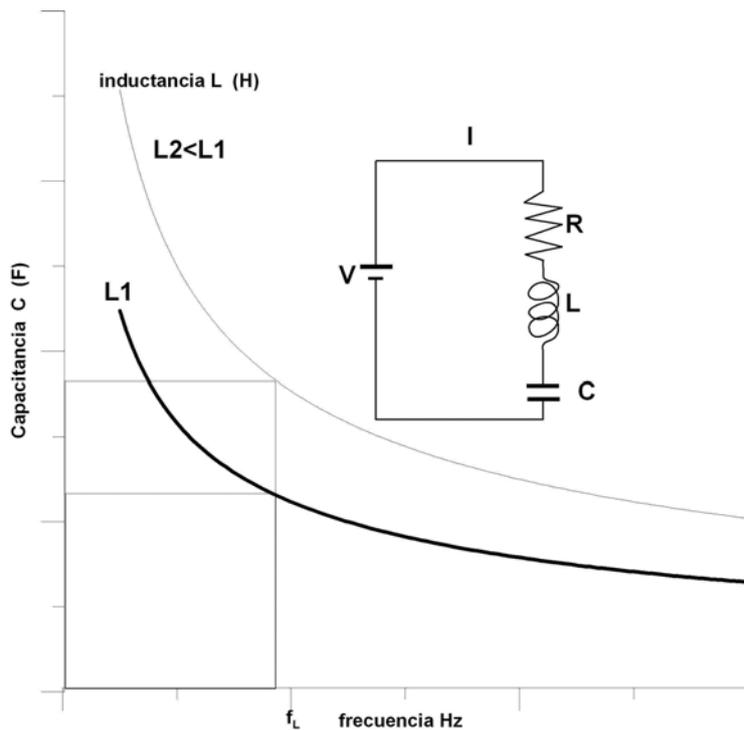
El cable extendido en forma de bucle tiene una resistencia eléctrica **R** (Ohm) que depende de la longitud del cable, y una inducción **L** (Henrios) que depende de las dimensiones del

bucle y número de vueltas de cable. Al conectarlo a una fuente de alimentación que genera una diferencia de potencial  $V$  (Voltios), por el cable circula una corriente de intensidad  $I=V/Z$ , siendo  $Z$  la impedancia del circuito.

Para conseguir que la corriente eléctrica  $I$  tenga una determinada frecuencia  $f$ , de tal forma que  $I=I_0 \cos(\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f_L$ , hace falta introducir en el circuito un condensador de capacitancia  $C$  (Figura 2.13). Entonces la impedancia viene dada por

$$Z=(R^2+(X_L-X_C)^2)^{1/2}$$

con reactancia inductiva  $X_L=L \omega$  y reactancia capacitiva  $X_C=1/\omega C$ . Si  $X_C=X_L$  la impedancia  $Z$  es mínima e igual a la resistencia, por lo que por el circuito puede hacerse circular la intensidad de corriente máxima; esta condición hace además que la frecuencia de la corriente venga dada por  $\omega=1/(LC)^{1/2}$ , denominada frecuencia de resonancia del circuito. En la Figura 2.13 se representa la curva  $f$ - $C$  para dos valores determinados de  $L$ .



**Fig. 2.13 Curvas de resonancia: capacitancia  $C$  que es necesario introducir en un circuito de inductancia  $L$  para conseguir una frecuencia de resonancia  $f$ .**

En los SRM se desea que la frecuencia sea igual a la frecuencia de precesión de Larmor de los protones de hidrógeno en presencia del campo magnético del lugar de intensidad  $B$ , dada por  $f_L=0.04258 B$ ; puesto que la inductancia  $L$  viene dada por el tipo de antena utilizado (dimensiones y número de vueltas del cable), habrá que variar la capacidad  $C$  para

conseguir la resonancia. Al disminuir las dimensiones de la antena (menor inductancia  $L$ ) hará falta introducir más capacitancia en el circuito para conseguir la misma frecuencia  $f_L$  de resonancia (Figura 2.13). Otra posibilidad para conseguir la resonancia con una antena de menores dimensiones es aumentar el número de vueltas, con lo que se consigue aumentar su inductancia y necesitar menor capacitancia.

Los cables normalmente empleados en el equipo NUMIS tienen una inductancia de 0.2 mH para un bucle de 100 m de longitud total (0.12 mH para 60 m y 1.2 mH para 600 m). La introducción de condensadores en este instrumento se hace por pasos discretos, por lo que la sintonización corresponde realmente a un rango de frecuencias, y está limitada instrumentalmente a un valor máximo.

### 3. Planificación y ejecución de los trabajos de campo en el barranco de Lerma

#### 3.1 Instrumentación utilizada

Los trabajos de campo se han efectuado desde el día 22 al día 26 de agosto de 2011, con asistencia técnica de la empresa IGEOTEST SL1 (Andorra), ya que el IGME no dispone de la instrumentación necesaria. Se ha utilizado un instrumento NUMIS LITE, de Iris Instruments, constando de (Figura 3.1): Generador, Convertidor DC/DC y Unidad de Condensadores. Como elementos auxiliares se ha dispuesto de los necesarios rollos de cable de 10 mm<sup>2</sup> (antena), baterías de 12V/ 65Ah, magnetómetro de protones Geometrics 816 y material complementario: cables de unión de instrumentación, cargadores de baterías, bobina auxiliar para medir el ruido, conectores de cables de antena, interruptor de diodos y bobina de calibración de 0.8 mH, así como dos vehículos de campo para el transporte e instalación de la instrumentación. El instrumento está controlado por la aplicación Prodiviner v3.



**Fig. 3.1 Equipo NUMIS LITE**

### 3.2 Equipo de trabajo

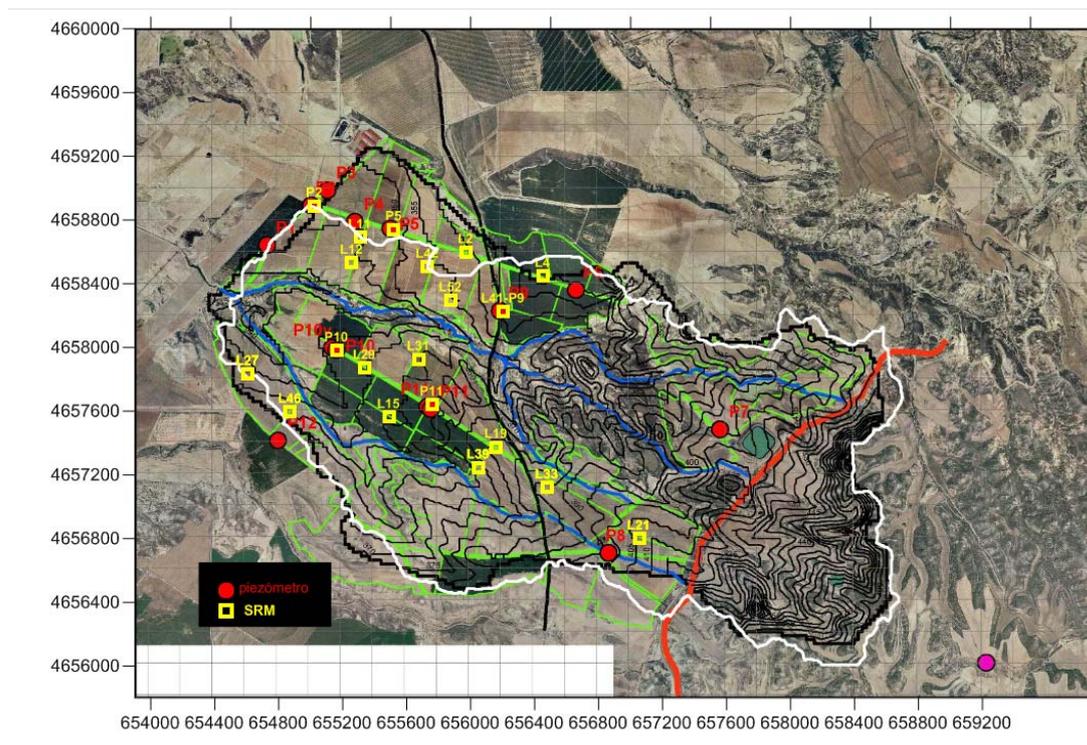
El equipo de trabajo en campo ha estado formado por:

- Juan Luis Plata Torres, investigador de Geofísica del IGME, supervisor de los trabajos.
- Valentí Turú i Michels, Geofísico de Igeotest.
- Xavier Ros, Geofísico de Igeotest.

A través de la oficina del IGME en Zaragoza se ha contado con la colaboración para los trabajos de campo de Jesús Causape y Daniel Merchán.

### 3.3 Medición de los SRM

La asistencia técnica efectuada se hizo con una previsión de realizar 3-4 SRM diarios. El criterio seguido para la selección del emplazamiento de las mediciones ha sido el de conseguir la mejor distribución espacial en toda la zona, situando algún SRM junto a piezómetros a fin de poder utilizarlos como puntos de calibración (Figura 3.2).



**Fig. 3.2** Distribución inicialmente seleccionada para efectuar las mediciones de SRM. El contorno señalado por la línea de color blanco es el límite de cuenca, modificado sobre el inicialmente considerado (línea de color negro).

Las dificultades técnicas encontradas en la realización de estas mediciones han tenido como consecuencia que tanto el número de SRM finalmente realizados como su distribución haya sido la reflejada en la Figura 3.3, indicándose junto con la posición de los SEV en la Figura 3.4.

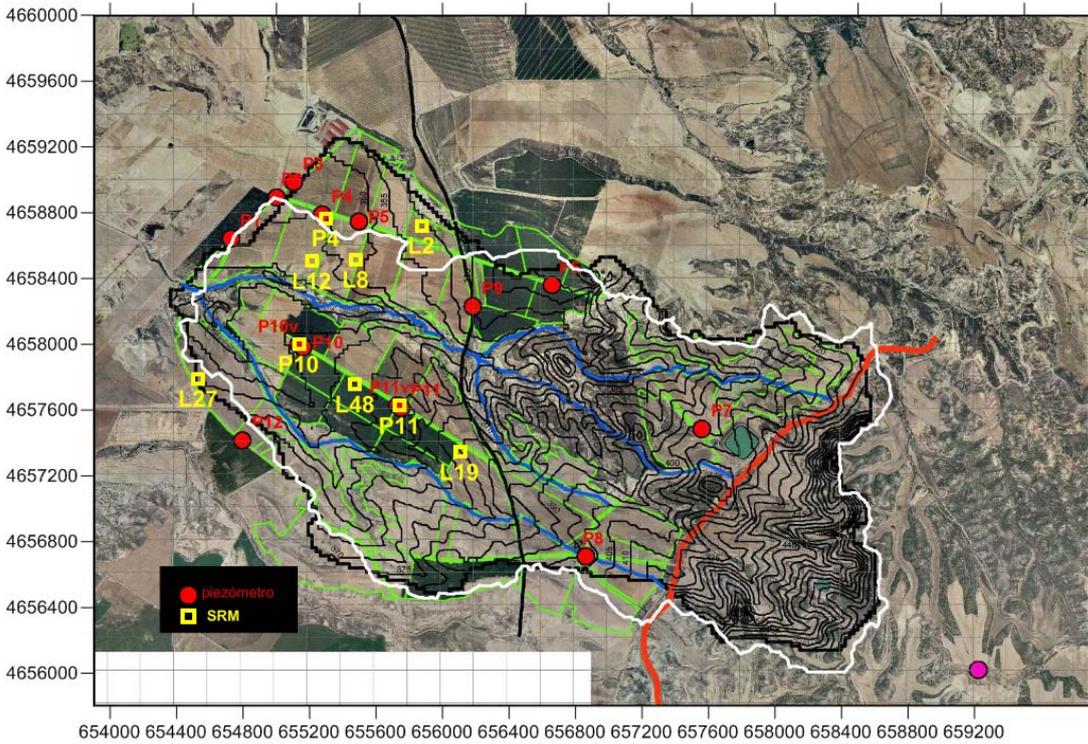


Fig. 3.3 Distribución final de las medidas SRM efectuadas.

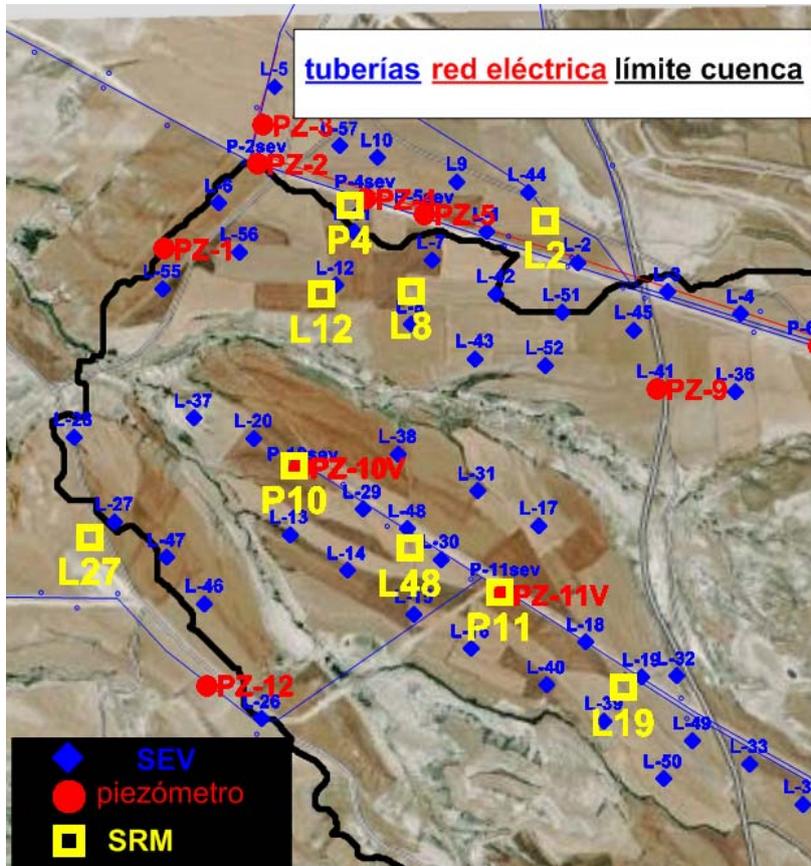


Fig. 3.4 Posición de los SRM medidos y de los SEV efectuados en 2010. La línea de color negro indica el contorno de la cuenca actualmente considerado.

En la Figura 3.4 se indica la posición de tuberías en la zona, que era desconocida en el momento de planificar la campaña de SRM. Por otra parte, la delimitación de la zona o cuenca, modificada al utilizar un modelo digital del terreno diferente del inicial, hace que algunas mediciones se hayan situado fuera de dicho límite.

Las coordenadas de la posición de cada antena se han medido con sistema GPS, estando recogidas en la Tabla 3.1 en UTM Huso 30 ED50 para el punto central de cada dispositivo. En todos los emplazamientos se ha medido el campo magnético con un magnetómetro Geometrics de protones; la intensidad en toda el área prospectada varía de 45400 a 45440 nT (Tabla 3.1), por lo que la frecuencia de resonancia no varía más de 2 Hz; por otra parte no se han observado gradientes magnéticos superiores a las 10 nT dentro del área de las antenas (excepto cuando existen aspersores de riego con algún componente metálico, que pueden producir pequeñas anomalías muy locales del orden de 45 nT). Cuando se han observado variaciones importantes de frecuencia de resonancia, se ha medido también la susceptibilidad magnética de los suelos: valores inferiores a 100 ( $\times 10^{-5}$ ) SI corresponden a rocas sedimentarias y no distorsionan la señal de resonancia; valores entre 100 y 1000 ( $\times 10^{-5}$ ) SI corresponden a rocas metamórficas, y pueden producir alguna distorsión o dispersión de la frecuencia de resonancia, y para valores superiores a 1000 ( $\times 10^{-5}$ )SI, típicos de rocas ácidas y básicas, la variación de la frecuencia puede ser tan grande que impida la resonancia y apreciación de la señal  $e(t)$ . Aunque el tipo de terrenos involucrados en este trabajo no es de esperar que contenga rocas de alta susceptibilidad magnética, se han encontrado valores elevados, especialmente en el SRM P4 (Tabla 3.1).

SRM	X UTM30	Y UTM30	Z	B nT	k SI $\times 10^{-5}$
P10	655136	4658000	365	45400	
P11	655741	4657625	373	45428	99
P4	655298	4658766	360	45434	500
L12	655214	4658504	358	45440	140
L2	655874	4658721	365	45441	312
L27	654532	4657789	355	45415	
L19	656104	4657344	384	45410	280
L48	655474	4657755	363	45425	97
L8	655479	4658514	362	45420	343

**Tabla 3.1** Coordenadas UTM 30 ED50 de los SRM medidos, intensidad de campo magnético B y susceptibilidad magnética k (se dan las cifras a multiplicar por  $10^{-5}$  para unidades de SI).

En la Tabla 3.2 se indican los principales parámetros de registro de los datos en campo, siendo  $f_e$  la frecuencia utilizada en la emisión, B la intensidad de campo magnético medida con el magnetómetro y  $f_L$  la frecuencia de Larmor correspondiente.

día	Fichero	Inicio	Final	d	Antena	forma	fe (Hz)	B nT	fL (Hz)	T1	q	St	Ruido (nV)
22	Test1P10	10H05	11H00	0:55	15x15	especial	1933,8	45400	1933,1	Si	16	8	92
	Test2P10	11H31	11H59	0:28	15x15	especial	1933,8			Si	16	48	
	Test3P10	12H09	13H41	1:32	15x15	especial	1933,8			Si	16	52	
	<b>SRMP10</b>	20H35	21H29	0:54	15x15	cuadrada esp	1933,8			SI	8	72	870
22	Test2P11	16H15	19H00	2:45	15x15	cuadrada esp	1933,8	45428	1934,3	SI	16	96-102	1050
	<b>SRMP11</b>	19H38	20H01	0:23	15x15	cuadrada esp	1933,8			SI	16	96-102	1050
23	Test1P4	9H16	10H24	1:08	15x15	8 especial	1933,8	45420	1933,9	SI	8	92	415
	pruebas			0:58									
	Test2P4	11H22	12H32	1:10	15x15 (x2)	8 especial	1930,8			SI	7	92	590
	pruebas	12H32		6:30	15x15 (x3)	8 especial							
	pruebas	16H00			15x15 (x2)	8 especial							
	pruebas	18H00			15x15 (x2)	8 especial							
	Test3P4	19H17	19H36	0:19	60x60	cuadrada					4		
	Test4P4	20H29	21H09	0:40	30x30	8	1930,8			No	8	16-92	1950
24	<b>SRMP4</b>	09H19	17H33	8:14	30x30	8	1930,8	45434	1934,6	Si	16	256	3150
	pruebas	18H00	20H00	2:00	15x15	8							
	Test5P4	20H13	20H19	0:06	21x21	8				Si	3		
25	Test1L12	7H45	8H40	0:55	30x30	8	1932	45440	1934,8	SI	16	18	187
	<b>SRML12</b>	8H52	11H33	2:41	30x30	8	1932			SI	16	16-156	
25	Test1L2	12H25	14H40	2:15	30x30	8	1935,3	45441	1934,9	SI	16	30	380
	<b>SRML2</b>	15H47	18H20	2:33	30x30	8	1935,3			SI	16	48-96	
25	Test1L27	19H20	19H45	0:25	30x30	8	1935	45415	1933,8	SI	16	22	250
	<b>SRML27</b>	19H45	21H24	1:39	30x30	8	1935			SI	16	22-96	
26	<b>SRML19</b>	9H00	13H41	4:41	30x30	8	1935	45410	1933,6	SI	16	96	900
26	<b>SRML48</b>	15H16	17H54	2:38	30x30	8	1930,8	45425	1934,2	Si	16	72	336
26	<b>SRML8</b>	18H56	21H07	2:11	30x30	8	1930,8	45420	1934,0	Si	16	72	235

**Tabla 3.2 Resumen de los parámetros de los registros efectuados. d: duración en horas:minutos; T1: indicación de si se ha medido el tiempo longitudinal (dos pulsos por momento de excitación); q: número de momentos utilizados; St: stacking.**

Se han encontrado grandes dificultades para obtener buenos registros. Los dos primeros días se han dedicado íntegramente a tratar de diseñar unos parámetros de registro que permitieran visualizar la señal de resonancia, efectuando numerosos test con diversas formas y dimensiones de antena, apilamiento, etc. En el día 24 se dedicaron más de diez horas de registro al emplazamiento P4. Finalmente, los dos últimos días de campo se efectuaron 3 SRM por día, con un tiempo de registro de 2-3 h por emplazamiento.

En la Tabla 3.3 se detallan los ficheros de datos finalmente válidos, así como una indicación de las incidencias encontradas, sobre todo en la grabación de los ficheros tipo data y binarios.

SRM	Ficheros	q	Stacks	Tipo de stack	Observación	
P10	Test1P10	16	8	Waverage	Tx en antena y Rx en bobina de 0,8 mH, con diodos	
	Test2P10	16	48	Waverage	El mismo que Test1 pero con 48 stacks	
	Test3P10	16	52	Waverage	El mismo que Test2 pero con 52 stacks	
	SRMP10	8	72	StackUnNoise	Tx en antena+0,8 mH, Rx en antena+ remota a 60 m con diodos	
P11	Test2P11	16	96-102	auto-stack	Sin diodos y conectando la bobina de 0,8 mH normal	(1)
	SRMP11	16	96-102	auto-stack	El mismo que Test2 con diferente Stack para q5 y q9	
P4	Test1P4	8	92	StackUnNoise	Filtro ruido a 2000 nV . Inductancia de 0,8 mH y diodos	
					pruebas sin inductancia suplementaria. No sintoniza.	
	Test2P4	7	92	Simple	Sin bobina de 0,8 mH, 2 vueltas. No se puede realizar Q8	
					3 vueltas. No realiza el "check in" de los condensadores	
					Se cambia a la antena remota pero no arranca el Check in	
					Se sitúa la antena remota a 30 m de distancia. No arranca	
	Test3P4	4			Solamente se pone en marcha Q1, Q3 y Q4	
	Test4P4	8	16-92	Simple	Se ejecutan ocho momentos correctamente	
					No supera el Check Capacitors	
	Test5P4	3			No reparte bien los momentos, está al límite de la capacidad	
	SRMP4	16	256	Simple		(2)
L12	Test1L12	16	18	Simple	Se realiza un sondeo con pocos Stacks y 16 momentos	
	SRML12	16	16-156		Se aumenta a 72 Stacks para Q3 y 156 Stacks hasta Q8	(3)
L2	Test1L2	16	30	Simple	Se realiza un sondeo con 30 Stacks y 16 momentos	
	SRML2	16	48-96		Stacks: Q1-Q14 Q7-Q10 y Q14 (96); resto 48	(3)
L27	Test1L27	16	22	auto-stack	Se efectúa con pocos 22 stacks	
	SRML27	16	22-96		Se amplía el número de Stacks en Q5-Q10, tormenta a las 21H	(3)
L19	SRML19	16	96	Simple	En el Q12 se pone a llover hasta prácticamente el final	(4)
L48	SRML48	16	72	Simple	Todos los momentos de impulsión a 72 Stacks	(4)
L8	SRML8	16	72	Simple	Los dos últimos momentos se realizan a 48 Stacks	

- (1) procesado con el fichero bin de test2P11
- (2) Ficheros bin con stack=0, se utiliza el fichero bin de Test4P4
- (3) procesado con valores recuperados del fichero bin
- (4) Fichero bin con stack=0

**Tabla 3.3 Resumen de los parámetros de registro utilizados, secuencia de ejecución e incidencias de registro. Los ficheros resaltados en color naranja son los finalmente utilizados para el proceso de datos.**

#### 4. Análisis de los datos de campo

En el registro de campo la aplicación Prodiviner genera para cada momento  $q$  un fichero  $*dat.q$  con los valores de las señales cada 2 ms y duración de 240 ms. Se generan además los ficheros  $*.inp$  (para FID1) y  $*in2$  (para FID2) con los valores de  $E_0$ ,  $T_2^*$  o  $T_1$ ,  $f$ , fase y ruido para cada momento. Estos ficheros están en código ascii. El sistema proporciona además un fichero binario, denominado NumisBin.mrs, que contiene toda la información generada durante el proceso de registro, incluyendo posiciones de los parámetros de registro, filtros, stack efectuado, etc., y que pueden ser reproducidos con la aplicación Prodiviner (la misma utilizada para comando del instrumento en campo). Para proceder al análisis de los datos registrados se ha efectuado el cálculo de los valores de señal instantánea (a partir de las componentes real e imaginaria registradas). Para ello se ha partido de los ficheros originales  $*data.q$  para cada momento de emisión, creando nuevos ficheros  $*.xls$  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:

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

$$\text{Señal FID1 } O = (F^2 + G^2)^{1/2}$$

$$\text{Señal FID2 } P = (J^2 + K^2)^{1/2}$$

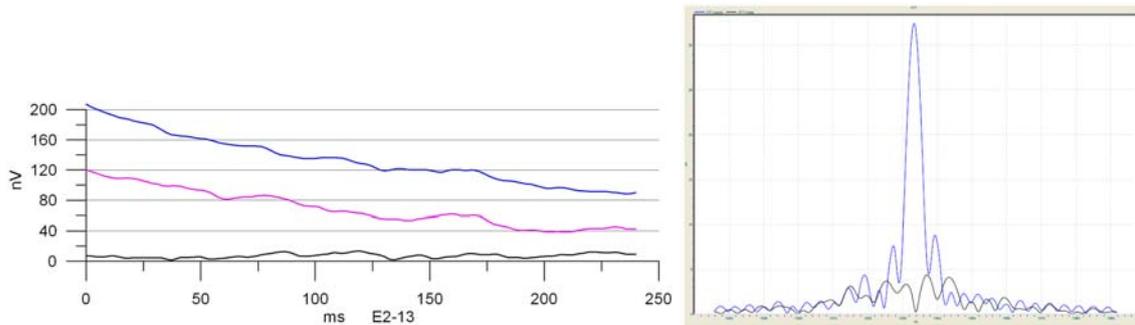
La letra se refiere a la columna utilizada. Con estos ficheros se han dibujado las curvas  $e(t)$  que son presentadas a continuación. En el Anexo Digital se encuentran todos los ficheros originales y generados.

Este análisis tiene por objetivo evaluar si se ha recibido la señal del agua y validar la calidad de los registros, para lo que se tiene en cuenta:

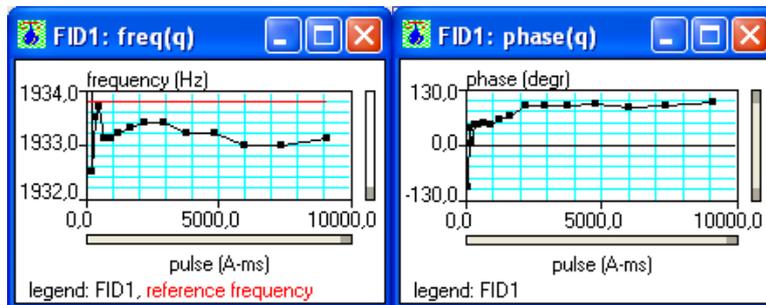
- La denominada señal  $e(t)$  es en realidad la suma de la señal de resonancia (si existe) y del ruido ambiental.
- La amplitud de la función  $e(t)$  depende (para una cantidad de agua dada) de las dimensiones de la antena, siendo menor cuanto menor es su área, ya que disminuye la f.e.m. inducida.
- Los resultados recogidos en el fichero  $*.inp$  se refieren a la totalidad del tiempo registrado, por lo que los valores de  $E_0$ ,  $T_2^*$ , frecuencia y fase “de campo” no son forzosamente significativos; por esta razón pueden diferir de los calculados en el proceso de inversión, que se refieren a valores filtrados y para un tiempo normalmente inferior al registrado, si así se selecciona en los parámetros de proceso.

- El criterio adoptado para identificar la posible señal de resonancia debida a la presencia de agua es que la amplitud de  $e(t)$  sea superior a la del ruido, y que además presente carácter de decaimiento exponencial en todo o en parte del tiempo registrado.

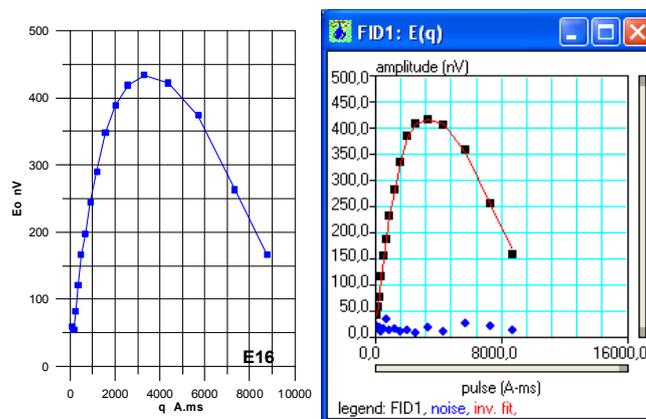
En las siguientes figuras se dan ejemplos de resultados de buena calidad obtenidos en diversas zonas de España.



**Fig. 4.1** Ejemplo de señal  $e(t)$  [parte izquierda] y su espectro FFT (Fast Fourier Transform) [parte derecha] de buena calidad, donde es fácilmente identificable la presencia de la señal de resonancia. Azul: FID1; Rosa: FID2; negro: ruido. El espectro indica claramente que dicha señal solamente es debida a la resonancia, no estando contaminada por ruido.



**Fig. 4.2** Ejemplo de las funciones  $f(q)$  y fase  $q(q)$  en un registro de buena calidad. La frecuencia es estable y la fase varía suavemente con la variación del pulso.

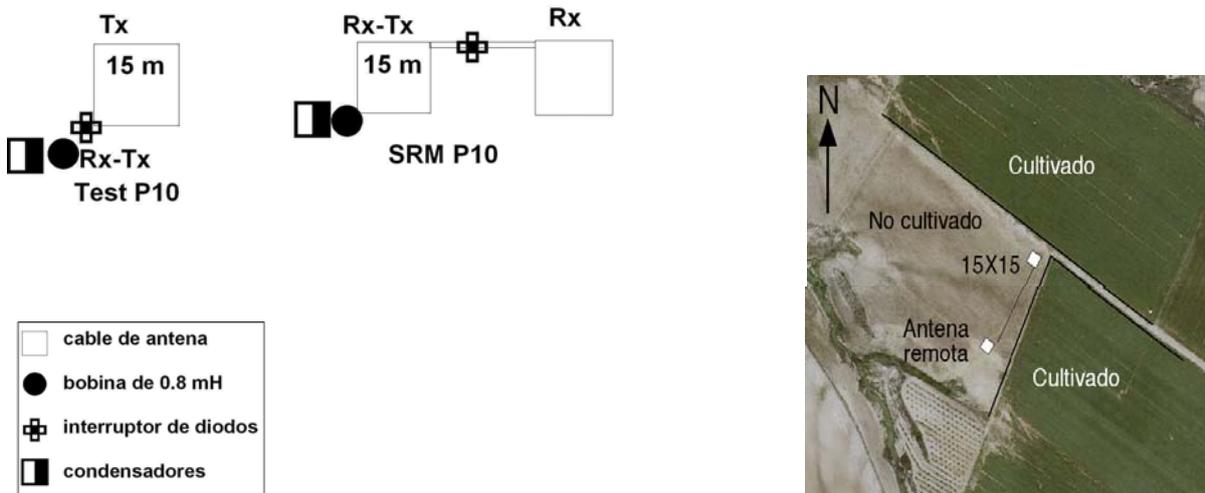


**Fig. 4.3** Ejemplo de curva de sondeo  $E_0(q)$  de buena calidad, tomada del fichero de campo (\*.inp) [izquierda] y como resultado del proceso [derecha], donde se aprecia la clara diferencia entre nivel de la señal y del ruido. La curva dibuja una evolución coherente, sin mostrar altibajos.

**SRM P10**

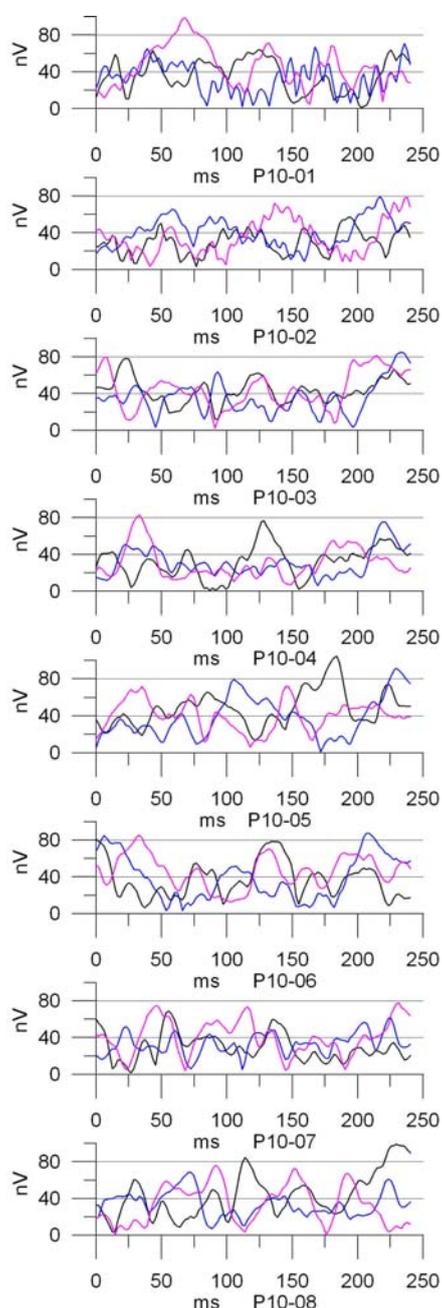
Efectuado junto al piezómetro P10, que en esos momentos tenía 0.77-0.87 m de agua a 4.03 m de profundidad, comenzando las arcillas a 4.8-4.9 m. El campo magnético medido en el emplazamiento era de 45400 nT, variando a 45445 nT según la distancia a los aspersores de riego. La frecuencia de Larmor correspondiente ( $f_L=0.04258 B$ ) es de 1933.1 Hz, utilizándose 1933.8 Hz en emisión.

Dada la poca penetración necesaria, se comenzó utilizando una antena cuadrada de 15 m a la que se unió en serie la bobina de calibración de 0.8 mH a fin de aumentar la inductancia para conseguir la resonancia del circuito (ver Figura 2.13). La unión entre la bobina y el cable de la antena se hizo mediante el conmutador de diodos, utilizando sólo la bobina como circuito de recepción Rx (Figura 4.4). Se efectuaron varios test (Test1P10, Test2P10, Test3P10) variando el stack hasta 52. Al no observarse ninguna señal del agua, y ante la duda de si esto sería debido a la poca potencia de la zona saturada, se trasladó el equipo al punto P11, donde había más de 2 m de capa de agua, realizándose nuevas pruebas de configuración de antena, tras las que se optó por regresar al punto P10 efectuando el **SRM P10** con una antena cuadrada Tx-Rx de 15x15 m, en la que se incluyó la inductancia suplementaria de 0.8 mH, unida en conexión en ocho mediante diodos a otra remota (a 60 m de distancia) de iguales dimensiones (Figura 4.4). Esta configuración hace que en emisión sólo actúe la antena Tx-Rx mientras que en recepción también actúa la antena remota, que solamente registra el ruido ambiental restándose a la señal recibida en la otra bobina, con lo que se consigue mejorar la relación Señal/Ruido.



**Fig. 4.4 Configuraciones de antenas ensayadas en el lugar P10**

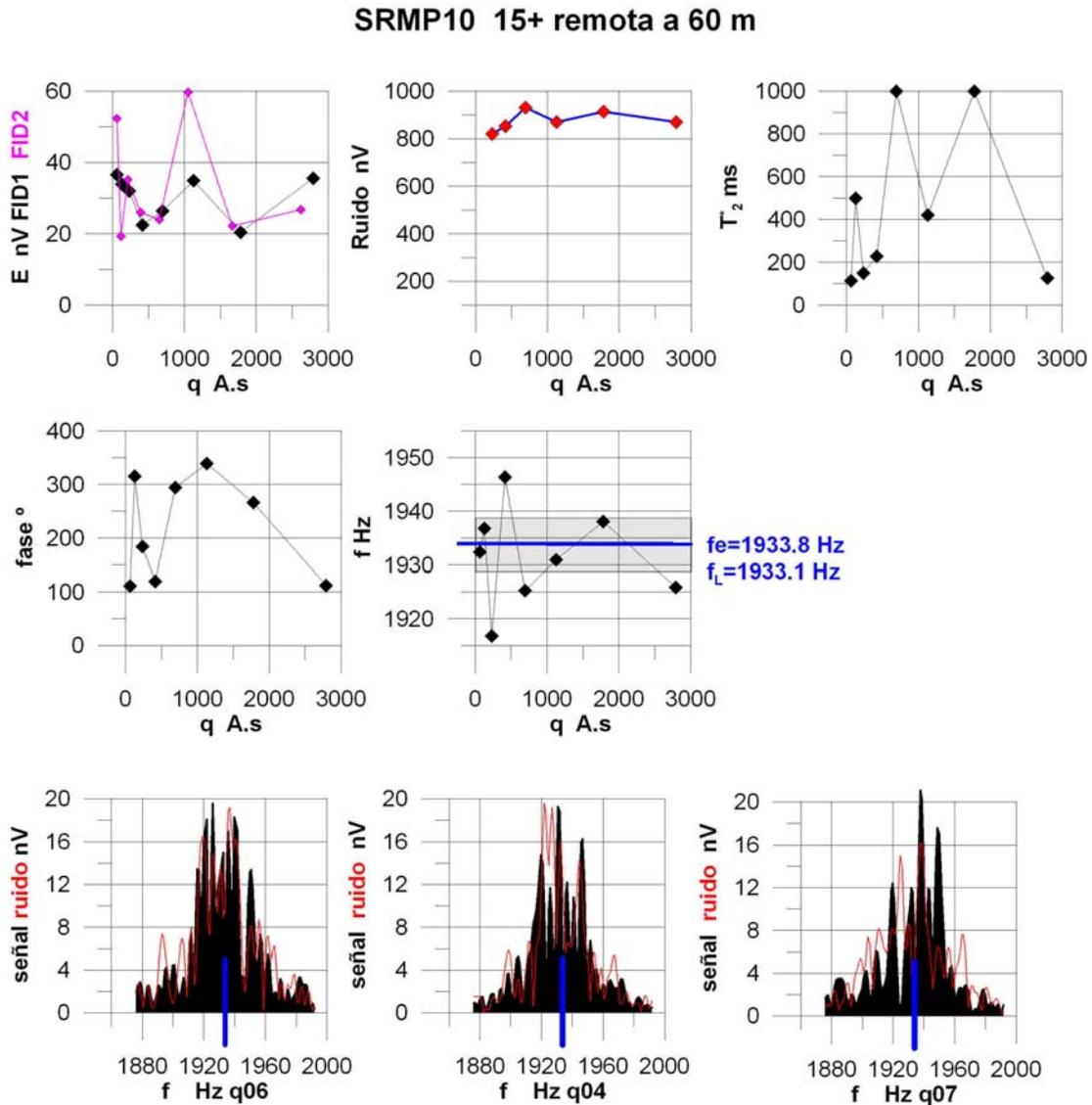
Las curvas  $e(t)$  para los ocho momentos de emisión utilizados fueron obtenidas con 72 stacks, y tienen una amplitud de la misma magnitud que el ruido (Figura 4.5), entre unos 40-60 nV, llegando a 80 nV para FID2. Solamente es apreciable una posible señal del agua para q2, q4 y q6, con tiempo de relajación inferior a 150 ms.



**Fig. 4.5** Curvas  $e(t)$  del SRMP10. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Todos los registros tienen 72 stacks.

En la Figura 4.6 se representan las principales curvas de campo de este sondeo. La curva  $E_0(q)$ , con cierta coherencia para las señales FID1 y FID2, puede interpretarse como debida a un acuífero somero y poco potente hasta el quinto pulso, siendo posteriormente muy

irregular y carente de significado. El ruido es estable, entorno a los 900 nV. El tiempo de relajación transversal  $T_2^*$  (tomando los 240 ms de registro) presenta valores entre 100 y 200 ms para el posible acuífero, lo que confirma su granulometría de arenas medias. La variación de la fase es caótica, aunque la rápida disminución para los pulsos superiores puede indicar la presencia de rocas muy conductoras. La frecuencia sólo se aproxima a la de resonancia para los dos primeros pulsos, indicando la baja calidad de los registros, por lo que no parece viable la inversión cuantitativa fiable de estos datos.



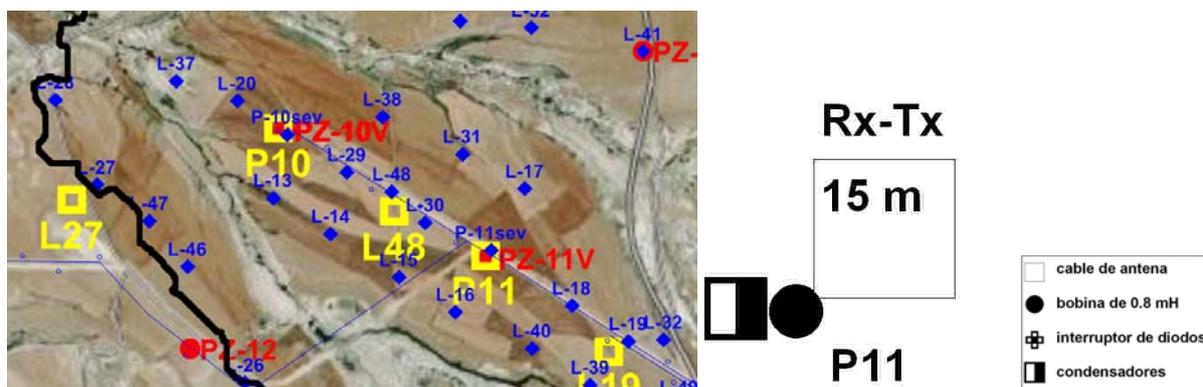
**Fig. 4.6** Curva  $E_0(q)$ ,  $Ruido(q)$ ,  $T_2^*(q)$ ,  $fase(q)$ ,  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del SRM P10. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión  $f_e$  y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

Los espectros FFT de las señales  $e(t)$  no confirman la presencia de resonancia, aunque se observan armónicos preferentes a la frecuencia de resonancia de 1933.8 Hz para los momentos  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_4$ , con desviaciones superiores a 10 Hz.

## SRM P11

Realizado junto al piezómetro P11, que se encontraba con una capa saturada de agua de 1.8 m (en P11) y 2.7 m (en P11v) a 5.1 m de profundidad, situándose las arcillas a 6.9 y 7.8 m respectivamente. El campo magnético es de 45428 nT, con frecuencia de Larmor de 1934.3 Hz, por lo que se mantuvo la misma frecuencia de emisión empleada en el SRM P10 de 1933.8 Hz. Entorno del emplazamiento hay tuberías de conducción de agua (Figura 4.7).

Se utilizó una antena cuadrada de 15 m de lado, intercalando en el circuito la inductancia suplementaria de 0.8 mH en serie con el cable para aumentar la inductancia (sin caja de diodos ni configurando un circuito en ocho, Figura 4.7), efectuando el registro Test2P11, que se modificó aumentando el número de stacks para los pulsos q5 y q9, dando lugar al registro SRMP11. Para el análisis y proceso se han utilizado los ficheros data recuperados del binario del Test2P11.



**Fig. 4.7 Posición y dispositivo de antena utilizado en el SRM P11**

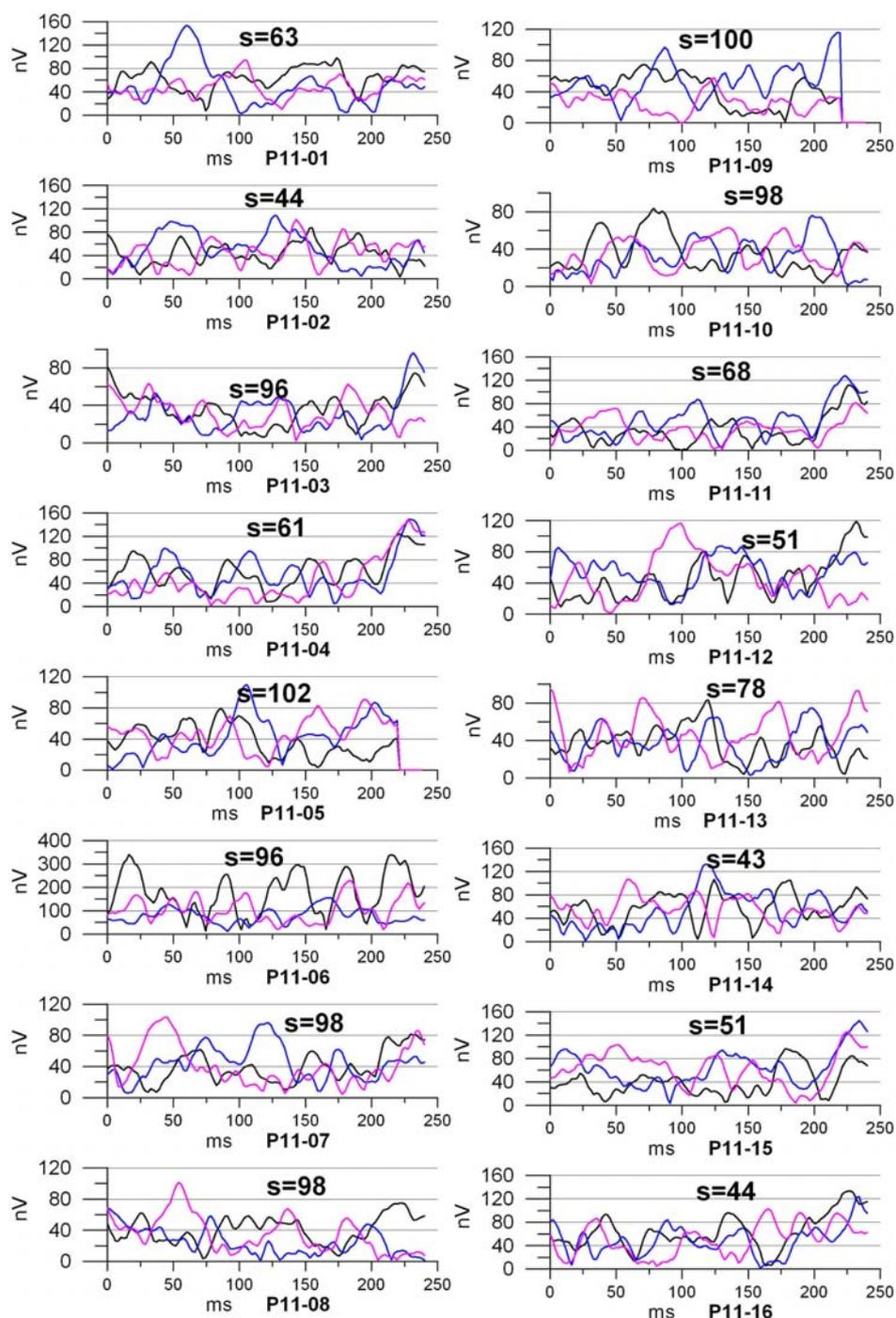
Nota: El registro final SRMP11 debería ser el mismo que el Test02P11, aumentando el stacking para los pulsos q5 y q9. Sin embargo:

- Los dos ficheros bin son iguales, excepto para q5 y q9, que tiene más stacks en el Bin de Test02 P11
- Los ficheros data para q1,2,3,4,5,7,8 y 9 del Test02P11 no coinciden con los ficheros Bin (si coinciden para q6 y q10 a q16)
- Todos los ficheros data de SRMP11 coinciden con el Bin correspondiente, siendo iguales a los data del Test02P11 los 5, 6 y 10 a 16.
- La hora de grabación de los ficheros inp y bin Test02 es posterior a la de los ficheros correspondientes del SRMP11.

En consecuencia el fichero Bin del registro Test02 es el que contiene los datos completos, que no se corresponden con los data ni del Test02 ni del SRMP11, y ha sido el adoptado para el análisis y proceso.

A pesar de que en este emplazamiento existe mayor potencia de capa saturada, no se aprecia una señal clara del agua en las curvas  $e(t)$ , en las que la variación del nivel de amplitud según el momento de excitación puede estar influida por utilizar stack variable

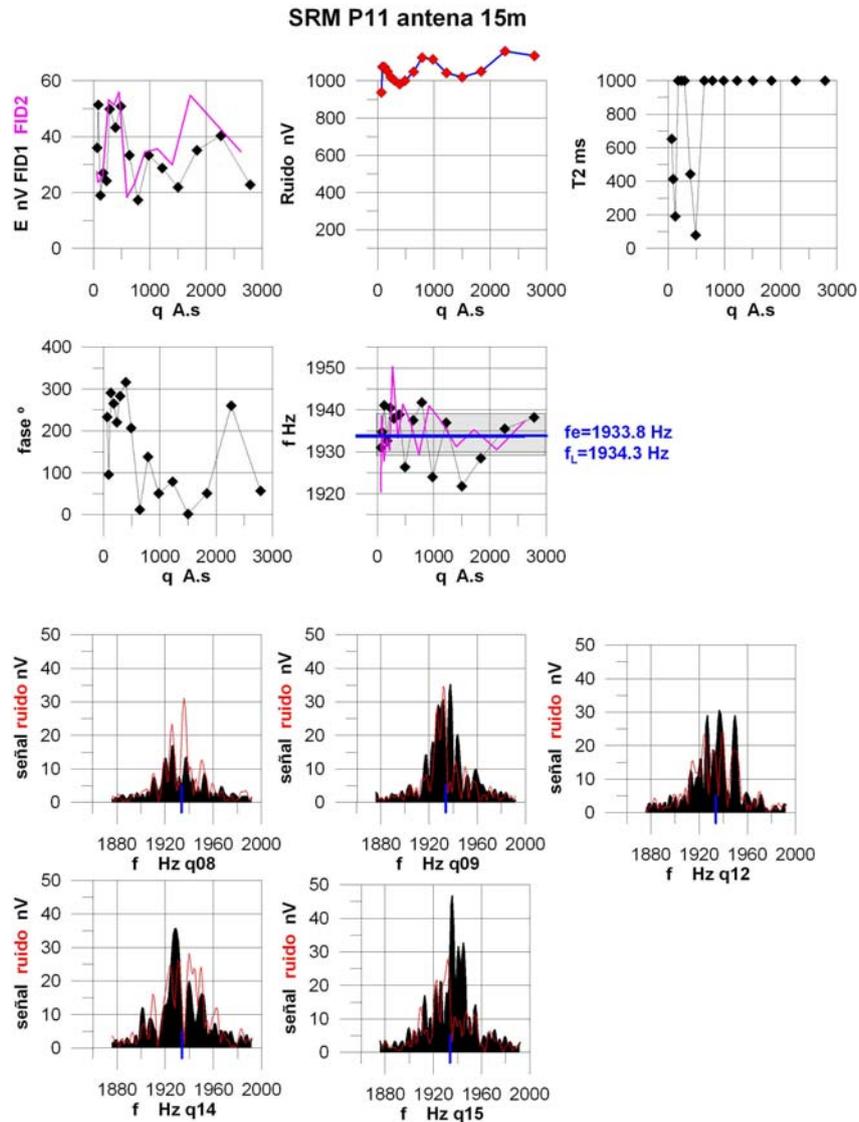
(Figura 4.8). Puede observarse cierto decaimiento exponencial en los pulsos 12 y 15 (que teóricamente están profundizando por debajo del acuífero), en los que la señal es superior al ruido, y en menor calidad para los 7 y 8, aunque con la señal en el mismo nivel de amplitud que el ruido.



**Fig. 4.8** Curvas  $e(t)$  del SRMP11. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros tienen stack muy variable para cada momento de excitación, indicado por  $s=xx$ .

Respecto de las curvas de campo del sondeo (Figura 4.9), la curva  $E_0(q)$  es coherente para FID1 y FID2 y corresponde a un acuífero somero de mayor potencia que en el SRMP10,

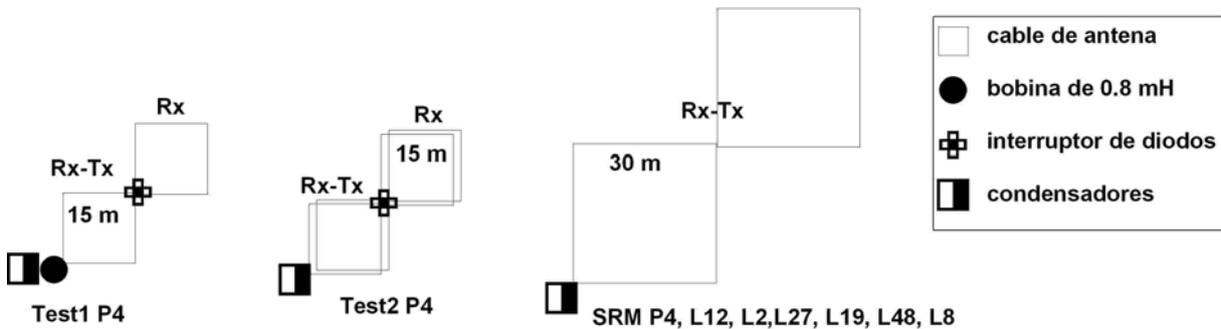
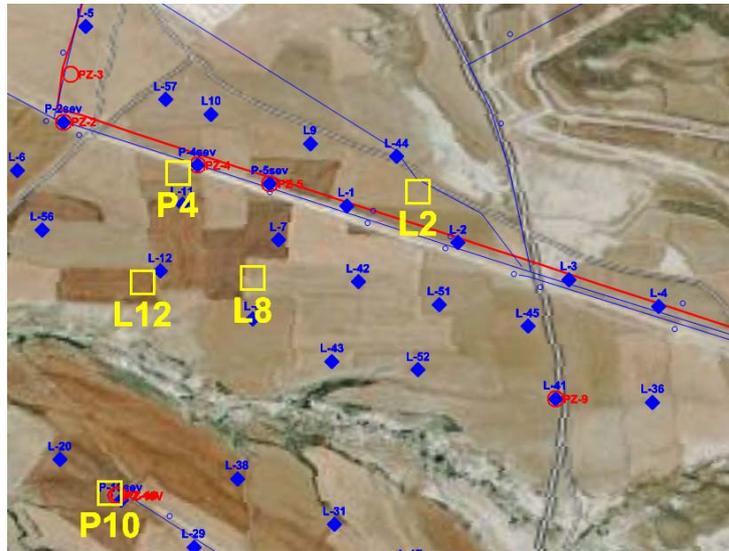
siendo no válida para los últimos pulsos, donde se hace evidente la presencia de señales fantasma acentuadas por la existencia de materiales muy conductores. El ruido tiene poca variación (entre 1000-1500 nV). El tiempo  $T_2^*$  adopta valores del orden de 100 ms en los primeros pulsos, indicando baja permeabilidad (mayor arcillosidad), pasando a valores de 1000 ms (no hay decaimiento exponencial) para los pulsos superiores debido a utilizar los 240 ms de registro para su calculo. Los bajos tiempos de relajación pueden ser parte de la causa de la baja visibilidad de la señal en las curvas  $e(t)$ . La fase presenta en general una tendencia a disminuir, como corresponde a entrada en terrenos conductores. La frecuencia, excepto para los primeros momentos, tiene una diferencia de más de 5 Hz respecto de la de precesión, denotando la mala sintonía. El espectro de frecuencias solamente es aceptable para el q15, presentado gran dispersión para los demás pulsos.



**Fig. 4.9** Curva  $E_0(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^*(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del SRM P11. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

**SRM P4**

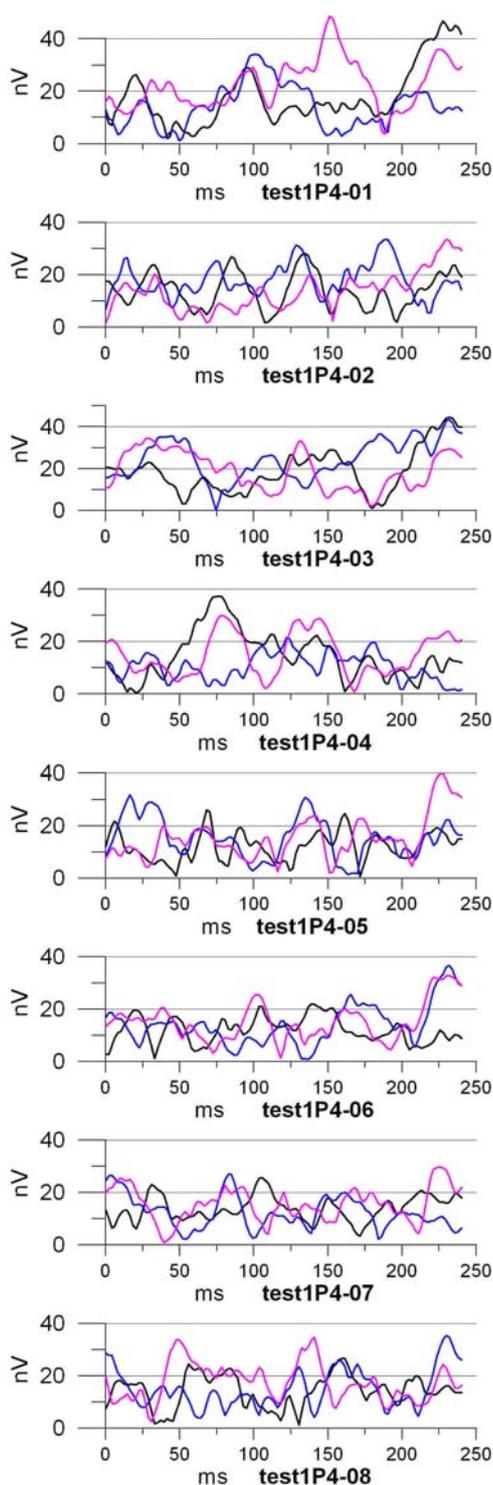
Situado junto al piezómetro P4 (Figura 4.10), con 4.14 m de capa saturada a 3.16 m de profundidad y estando las arcillas de base a 7.3 m. El campo magnético medido es de 45420 nT (correspondiente a 1934 Hz) por lo que la frecuencia se mantuvo inicialmente en 1933.8 Hz. La susceptibilidad magnética, de  $500 \times 10^{-5}$  SI, es relativamente elevada.



**Fig. 4.10** Posición del SRM P4 y diferentes configuraciones de antena ensayadas en este emplazamiento

Para tratar de amortiguar los posibles efectos de la línea eléctrica existente junto al emplazamiento se utilizó una antena en forma de ocho con alineación paralela a la línea. Se comenzó ensayando una configuración formada por dos cuadrados de 15x15 m conectados en ocho mediante el interruptor de diodos (Figura 4.10 Test1), por lo que en emisión sólo actúa uno de los bucles, que además tiene puesto en serie la inductancia suplementaria de 0.8 mH, mientras que en recepción actúan ambos. En el registro test1P4 realizado con 92 stacks y 8 momentos de emisión, la señal máxima debería de obtenerse a partir del quinto momento. La amplitud de la señal es inferior a 20 nV. Es apreciable (Figura 4.11) la señal **e(t)** exponencial del agua en el tercer y quinto momento de excitación, aunque con un

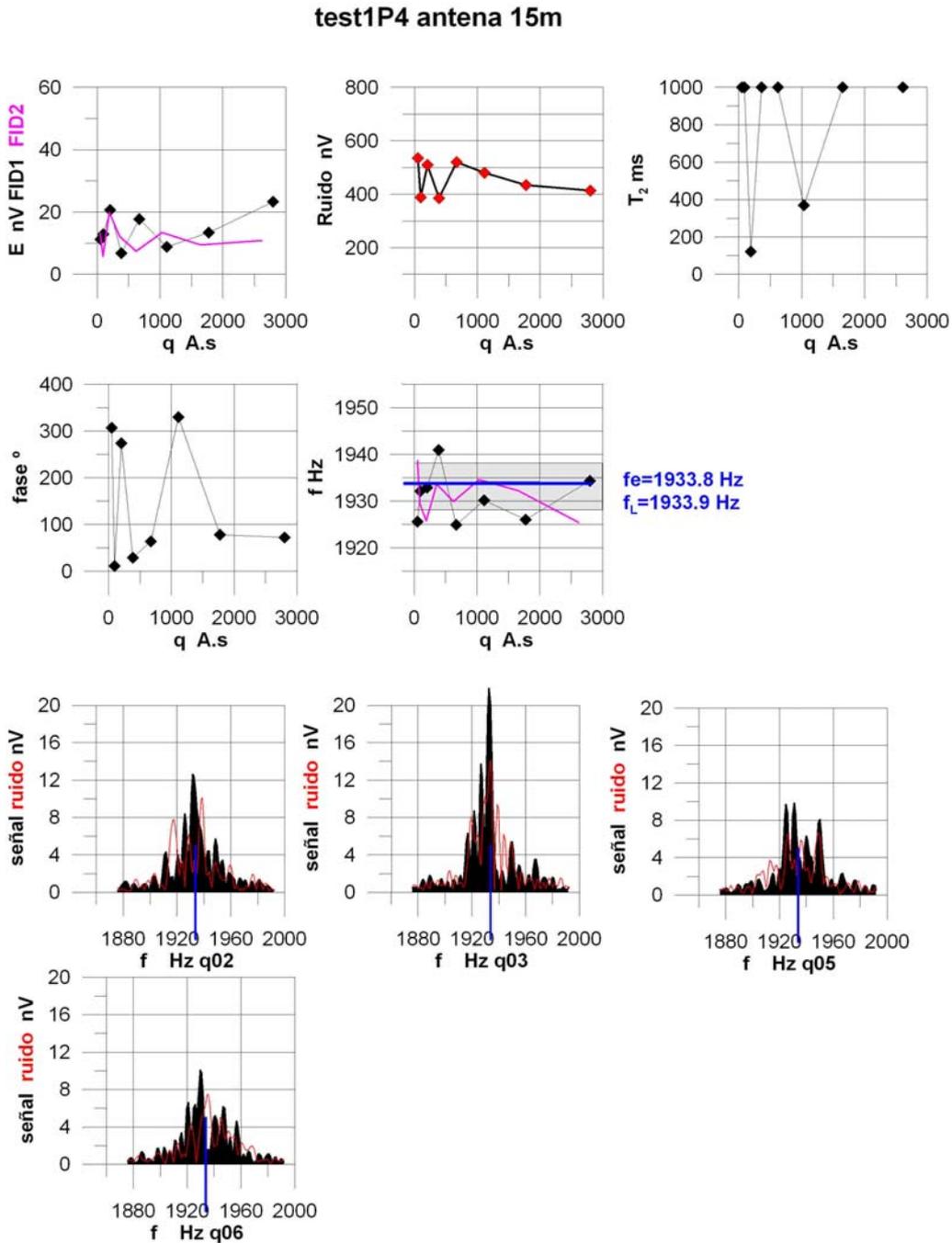
tiempo de relajación inferior a 150 ms e iniciándose la curva en un mínimo (el máximo podría estar fuera del registro, a -40 ms).



**Fig. 4.11 Curvas  $e(t)$  del SRM test1P4, con antena de 15 m. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Todos los registros tienen 92 stacks.**

Los espectros FFT (Figura 4.12) corroboran la presencia de señal, si bien superpuesta a un ruido de la misma frecuencia en algunos casos. La curva  $E_0(q)$  es amorfa y no supera los 20

nV, mostrando una tendencia a la subida para más de 1500 A.ms que podría deberse a un falso efecto de inducción por la baja resistividad del basamento. El ruido es aceptable, por debajo de los 500 nV, mostrando los tiempos  $T_2^*$  valores sin ningún significado al tratar de ajustar una exponencial a los 240 ms de registro.



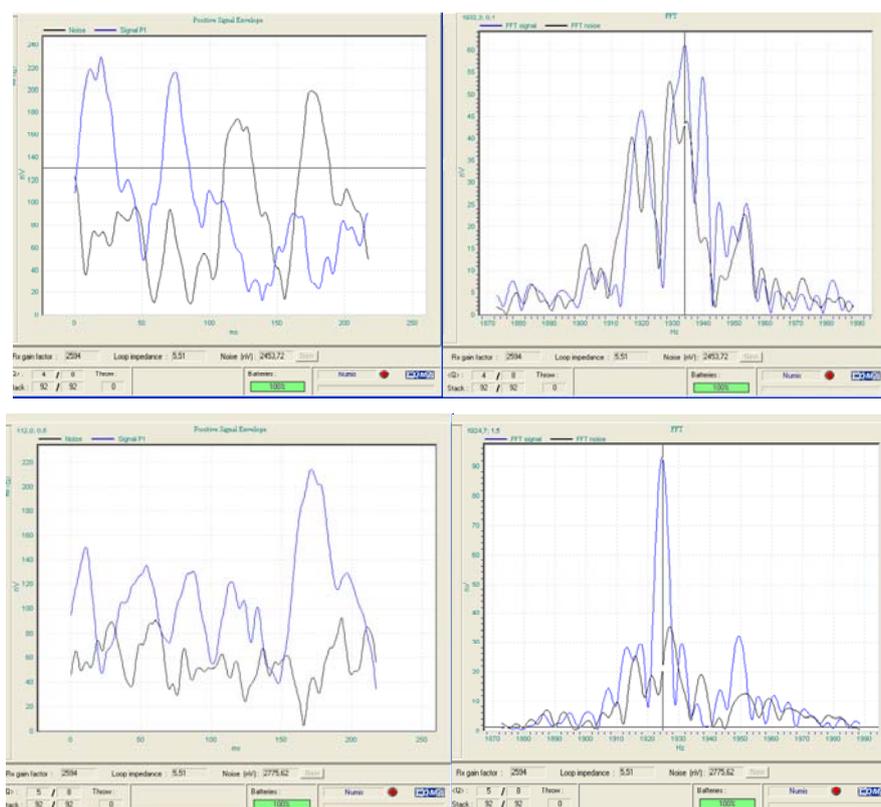
**Fig. 4.12** Curva  $E_0(q)$ , Ruido(q),  $T_2^*(q)$ , fase(q), f(q) y espectros FFT para algunos pulsos del SRM P4. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

La frecuencia de respuesta presenta desviaciones muy importantes para cada momento, lo que hace poner en duda que se haya conseguido la resonancia. Por todas estas razones, a

fin de asegurar la detección de la señal del agua, se procedió a realizar diversas pruebas (Tablas 3.2 y 3.3) para conseguir una antena de mejores características:

- Al suprimir la inductancia suplementaria de 0.8 mH no fue posible conseguir una configuración adecuada de condensadores (se precisarían más de los que proporciona el instrumento NUMIS LITE).
- Para conseguir aumentar la inductancia sin usar la suplementaria, se procedió a probar circuitos con dos vueltas de cable (Figura 4.10 Test2). A la vista del resultado del registro Test1P4 se sintonizó a una frecuencia a 1930.8 Hz efectuando el registro Test2P4 con la emisión de sólo 7 momentos, ya que no fue posible obtener corriente para pasar de 2000 A.ms. Sólo es visible la señal  $e(t)$  del agua en el pulso 3 con 1934 Hz.
- Se intentó hacer un registro con la misma configuración y tres vueltas de cable, así como situando uno de los cuadrados a mayor distancia para evitar fenómenos de inducción mutua. Ninguna de estas pruebas consiguió sintonizar el instrumento y poner en marcha el proceso de emisión de corriente.
- Otra forma de aumentar la inductancia, así como la amplitud de la señal, es aumentar las dimensiones de la antena, si bien con ello se pierde resolución y se incrementa la amplitud del ruido. Se procedió a formar una antena cuadrada de 60 m de lado, haciendo el registro Test3P4, en el que no se consiguió pasar de 500 A.ms (para q4).
- La modificación de la antena a una en forma de ocho con cuadrados de 30 m (Figura 4.10), actuando ambas de emisión-recepción (no utilizando el interruptor de diodos) consiguió la resonancia, efectuándose el registro Test4P4, de ocho momentos de emisión con 92 stacks y sin registrar  $T_1$ , en el que se aprecia (Figura 4.13) señal  $e(t)$  del agua especialmente para los momentos 4 (con 1934 Hz) y 5 (con 1924 Hz y un espectro muy bueno), lo que indica una variación de frecuencia de resonancia muy elevada, quizá justificada por la susceptibilidad magnética de los terrenos.

La conclusión de todos estos experimentos es que no ha sido posible diseñar una antena de las dimensiones más adecuadas (a fin de optimizar la resolución) de acuerdo con la profundidad de investigación deseada. La razón principal ha sido la incompatibilidad de la capacidad de los condensadores del equipo para formar un circuito de resonancia: para 15x15 m no se pudieron adaptar los condensadores necesarios, y para 21x21 m se está al límite de utilización de los condensadores disponibles, obteniéndose una mala distribución de amplitud de los momentos de excitación (Test5P4). Por lo tanto se optó por utilizar la antena formada por dos cuadrados conectados en ocho de 30 m de lado, sin inductancia suplementaria ni interruptor de diodos: ambos bucles son emisores y receptores.

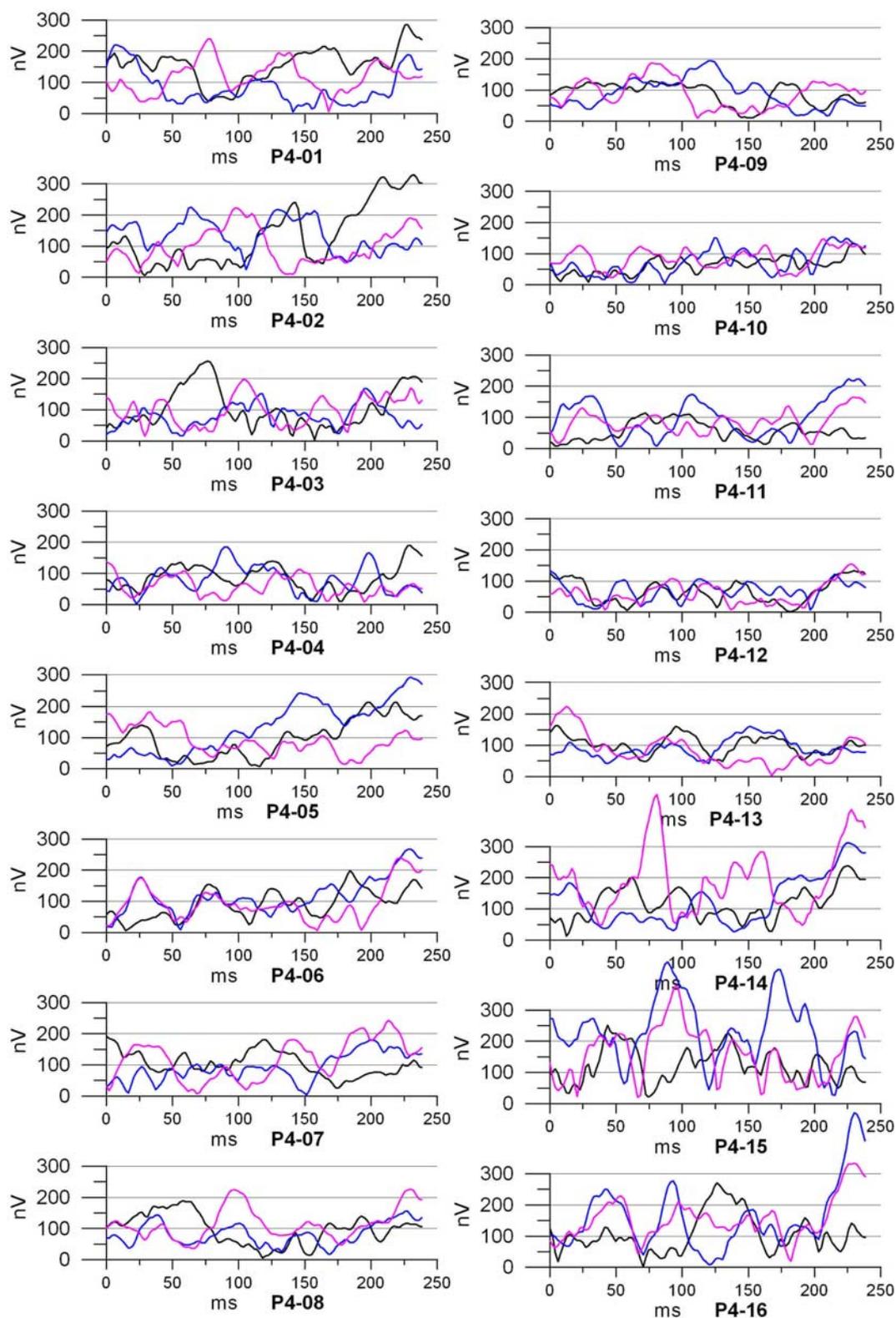


**Fig. 4.13** Señal  $e(t)$  del registro **Test4P4** para los momentos 4 y 5, con sus correspondientes espectros FFT. Curvas recuperadas del fichero **NumisBin.mrs** a través del programa **Prodiviner**.

Con este dispositivo se realizó al día siguiente el nuevo registro **SRMP4** con 16 pulsos y 256 stacks, midiendo el tiempo  $T_1$ , con una duración de ocho horas. El campo magnético es de 45434 nT (al que corresponden 1934.5 Hz), pero se mantuvo la frecuencia de emisión de 1930.8 Hz.

La amplitud de la señal (Figura 4.14) ha aumentado al orden de 100 nV (mayor dimensión de la antena que en los registros anteriores), pero llama la atención que a pesar de la elevada adición de señales (256) y un ruido no excesivo de 2960 nV, el carácter de las curvas  $e(t)$  es muy ruidoso, no apreciándose una clara señal del agua (amortiguación exponencial). Las señales FID1 o FID2 son superiores al ruido para los momentos 2, 5, 6 y 11 a 16, en los que la posible señal tendría un tiempo de relajación inferior a 100-150 ms.

La curva  $E_0(q)$  (Figura 4.15) es amorfa, sin ninguna similitud entre FID1 y FID2; el ruido permanece constante en 2960.8 nV excepto para  $q_{15}$ , el tiempo de relajación es de 1000 ms para casi todos los pulsos, la fase es casi constante y las frecuencias varían aleatoriamente y se sitúan por debajo de los 1920 Hz. Sin embargo, algunos espectros muestran la posible existencia de señal a la frecuencia de resonancia, aunque muy contaminados por ruido, que en ocasiones se solapa a la misma frecuencia.



**Fig.4.14** Curvas  $e(t)$  del SRMP4. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con stack de 256; sin embargo en el fichero binario correspondiente aparecen con 0 stacks, excepto el q5 que tiene 52.

SRM P4 antena 30m

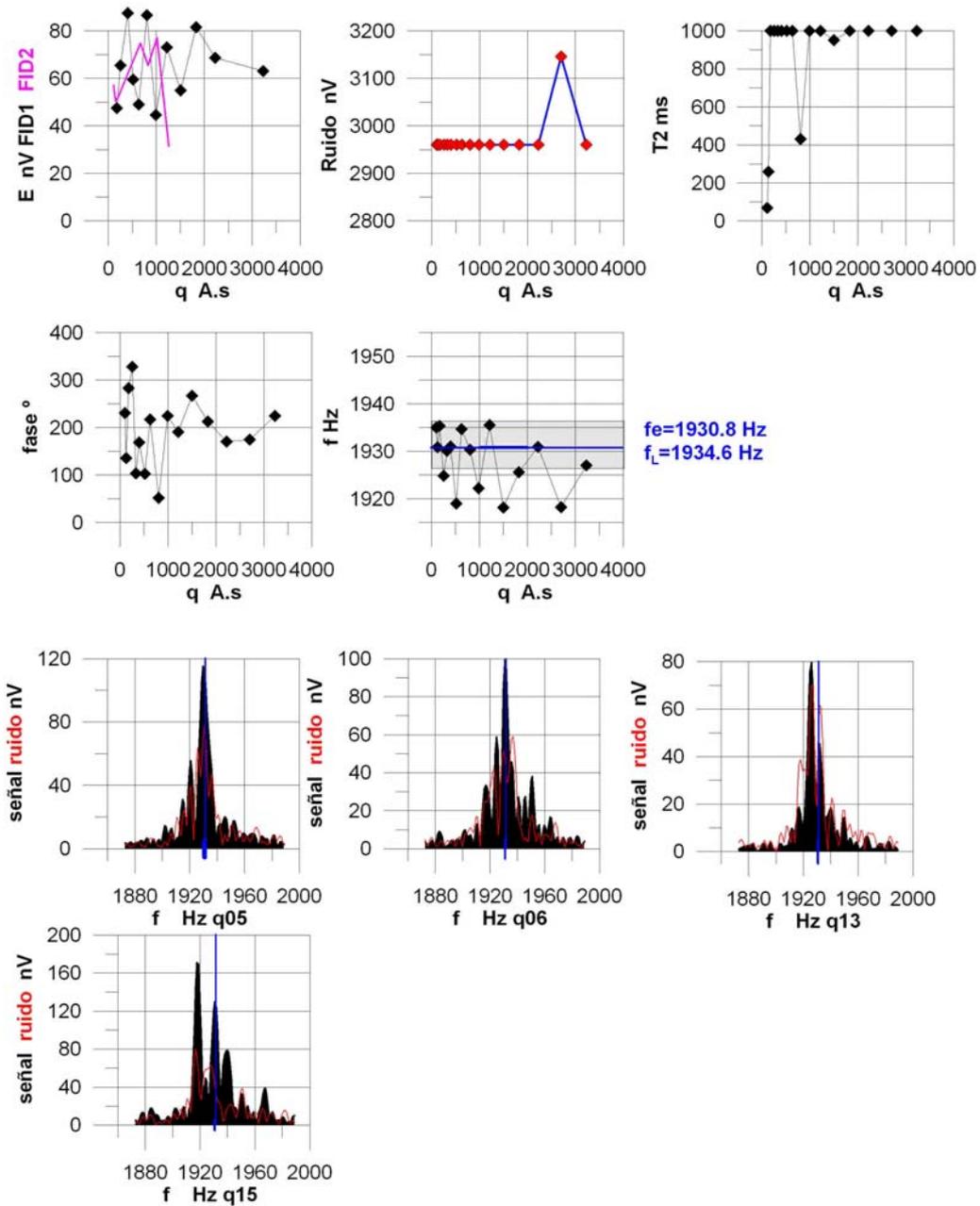
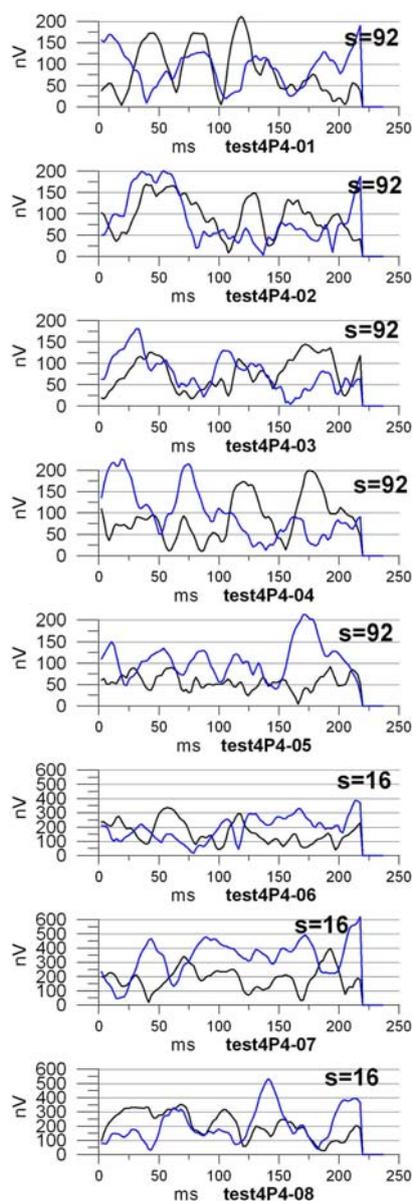


Fig. 4.15 Curva  $E_0(q)$ , Ruido(q),  $T_2^+(q)$ , fase(q), f(q) y espectros FFT para algunos pulsos del SRM P4. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

En definitiva, es un pobre resultado para un registro de 8 h efectuado en un lugar donde hay con seguridad 4 m de zona saturada a 3 m de profundidad, por lo que parece que hay elementos, bien instrumentales bien exteriores, que están distorsionando las mediciones de SRM. En el fichero bin correspondiente a este sondeo se aprecia que puede no haberse producido el stacking (excepto para el q15, con 52 adiciones) de señales, lo que sería la causa de que el ruido permanezca aparentemente inalterado en 2960.8 nV y lo que explica la amplitud de la señal y el alto ruido remanente en los registros. Otra posible anomalía de

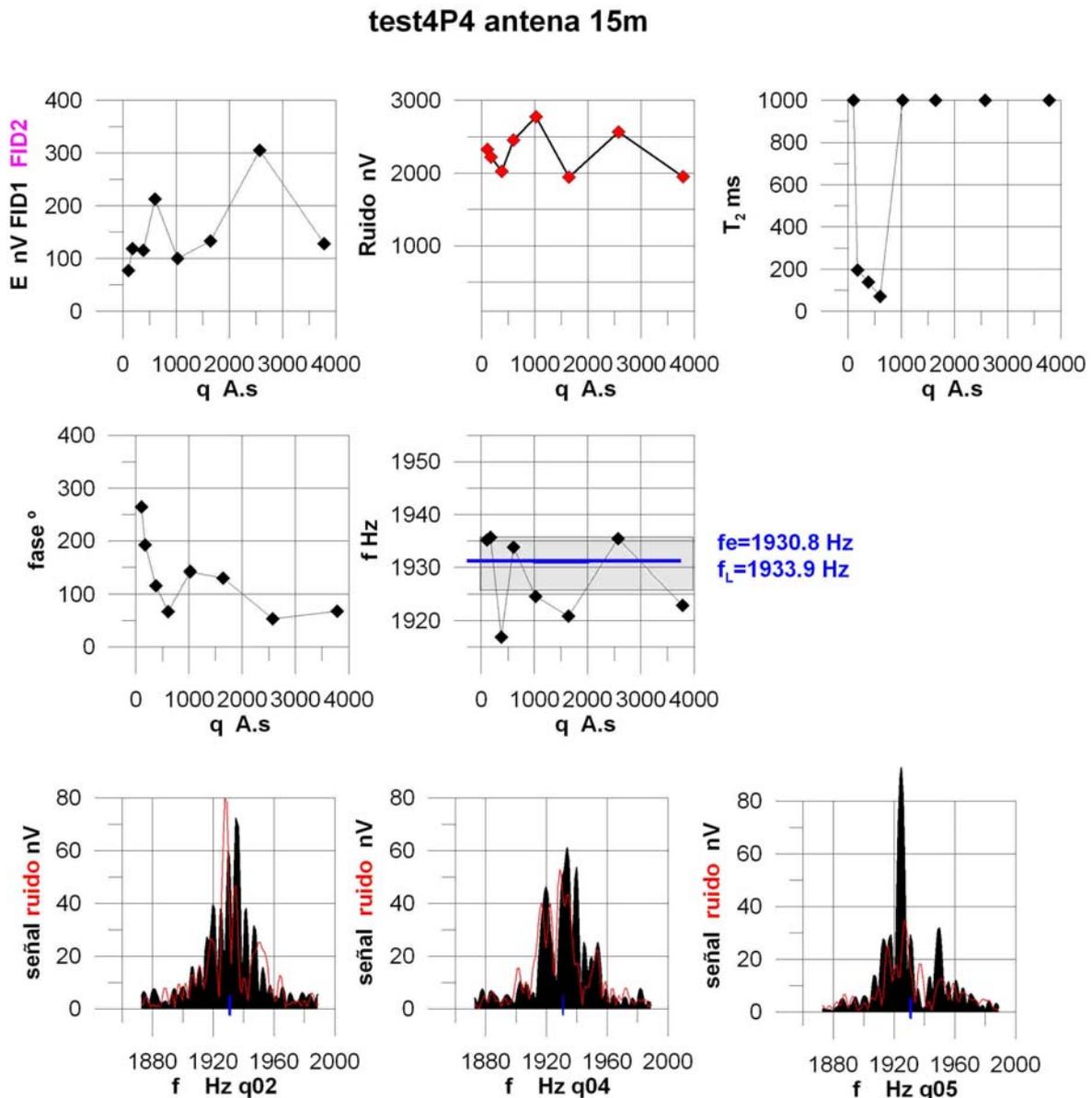
registro es que se efectuó con un límite de aceptación del ruido de 1300 nV, pero sin embargo no aparecen valores rechazados (throw). Este tipo de comportamiento debe achacarse a un fallo en el funcionamiento del programa de adquisición Prodiviner. En consecuencia, no es seguro el utilizar estos datos, por lo que van a utilizarse los del registro **Test4P4**, efectuado con 8 pulsos y stack constante de 92.

Para este registro, la amplitud de las curvas  $e(t)$  (Figura 4.16) se sitúa en los 50-100 nV (su aumento para los tres últimos pulsos se debe al inferior grado de stacking), siendo visible la señal del agua (señal FID1 superior al ruido y decaimiento exponencial) con claridad para q2, q3, q4 y q5, con tiempos de relajación inferiores a 200 ms.



**Fig. 4.16** Curvas  $e(t)$  del test4P4. Azul: señal FID1; Negro: ruido. Todos los momentos tienen 92 apilamientos, excepto los tres últimos (Obsérvese la fuerte variación de amplitud de la señal al disminuir el apilamiento).

La curva de campo  $E_0(q)$  (Figura 4.17) alcanza un máximo de 200 nV con morfología de acuífero somero, no siendo válida para los dos últimos momentos. El ruido se mantiene entre 2000 y 3000 nV y el tiempo de relajación  $T_2^*$  (calculado para los 250 ms de registro) es de 50 a 200 ms para la parte superior, resultando distorsionado en el resto de los pulsos. La fase es muy coherente, indicando claramente la existencia de terrenos de alta conductividad en el basamento del acuífero; la frecuencia sin embargo sigue presentando dispersión elevada, del orden de 5 Hz para los momentos en los que es presumible que existe señal de resonancia. Esta dispersión de las frecuencias puede ser originada por la alta susceptibilidad magnética detectada en este lugar, que como ya fue comentado no tiene explicación en terrenos de esta naturaleza.



**Fig. 4.17** Curva  $E_0(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^*(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del registro Test4P4. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

## SRM L12

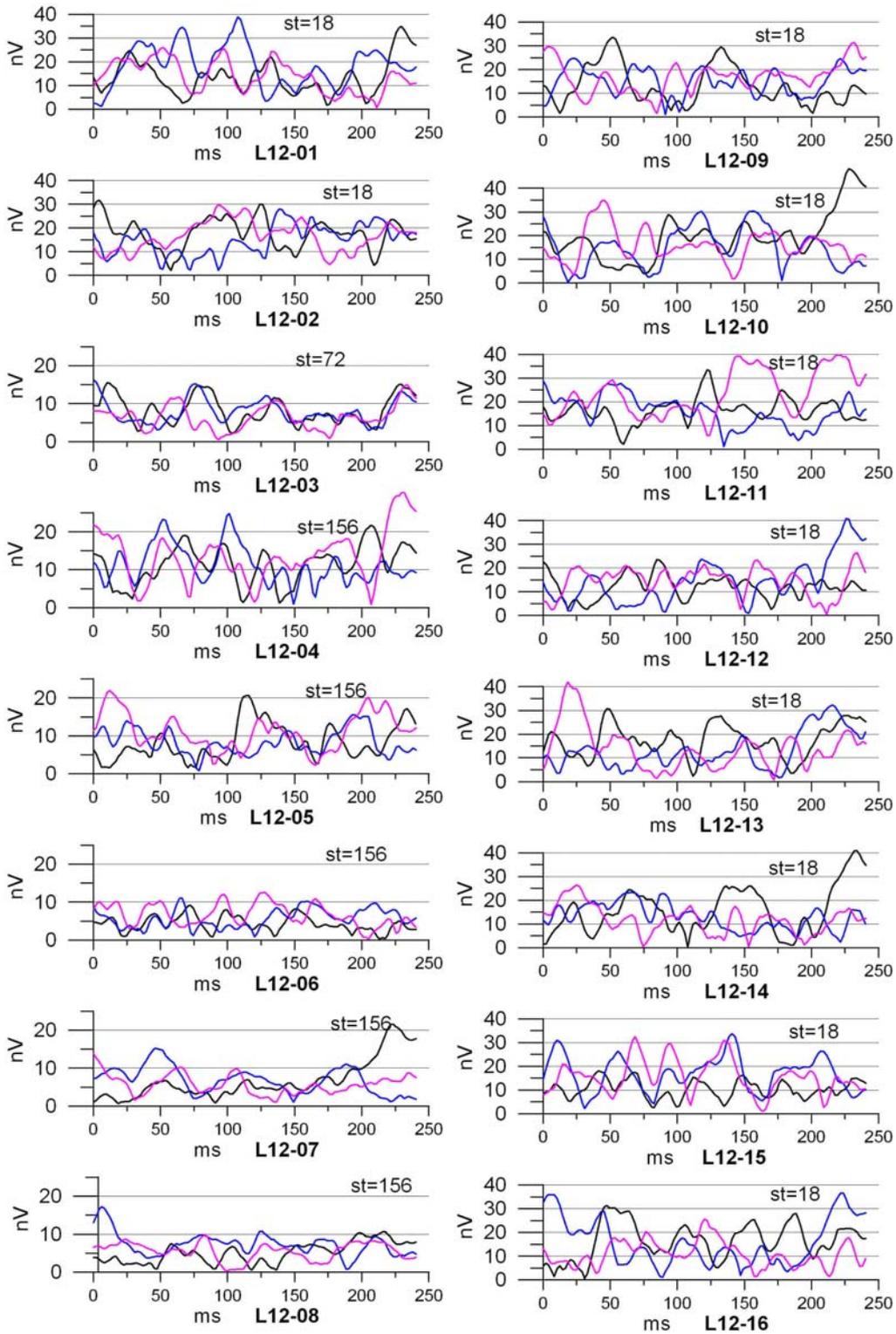
Efectuado junto al SEV L12, donde el perfil eléctrico P4 sitúa el nivel de arcillas a 5 m de profundidad, pudiendo existir una zona saturada de agua superior a los 3 m de potencia. La susceptibilidad magnética de los terrenos es  $140 \times 10^{-5}$  SI. La intensidad de campo magnético es 45440 nT, con frecuencia de Larmor de 1935 Hz, aunque se emitió a 1932 Hz porque se encontró mejor resonancia. Se utilizó una antena en forma de ocho de 30 m de lado.

Tras efectuar un primer registro (Test1L12 con 18 stacks), se procedió a registrar el sondeo completo durante casi 3 horas, añadiendo señales hasta 72 stacks para q3 y hasta 156 para q4 hasta q8, para los que cabe esperar la máxima señal. Esta técnica de registro puede proporcionar datos distorsionados y alterar el resultado de la inversión al no ser el nivel de Señal/Ruido equiparable en todos los registros; por otra parte, se ha observado que el software de comando del instrumento (Prodiviner) no siempre modifica los ficheros data correspondientes cuando se pretende ampliar el apilamiento, quedando los registros con modificación del stack sólo archivados en el fichero binario Numisbin.mrs; por esta razón se ha procedido a recuperar los ficheros data para los momentos q3 a q8 a partir del fichero bin correspondiente.

En las curvas  $e(t)$  (Figura 4.18) se aprecia que los valores son en general inferiores a 20 nV, mejorando la relación señal/ruido al aumentar el apilamiento. Sólo se aprecia posible señal de resonancia para los momentos q5, q7 y q8, con tiempos de relajación menores de 100 ms. En el momento q11 la amplitud de la señal es también superior al ruido, y puede aceptarse un decaimiento exponencial, pero con tiempos superiores a los 250 ms. En los espectros de frecuencia (Figura 4.19) se aprecia la existencia de señal de resonancia, aunque con frecuencias variables (1934 Hz en q05, 1928 Hz en q8, 1927 Hz en q11), y además solapada con ruido de la misma frecuencia, y en ocasiones mostrando varios picos de señal a frecuencias más dispares (p.e. 1945 Hz en q11).

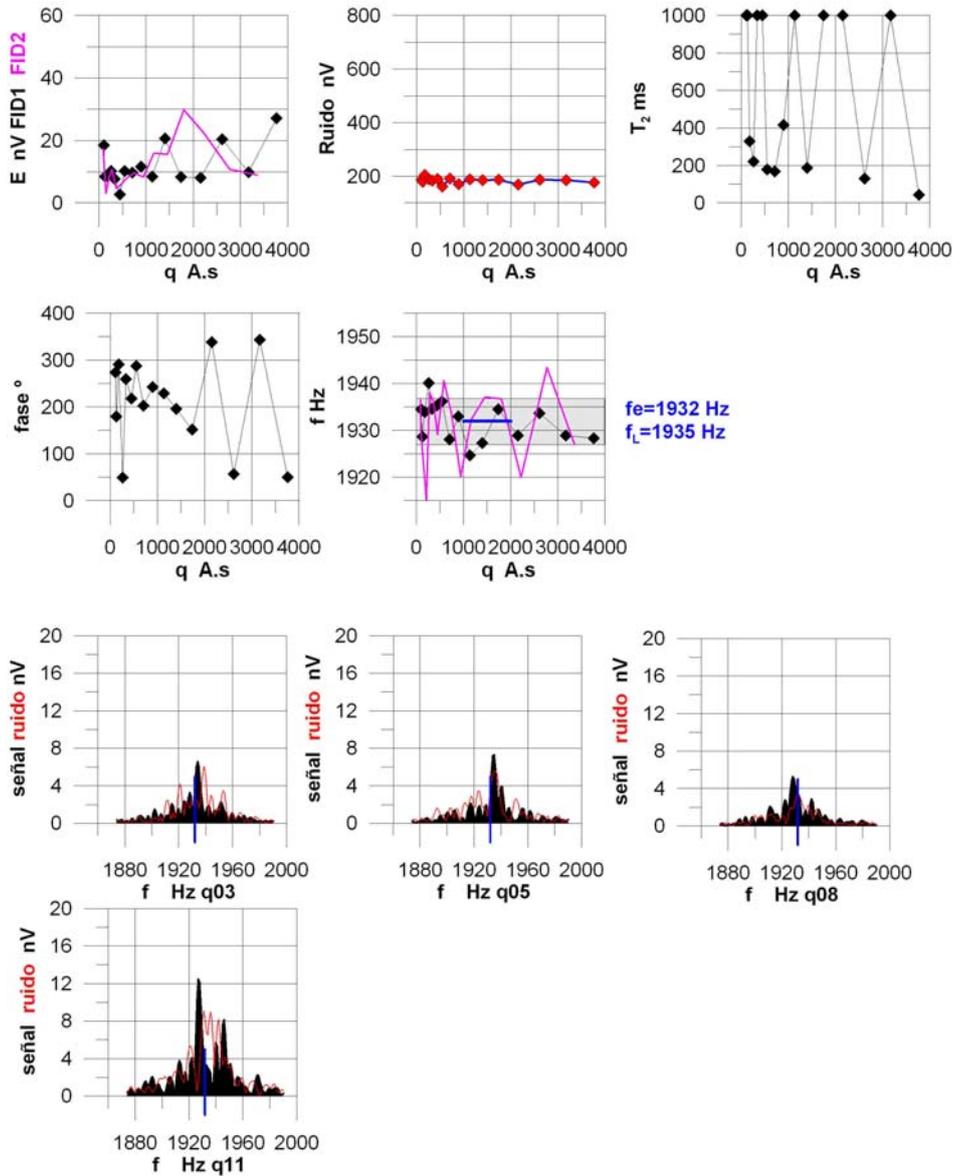
La curva de campo  $E_0(q)$  (Figura 4.19) es amorfa y caótica, sin similitud entre FID1 y FID2, a lo que con toda seguridad ha contribuido el registro con stack variable: la señal máxima para los registros obtenidos con 156 stacks se sitúa agrupada entorno a los 10 nV (prácticamente el umbral de ruido instrumental), mientras que para momentos registrados con sólo 18 adiciones oscila entre 8 y 20 nV. El ruido permanece entorno a los 200 nV y el tiempo de relajación transversal  $T_2^*$  toma valores inferiores a los 200 ms cuando resulta aceptable para el ajuste a los 250 ms, indicativo de arenas de tamaño medio. La fase tiene tendencia de disminuir, en congruencia con la litología arcillosa del basamento, y la

frecuencia, que se agrupa en los 1935 Hz para los registros con mayor stack, oscila entre 1927-1934 para el resto.



**Fig. 4.18** Curvas  $e(t)$  del SRML12. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con stack variable de 18 a 156, indicado para cada momento por  $st=xx$ .

SRM L12 antena 30m



**Fig. 4.19** Curva  $E_0(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^+(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del SRM L12. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

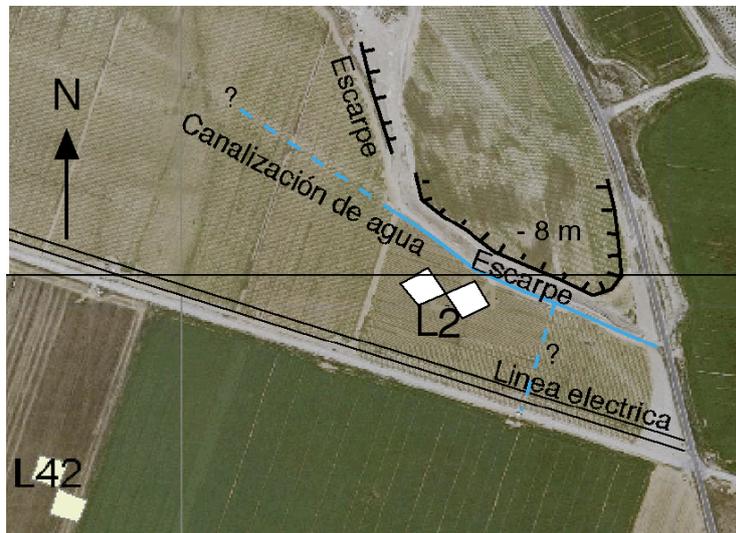
El ruido existente, inferior a 200 nV, no justifica que no se haya recuperado bien la señal de resonancia. El resultado es de imposible inversión. Solo la existencia de muy poca cantidad de agua (porosidad muy pequeña) y en una matriz muy arcillosa pueden justificar valores tan bajos de amplitud de la posible señal y de tiempos tan cortos de relajación en las curvas  $e(t)$ ; en definitiva, parece ocurrir que se estén dando simultáneamente las dos principales circunstancias que impiden la detectabilidad del agua: amplitud de señal por debajo del umbral de ruido del instrumento y tiempo de relajación inferior al tiempo de conmutación de la antena. La dispersión de la frecuencia pudiera también ser una indicación de presencia de minerales magnéticos en los sedimentos.

## SRM L2

Se utilizó una antena en forma de ocho, con dos cuadrados de 30 m de lado, dispuesta paralela a la línea eléctrica próxima (Figura 4.10 y Figura 4.20), aunque no estaba operativa o al menos no se percibió su influencia. La susceptibilidad magnética es  $312 \times 10^{-5}$  SI. El SEV L2, en el perfil eléctrico P2, sitúa las arcillas a 9 m de profundidad, pudiendo existir un nivel saturado de unos 3-4 m de potencia. La intensidad de campo magnético es de 45441 nT, correspondiente a la frecuencia adoptada de emisión de 1935 Hz.

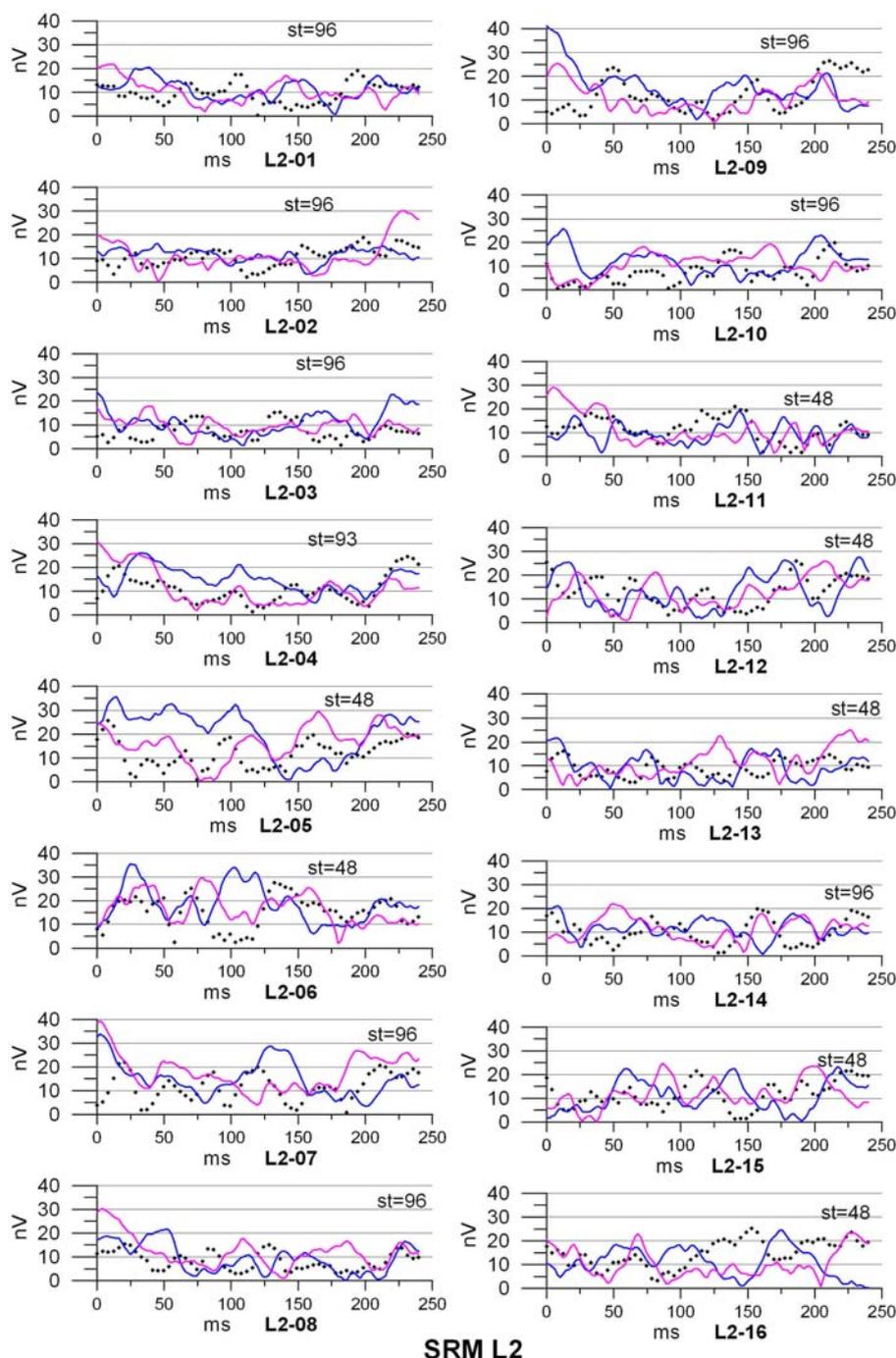
Se realizó el Test1L2, con 30 adiciones, ampliándose en el registro SRML2 a 96 para q1 a q4, q7 a q10 y q14, quedando el resto con 48 adiciones. Esta variación de adición de señales, como se comentó en el SRML12, puede distorsionar el resultado de la inversión. Por otra parte, los ficheros data no han acumulado esta variación de stacking, que si ha quedado registrada en el correspondiente fichero binario, de donde se han recuperado los datos.

La duración total de las mediciones en este emplazamiento fue superior a las 5 horas, debido a la presencia de maquinaria agrícola (cosechadora de tomates) funcionando, por lo que hubo que esperar a su finalización para evitar la interferencia del ruido electromagnético en los registros.



**Fig. 4.20 Detalle de la posición del SRM L2.**

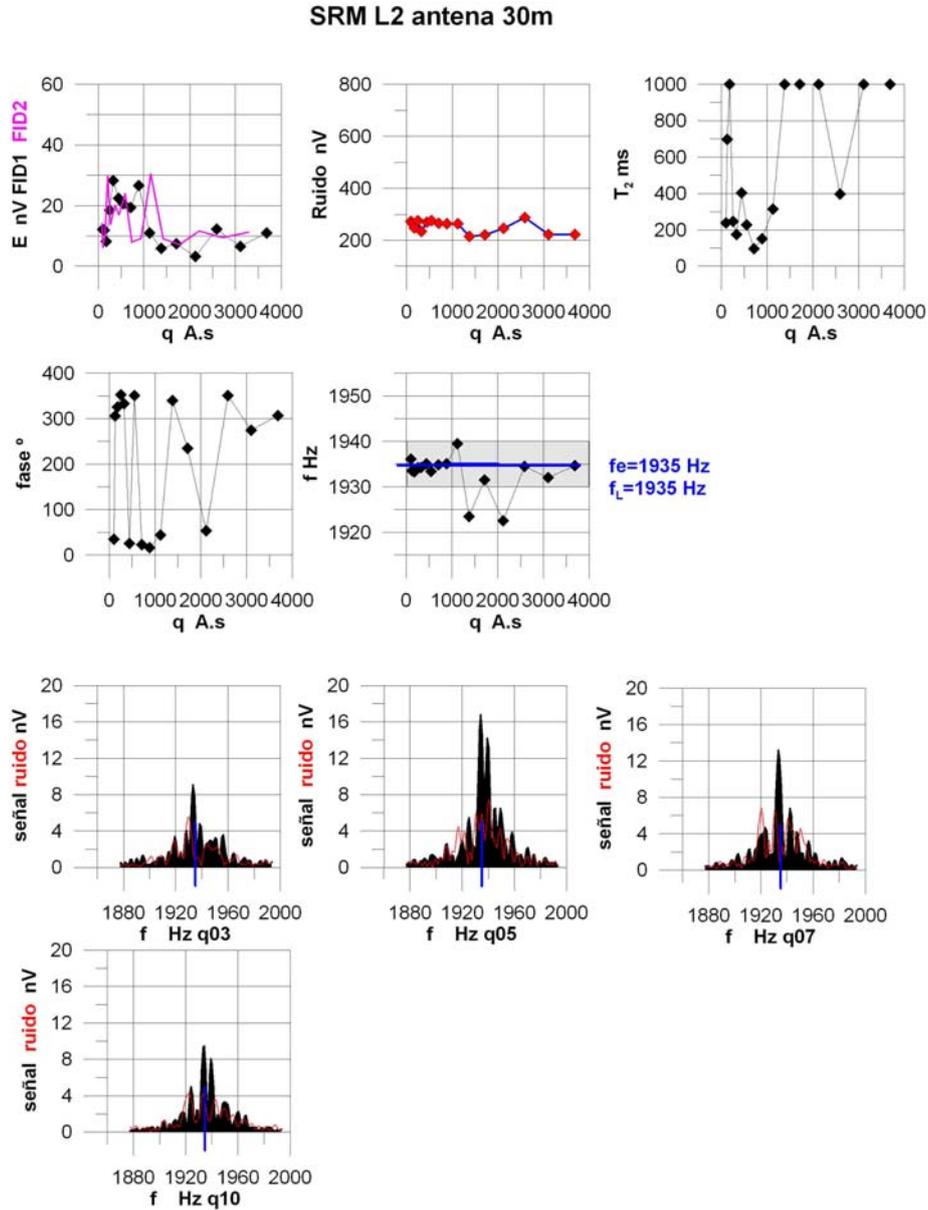
Se observa clara señal  $e(t)$  del agua (Figura 4.21) desde q3 hasta al menos q11, corroborada por los espectros FFT (Figura 4.22), aunque la variación de stacks hace variable la relación señal/ruido. La amplitud es pequeña, no llegando a 40 nV nada más que para algunos pulsos (q7 a q10), con tiempos de relajación inferiores a 200 ms.



**Fig. 4.21** Curvas  $e(t)$  del SRML2. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con *stack variable* de 48 a 96, indicados para cada momento por  $st=xx$ .

La curva  $E_0(q)$  resultante (Figura 4.22) tiene morfología perteneciente a acuífero somero, con similitud entre FID1 y FID2, y puede ser invertida eliminando los momentos finales, para los que la frecuencia indica la no presencia de señal. El ruido permanece entorno de los 300 nV y el tiempo de relajación transversal  $T_2^*$  es de 100-300 ms, indicando materiales de granulometría arenas-gravas gruesas. La fase es algo caótica, con gran alternancia de uno a otro pulso y las frecuencias se mantienen iguales a la de resonancia para los primeros y últimos pulsos. Los espectros FFT corroboran la existencia de resonancia, con una ligera

desviación respecto de la frecuencia de emisión de 1935 Hz y dando picos para 1933 y 1939 Hz; esta circunstancia podría ser debida a la existencia de un gradiente magnético a escala de tamaño de grano, por la presencia de minerales magnéticos en la formación.



**Fig. 4.22** Curva  $E_o(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^+(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del SRM L2. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

Se hace también notar la presencia de una conducción enterrada de agua, dentro del volumen afectado por el campo de excitación, por lo que no se descarta una posible contribución a la señal recibida, aunque no es suficiente para justificar la misma, que es debida fundamentalmente a la existencia de agua en el subsuelo.

## SRM L27

Situado en las proximidades del SEV L27 (Figura 4.23), en el que las arcillas se encuentran entre los 4-5 m de profundidad. Se utilizó una antena en ocho de 30 m de lado. Con campo magnético de 45415 nT ( $f_L = 1933.8$  Hz), emitiéndose a 1935 Hz.

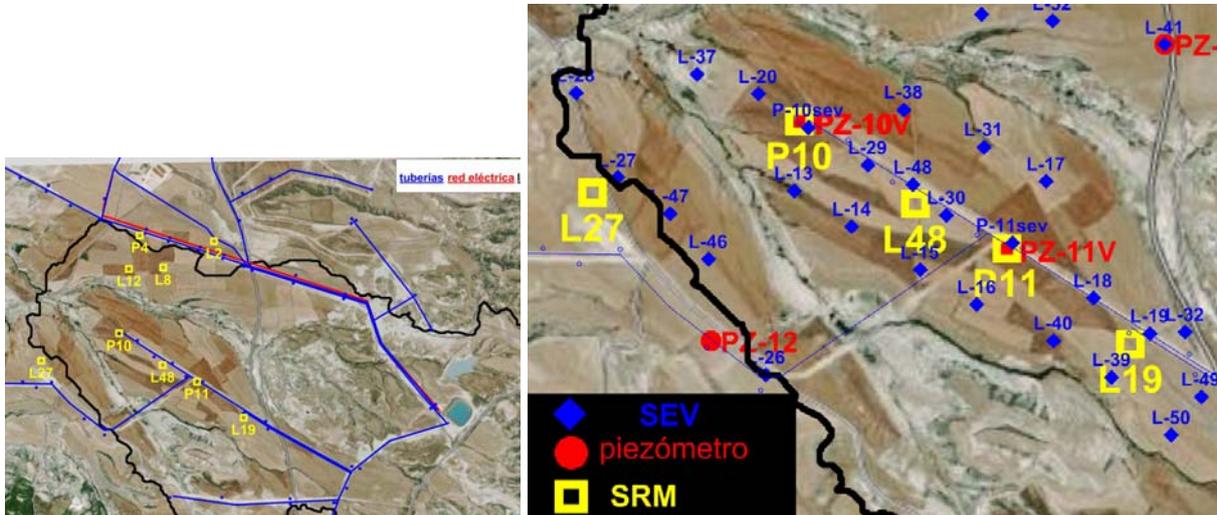


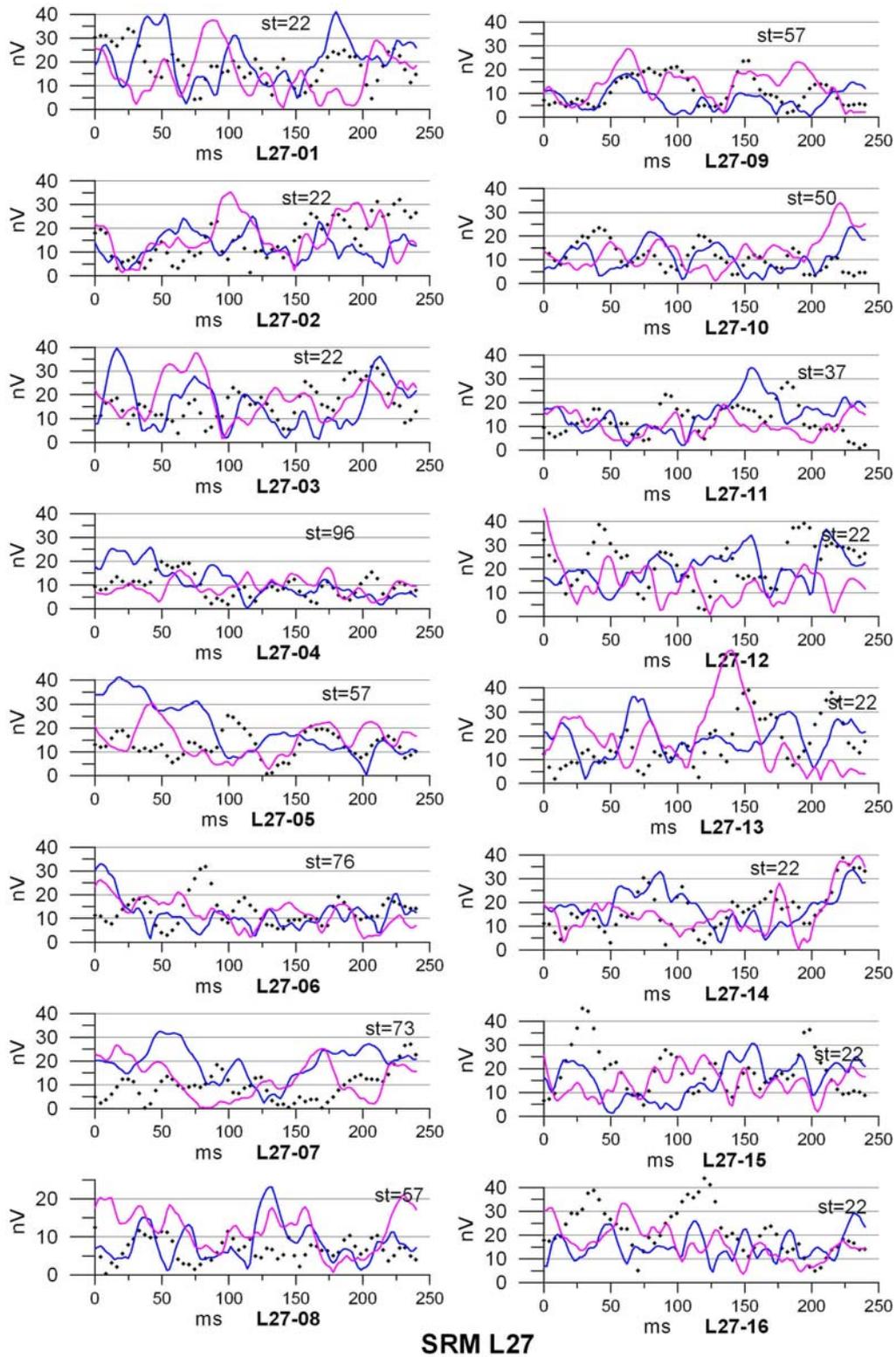
Fig. 4.23 Posición general y de detalle del SRM L27

Tras efectuar el registro Test1L27 con 22 stacks, se procedió a ampliar la adición de señales desde el momento q4 al q11 con stack variable de 50 a 96 en el registro SRML27, cuyos ficheros data no recogieron esta ampliación de apilamiento, resultando iguales a los del registro Test1L27. Por esta razón los datos utilizados en este análisis han sido recuperados del fichero Bin del registro SRML27, en el que si han quedado acumulados los nuevos pulsos. Esta es una anomalía producida por el software de adquisición Prodiviner. Durante el registro tuvo lugar una tormenta con aparato eléctrico, que aparentemente no influyó en el nivel de ruido de los registros.

Se aprecia (Figura 4.24) una clara señal de resonancia  $e(t)$  desde q4 hasta q7 (y q8 para FID2), con un nivel de señal máxima por debajo de 40 nV; los espectros de frecuencia (Figura 4.25) corroboran esta señal, aunque con cierta dispersión (1933 a 1940 Hz). El tiempo de relajación  $T_2^*$  es inferior a 150-200 ms.

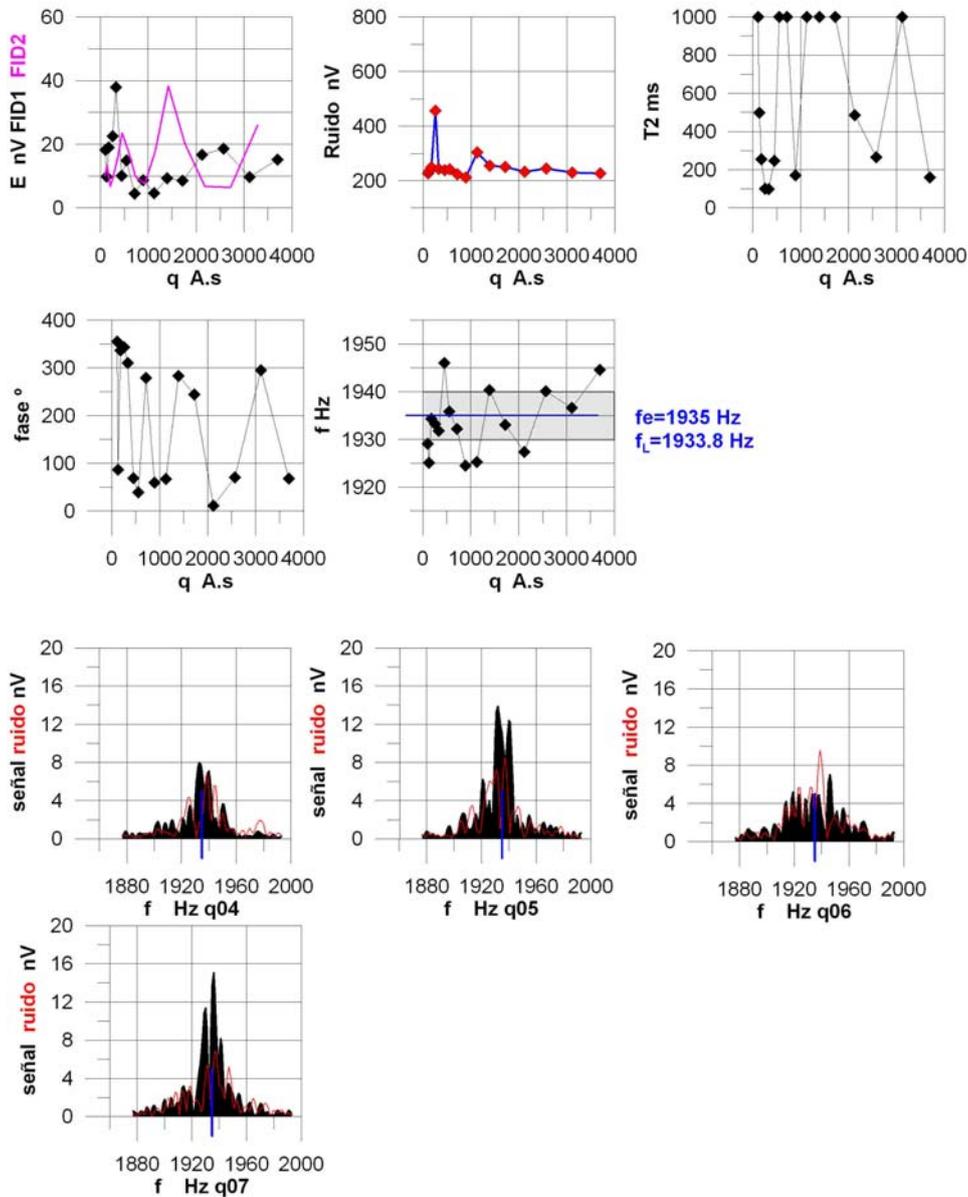
La curva  $E_0(q)$  (Figura 4.25) tiene aceptable coherencia así como cierta similitud entre FID1 y FID2 para los primeros pulsos, con morfología de acuífero somero, siendo la elevación para los últimos pulsos debida a un efecto fantasma. El ruido se mantiene estable entorno de los 200-300 nV y el tiempo de relajación  $T_2^*$  en la zona más somera es del orden de los 100-300 ms, indicador de granulometrías medias-gruesas. Los valores de 1000 ms son

efecto de un ajuste indebido a los 250 ms de registro y a la ausencia de señal de resonancia para los momentos superiores.



**Fig. 4.24** Curvas  $e(t)$  del SRML27. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con stack variable de 22 a 96, indicados para cada momento por  $st=xx$ .

SRM L27 antena 30m



**Fig. 4.25** Curva  $E_0(q)$ ,  $Ruido(q)$ ,  $T_2^*(q)$ ,  $fase(q)$ ,  $f(q)$  y espectros FFT para algunos pulsos del SRM L27. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

La variación de fase con el momento es bastante caótica, aunque con tendencia a la disminución, como corresponde a la existencia de terrenos de baja resistividad. La frecuencia presenta también dispersión, aunque corresponde aceptablemente a la de resonancia para los primeros pulsos.

En su conjunto, este registro puede ser utilizado para inversión, aunque el stacking variable puede distorsionar los resultados.

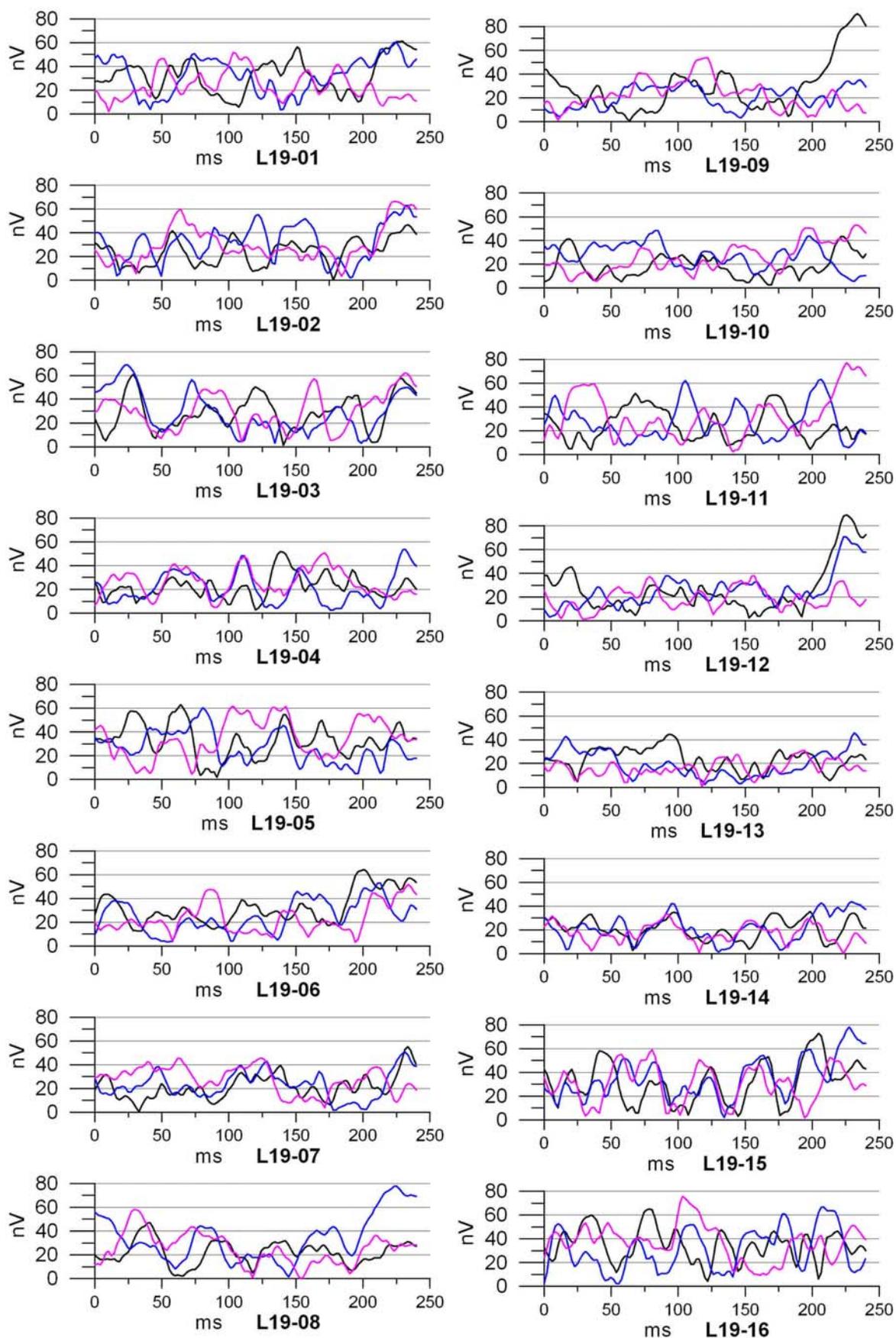
## SRM L19

Situado entre los SEV L19 y L39 (Figura 4.23), donde las arcillas se localizan a 9 y 8 m respectivamente. La intensidad de campo magnético es 45410 nT (1933.5 Hz), manteniéndose la frecuencia de emisión de 1935 Hz. El registro se realizó con lluvia a partir de momento q12, empleando una antena de dos cuadrados de 30 m de lado conectados en ocho. Se midieron 16 momentos, comenzando con 56 stacks y cambiado a 96 stacks para mejorar la relación señal/ruido. Sin embargo, en el fichero binario no se muestra el stack efectuado, salvo para q16 con 42 apilamientos, aunque los ficheros data son idénticos a los recuperados a través del fichero Bin. Por otra parte, los ficheros data para q4, q6 y q7 no coinciden con los bin, habiéndose por lo tanto utilizado los recuperados del fichero Bin.

La señal  $e(t)$  (Figura 4.26) se mantiene por debajo de 30 nV, no siendo visible señal de resonancia; para los momentos q8, 10, 11 y 13 podría considerarse la posible existencia de señal, en el sentido de que su amplitud es algo superior al ruido, lo que está medianamente confirmado, sobre todo para q7 y q10, por los espectros de frecuencia, que presentan varios picos entre 1930 y 1940 Hz para los demás momentos (Figura 4.27).

El nivel de ruido (Figura 4.27) se mantiene constante en 660 nV hasta el pulso q15, lo que significa que, por un posible fallo en el sistema de adquisición, realmente no se ha producido apilamiento ni en los ficheros data ni en el binario.

La curva  $E_0(q)$  es amorfa, con valores en el orden de los 20 nV. El tiempo de relajación para los momentos menores es del orden de 100-200 ms, perteneciente a granulometrías medias. La fase indica la baja calidad del registro y la frecuencia se mantiene en la de resonancia para la mayoría de los pulsos.



**Fig. 4.26** Curvas  $e(t)$  del SRML19. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con stack variable de 56 a 96, aunque figuran con apilamiento cero en el correspondiente fichero binario.

SRM L19 antena 30m

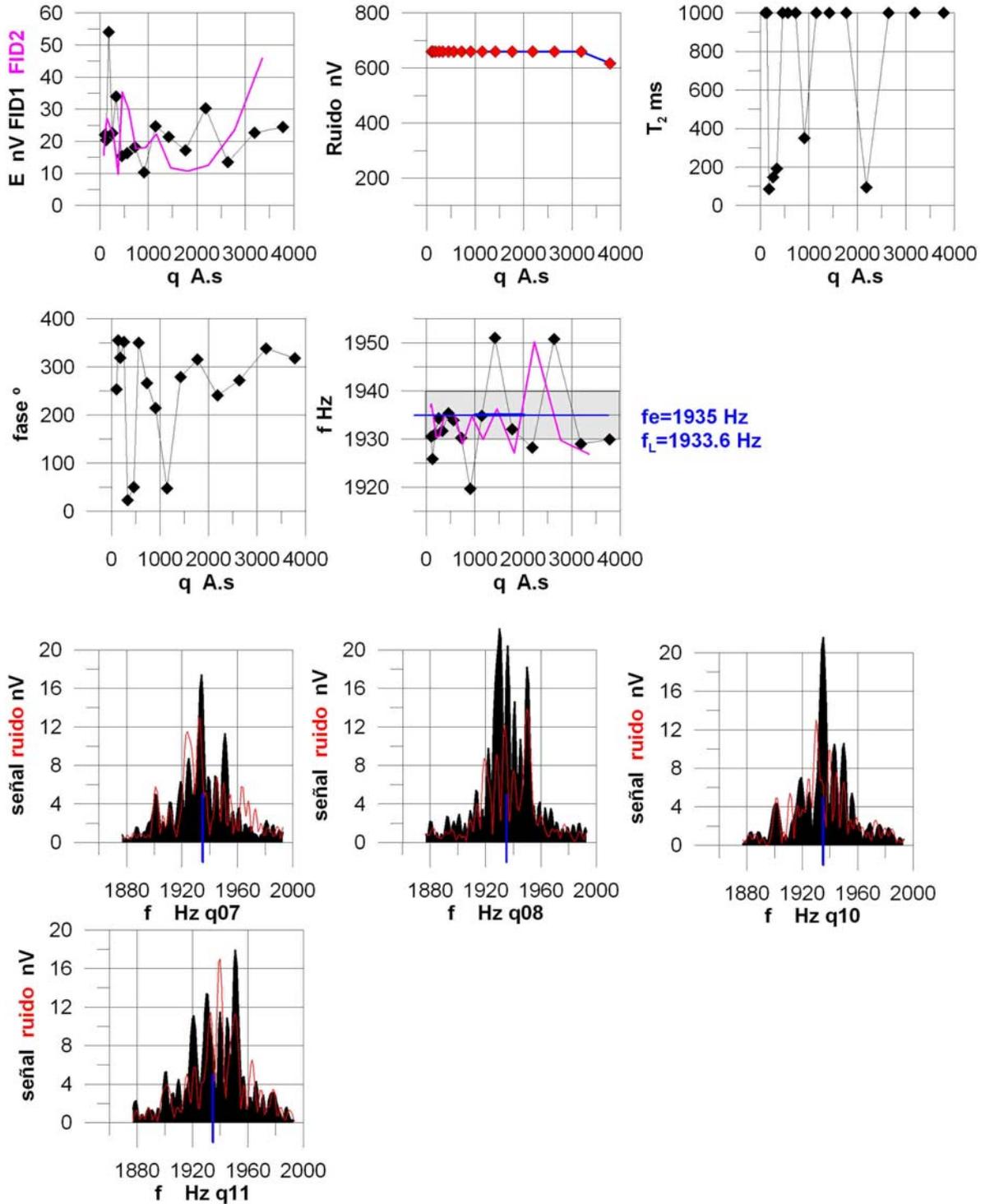


Fig. 4.27 Curva  $E_o(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^*(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos momentos del SRM L19. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

En consecuencia, los datos de campo de este SRM son de dudosa interpretación, ya que es posible que se hayan obtenido solamente con unas pocas adiciones.

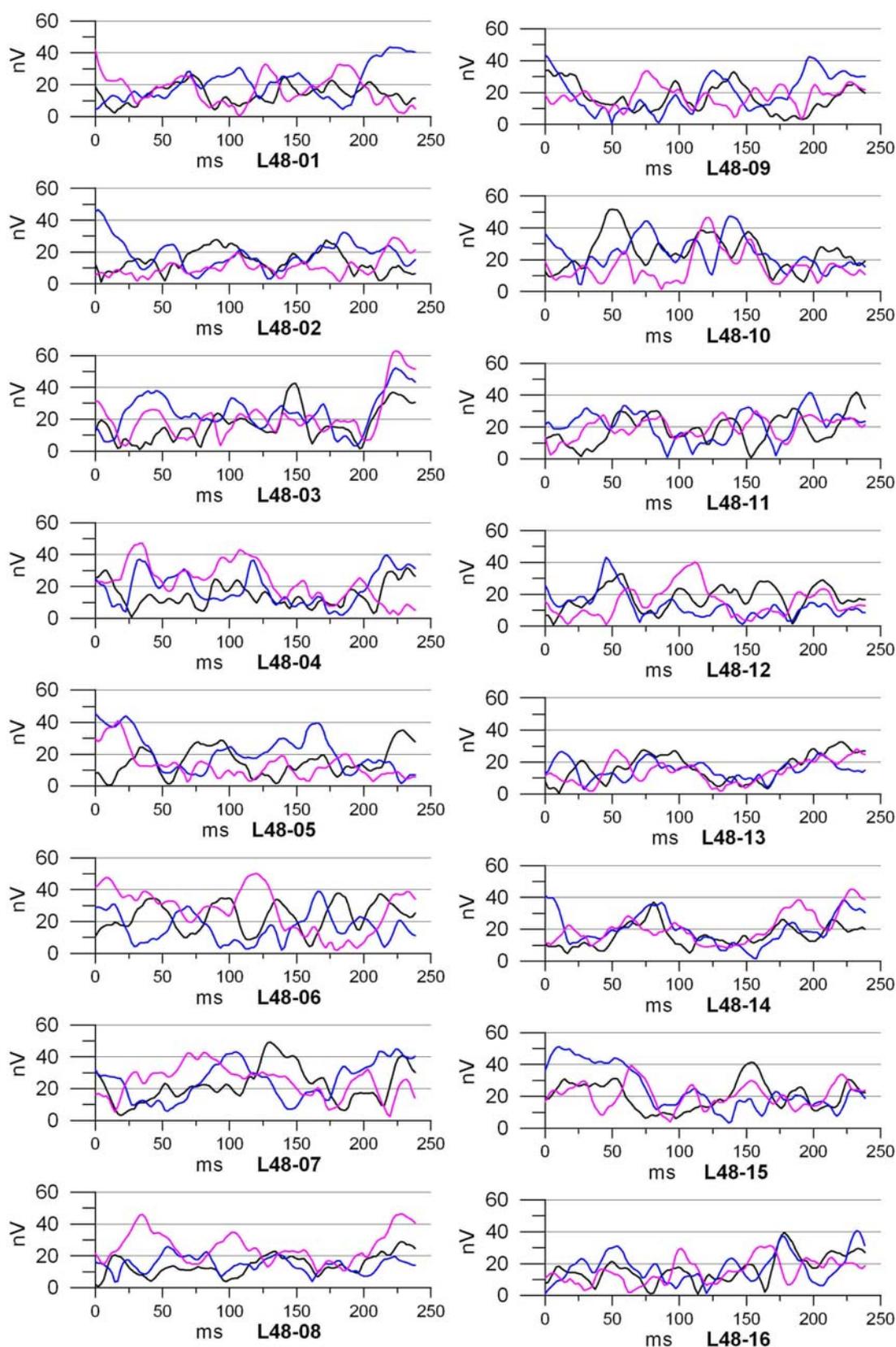
## SRM L48

Situado entre los SEV L48 y L30 (Figura 4.23), donde las arcillas se localizan a 8 m de profundidad. El campo magnético vale 45425 nT (1934 Hz), aunque la frecuencia de emisión se situó en 1930.8 Hz por mejor sintonía con el terreno. La susceptibilidad magnética es pequeña, del orden de  $97 \times 10^{-5}$  SI, por lo que no debería afectar a las mediciones. En la cercanía de la antena hay una arqueta y caseta de conducción de agua.

Con antena en ocho de 30 m de lado se registraron 16 momentos con stack uniforme de 72. Sin embargo, en el fichero bin solo aparecen con 72 adiciones desde el pulso q12 al q16, apareciendo con cero adiciones en el resto, lo que coincide con la no variación del ruido para todos esos pulsos (Figura 4.29); como ocurrió en el SRM L19, es posible que haya habido un fallo de apilamiento durante el registro.

Podría identificarse la existencia de señal de resonancia  $e(t)$  para los momentos q2, q5 y q6 (Figura 4.28), siendo también visible para q15, con amplitud máxima inferior a los 20 nV. Si existe señal, el tiempo de relajación es inferior a 100 ms. Los espectros FFT (Figura 4.29) muestran sin embargo varios picos (1928-1934 Hz para q=2; 1925-1933 Hz para q=5), siendo más uniformes para otros pulsos (1932 -1934 Hz para q=2 y 15).

La función  $E_0(q)$  (Figura 4.29) es incoherente, con valores inferiores a 20 nV, en el límite del ruido instrumental; el ruido exterior permanece fijo en 336.5 nV hasta el pulso q11, lo que indica algún fallo en el sistema de registro; el tiempo de relajación  $T_2^*$  tiene valores de 100-200 ms, aunque con poca fiabilidad por su variación a 1000 ms incluso para los primeros pulsos; la fase es indicativa de baja calidad del registro, y la frecuencia es la de emisión para los primeros pulsos, oscilando posteriormente a valores de 1934 Hz y siendo caótica para momentos superiores al 10.



**Fig. 4.28** Curvas  $e(t)$  del SRML48. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con stack de 72, aunque figuran con apilamiento cero en el correspondiente fichero binario, excepto los pulsos q12 a q16, que aparecen con 72 apilamientos.

SRM L48 antena 30m

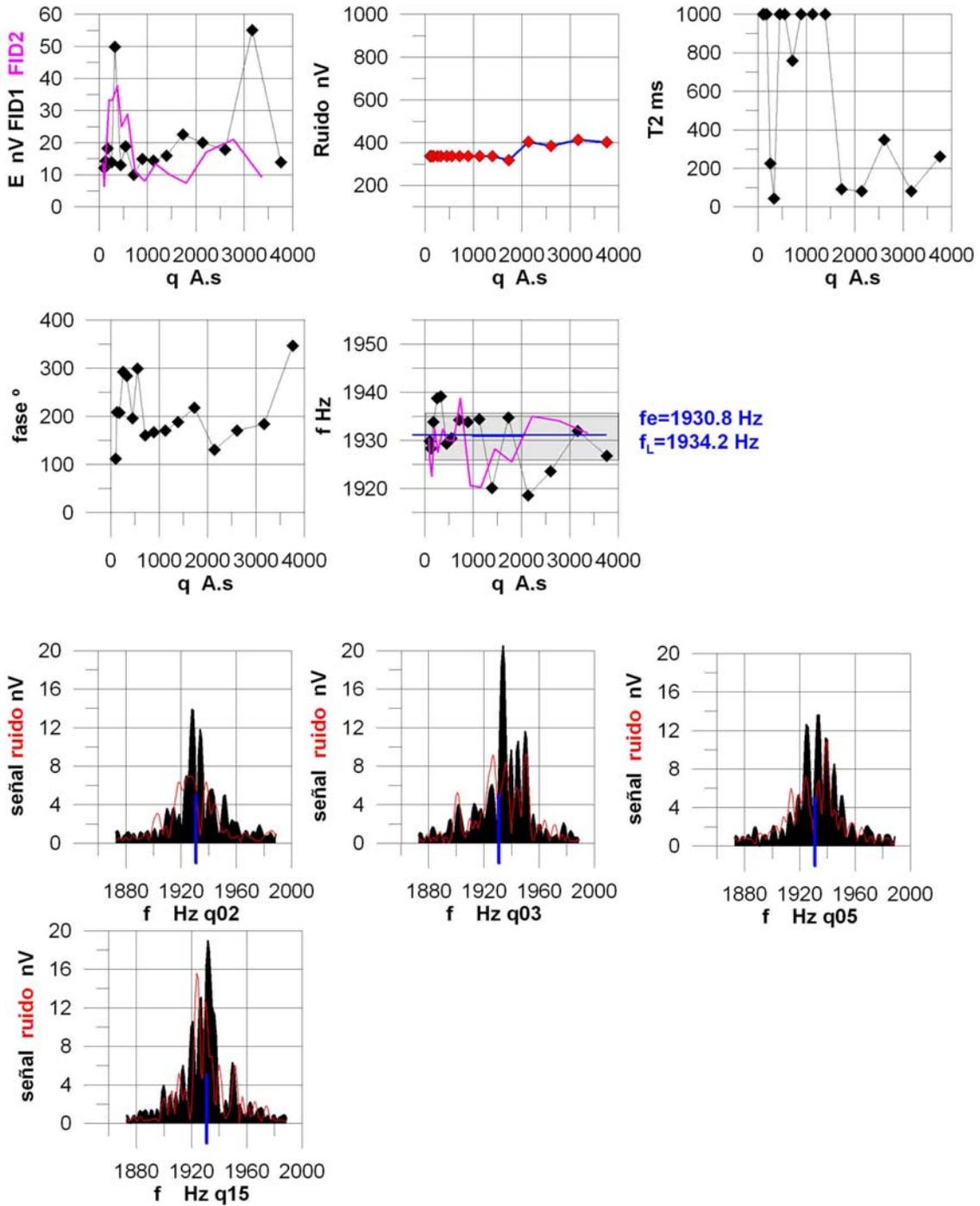
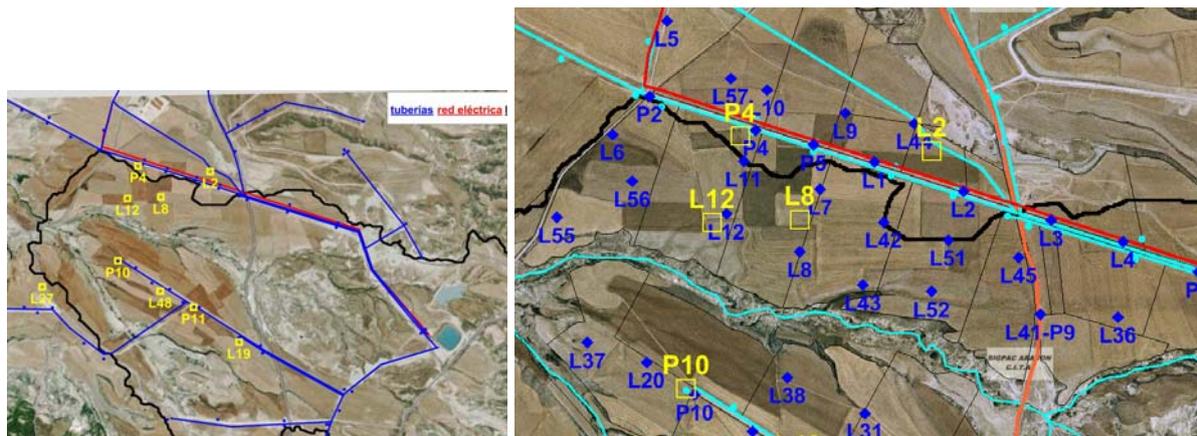


Fig. 4.29 Curva  $E_0(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^*(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos pulsos del SRM L48. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

Debido a las mismas observaciones de anomalía de registro que el SRM 19, la posibilidad de inversión de este SRM resulta dudosa.

## SRM L8

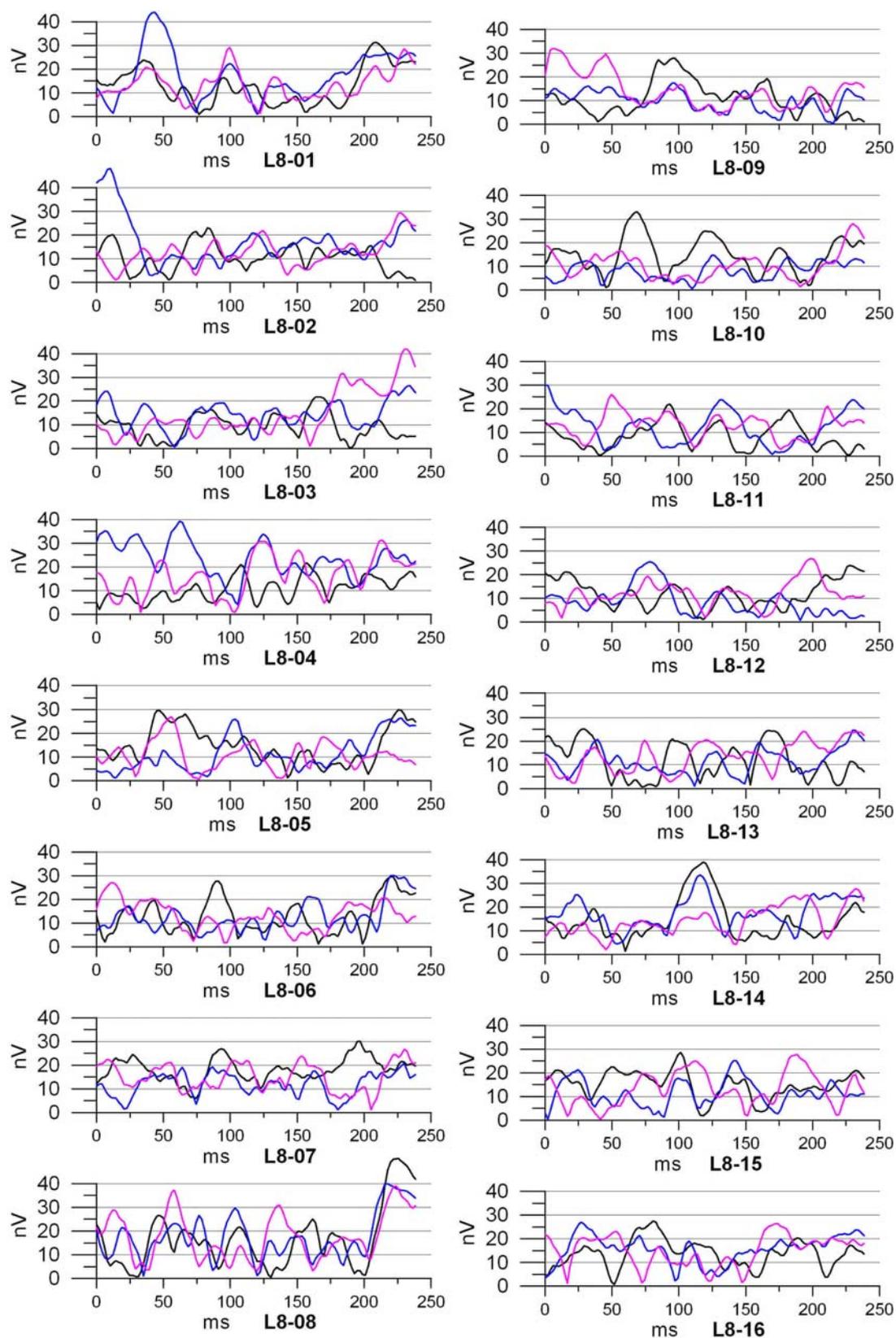
Situado junto al SEV L8 (Figura 4.30), en el que se detectan las arcillas a 6 m de profundidad. Con intensidad de campo magnético de 45420 nT (1934 Hz), se mantiene la emisión en 1930.8 Hz por mejor sintonía con el terreno. La susceptibilidad magnética es algo elevada, del orden de  $343 \times 10^{-5}$  SI. Se utiliza antena en ocho de 30 m de lado por cuadrado, con emisión de 16 pulsos y 72 stacks, excepto para los dos últimos momentos, que se registran con 48 adiciones.



**Fig. 4.30** Posición general y de detalle del SRM L8

La señal de resonancia es solo apreciable en las curvas  $e(t)$  (Figura 4.31) para los momentos q2, q3 y q4, con notable mayor amplitud de la señal respecto del ruido, y en menor medida para q9 y q11.

La curva  $E_0(q)$  (Figura 4.32) es amorfa, tanto para FID1 como para FID2, con amplitud muy pequeña, inferior a 10 nV, que es el umbral de ruido instrumental; el ruido externo es estable entorno a los 280 nV y el tiempo de relajación  $T_2^*$  para la zona menos profunda es del orden de los 100 ms, indicando la posible presencia de materiales más arcillosos. La fase, algo caótica, tiende en general a disminuir y la frecuencia de respuesta de la mayoría de los pulsos está más próxima de la teórica (1934 Hz) que la usada en emisión, mostrando los espectros de los momentos q2, q3 y q4 buena agrupación para 1934, 1932 y 1935 Hz respectivamente; para el pulso q9 la dispersión es mayor (1929-1933 Hz).



**Fig. 4.31** Curvas  $e(t)$  del SRML8. Azul: señal FID1; Rosa: señal FID2; Negro: ruido. Los registros se han efectuado con *stack* 72, excepto q15 y q16 que tienen 48.

SRM L8 antena 30m

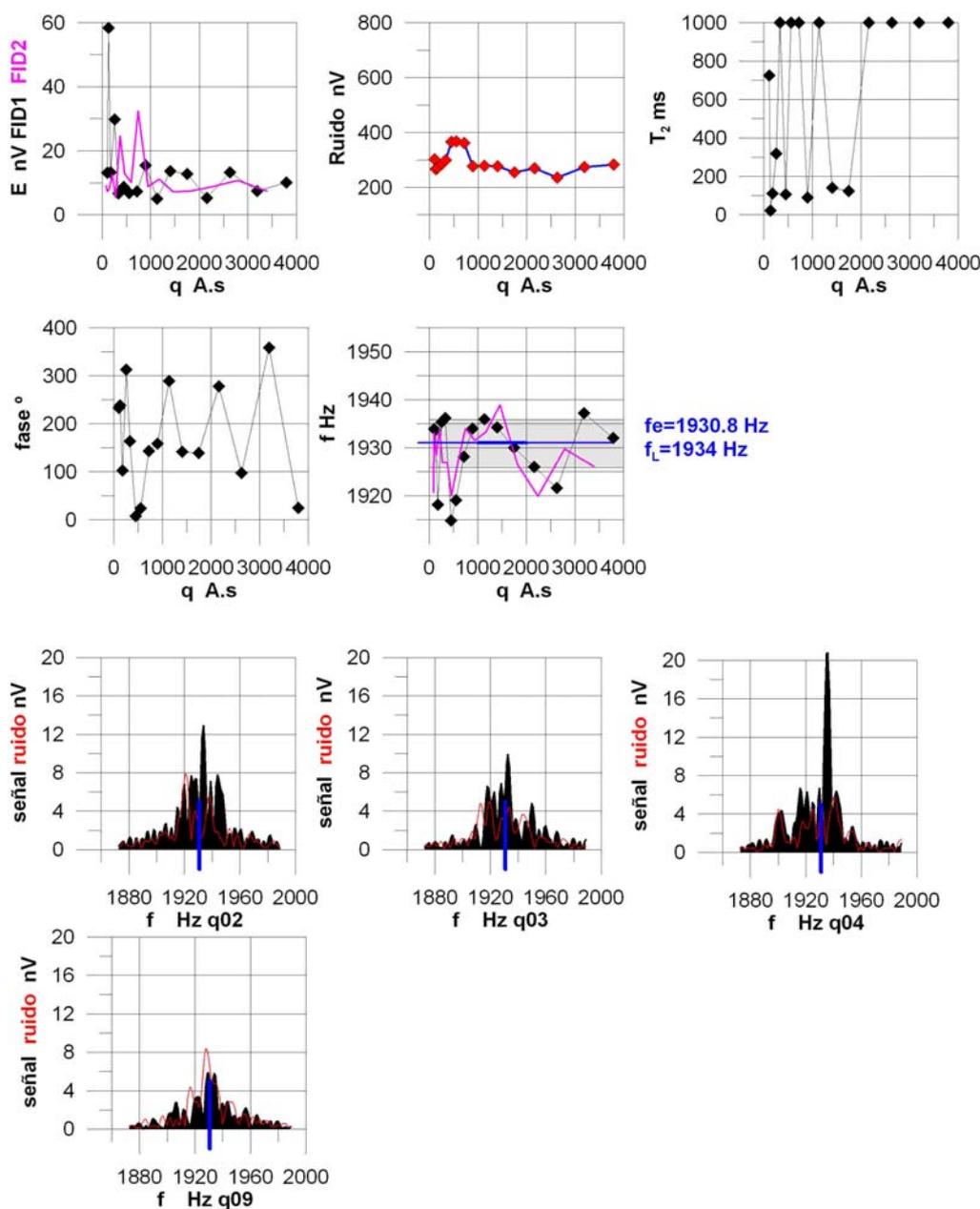


Fig. 4.29 Curva  $E_0(q)$ , Ruido( $q$ ),  $T_2^+(q)$ , fase( $q$ ),  $f(q)$  y espectros FFT para algunos pulsos del SRM L8. En la curva de frecuencias se indica la frecuencia de emisión y una ventana (zona gris) de  $\pm 5$  Hz; en los espectros se indica igualmente la frecuencia emitida (banda azul).

La baja amplitud de la señal en este registro, junto con la elevada dispersión de las posibles frecuencias de resonancia hace poco viable la inversión de este SRM.

### 5. Conclusiones del análisis

La Tabla 5.1 sintetiza algunas características del análisis de los datos de campo. La potencia de la capa saturada (Pagua), nivel freático (nf) y profundidad del basamento impermeable (Pbas) está en metros, y se han obtenido de los piezómetros y de la interpretación de los SEV próximos. La columna e(t) significa si se aprecia claramente señal de resonancia (amplitud superior al ruido y decaimiento exponencial) o no se aprecia en las curvas de campo del SRM considerado; para la curva de  $E_0(q)$  la columna "forma" indica si se observa morfología coherente con algún tipo de acuífero, y la columna nV se refiere a la amplitud media de los valores; la columna "des frec Hz" indica la desviación media de las frecuencias recibidas respecto a la de emisión.

SRM	Pagua	nf	Pbas	e(t)	E <sub>0</sub> (q)		des frec Hz
					forma	nV	
P10	0,9	4	5	no	si	<40	>10
P11	1,8	5	7	no	si	20-40	>10
P4	4,1	3	7	no	no	>40	>10
L12			5	no	no	10	<5
L2			9	si	si	20-40	<3
L27			5	si	si	<20	>5
L19			9	no	no	<20	<5
L48			8	si	no	<15	<5
L8			6	si	no	<10	<10

**Tabla 5.1 Síntesis del análisis.**

- El objetivo de esta prospección es detectar la presencia de capas saturadas de 0.5 a 4 m de potencia, con un nivel freático del orden de 3-5 m, estando la base impermeable constituida por arcillas muy conductoras entre 5 y 9 m de profundidad.
- Para esta profundidad de investigación sería en principio suficiente utilizar antenas de menos de unos 10 m de lado, con las que además se conseguiría la máxima resolución empleando 16 pulsos de excitación.
- Por razones instrumentales (configuración del circuito de resonancia), no ha sido posible utilizar antenas de menos de 30 m de lado. Con esta dimensión, sigue siendo posible obtener una resolución métrica dentro de la profundidad de investigación, y detectar tanto el nivel freático como la base del acuífero.
- El análisis de los datos registrados pone de manifiesto que sólo en los sondeos L2, L27, L48 y L8 es claramente visible que la señal es superior al ruido y tiene decaimiento exponencial; en el resto es más dudoso, y en cualquier caso existiría con tiempos de relajación inferiores a 150 ms.
- Las curvas  $E_0(q)$  son en general amorfas (no se identifica algún tipo de patrón, como los mostrados en la Figura 2.3), con excepción de las obtenidas para los SRM P10,

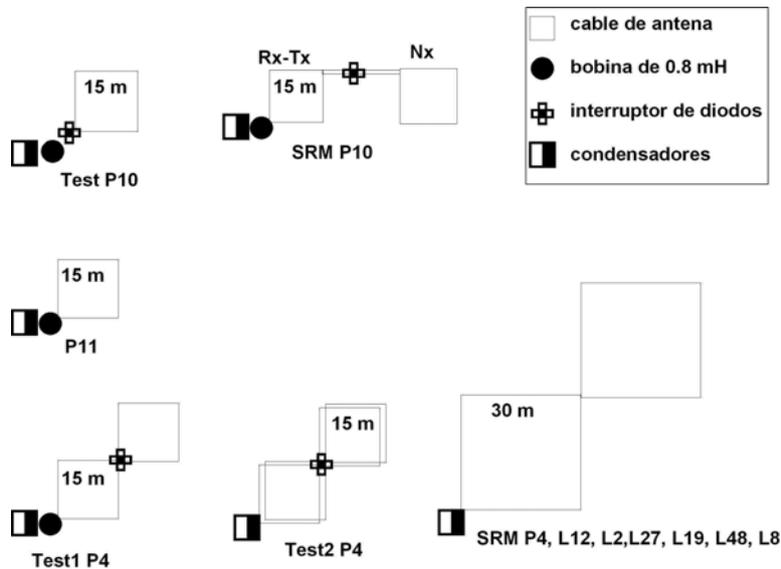
P11, L2 y L27. A esta falta de morfología puede contribuir el que el apilamiento de pulsos efectuado no sea el mismo para todos los momentos de excitación.

- La amplitud máxima  $E_0$  es en general inferior a 20 nV, e incluso del orden de 10 nV en algunos sondeos. Este bajo valor, aunque viene en parte condicionado por las dimensiones de la antena, es atribuible a un bajo contenido en agua dentro del volumen de investigación.
- La frecuencia presenta una gran oscilación de un pulso de excitación a otro, con desviaciones respecto de la de resonancia que llegan a ser hasta de 5 Hz para los SRM L12, L2, L27, L19 y L48; para el resto de los sondeos, y para algunos momentos de los mencionados, la desviación es superior a los 10 Hz.
- Esta oscilación de la frecuencia se refleja netamente en los espectros FFT de las señales  $e(t)$ , indicando que aún en los casos en los que es más clara la existencia de señal resonante, ésta presenta cierto carácter multifrecuencial.
- De este análisis cabe deducir que se dan una serie de circunstancias que no favorecen la detectabilidad de la señal de resonancia: poca cantidad de agua, posibles tiempos de relajación inferiores a 100-150 ms (baja permeabilidad) y existencia de materiales con susceptibilidad magnética media-alta (variación de frecuencias).
- Se han producido ciertas anomalías en el registro: al intentar aumentar el apilamiento de un registro ya grabado, sólo se realiza en el fichero binario, pero no en los data. Por otra parte, en algunos registros es posible que no se ha producido apilamiento.
- Aunque en su conjunto la calidad de los datos de campo es mala, haciendo prácticamente no viable una inversión fiable de los mismos, se va a efectuar su proceso por el programa Samovar v.6, para tratar de mejorar las curvas  $e(t)$  con la aplicación de filtros, así como para verificar si la limitación del tiempo de ajuste de una exponencial proporciona mejores valores de la constante de relajación y sobre todo de la amplitud máxima inicial  $E_0$ .

## 6. Cálculo de las matrices para el proceso de inversión

En la Figura 6.1 se representa un esquema de las diferentes antenas empleadas, tanto en las medidas de test como en las definitivas.

Para los SRM P10 y P11 la antena emisora está constituida por un cuadrado de 15 m de lado, cuya inductancia se ha aumentado uniendo en serie la bobina de 0.8 mH, no siendo por lo tanto seguro que el proceso normal de cálculo de las matrices (Nmr.exe) sea aplicable; en recepción, el SRM P10 ha utilizado también la antena remota Nx, que sólo ha recibido el ruido. Por lo tanto, en ambos casos se puede considerar que se ha empleado una bobina cuadrada de 15 m de lado. En el resto de los SRM se ha utilizado una antena con dos cuadrados de 30 m conectados en ocho, lo que no presenta ningún problema para el cálculo de las matrices correspondientes.



**Fig. 6.1 Diferentes tipos de antenas utilizadas**

Según la situación de los SRM en los perfiles geoelectrónicos de 2010, se ha optado por el siguiente modelo del subsuelo (Tabla 6.1) para el cálculo de todas las matrices de inversión:

capa	Resistividad Ohm.m	Profundidad inferior
1	200	4
2	100	7
3	10	25
4	3	60

**Tabla 6.1 Modelo geoelectrónico adoptado para el cálculo de las matrices de inversión.**

Los demás parámetros empleados son los siguientes:

- Frecuencia  $f = 1934$  Hz
- Intensidad de campo geomagnético  $B = 45400$  nT
- Inclinación de campo geomagnético  $I = 56^\circ$
- Máximo momento de los pulsos emitidos  $q_{\max} = 4000$  A.ms

Con los que se han calculado las siguientes matrices:

**LERMAC15.mrm**: antena cuadrada de 15x15 m

**LERMA830.mrm**: antena en ocho de 30x30 m

Para el posterior proceso con la aplicación Samovar v.11 es necesario calcular de nuevo la matriz, denominada **Lerma830Samv11.mrm**.

## 7. Criterios para efectuar la inversión de los datos de campo

### 7.1 Criterios de calidad y resolución

En el análisis de los datos de campo se ha establecido una serie de conclusiones, basadas en los parámetros obtenidos con la totalidad del tiempo registrado, sobre la calidad de los datos y su viabilidad para ser sometidos a un proceso de cálculo numérico con fiabilidad del resultado. Como parte del proceso de inversión de los datos, a las curvas de campo  $e(t)$  se les aplica un filtrado seleccionando la longitud del registro, lo que puede mejorar su calidad, con la consiguiente modificación de la función  $E_0(q)$ , que también puede mejorar su morfología respecto de la obtenida con los datos brutos.

Por otra parte, debido al ruido instrumental, la amplitud de señal detectable tiene un límite que puede situarse entorno a los 10 nV, aunque el stacking de señales puede reducirlo a 3-5 nV. Para estimar la calidad de un SRM procesado pueden utilizarse los siguientes criterios relacionados con el ruido:

- La comparación del nivel del ruido externo después del stacking y filtrado (EN) y el ruido instrumental (IN). Cuando la señal es muy pequeña, debe efectuarse un stacking hasta que  $EN/IN \approx 1$ , es decir, hasta que la señal (+ruido) sea por lo menos de la misma amplitud que el ruido instrumental. Si se da esta condición, el SRM puede considerarse de buena calidad desde el punto de vista instrumental, aunque no se detecte señal. Si  $EN/IN < 1$  no puede aceptarse el sondeo.
- Los datos pueden considerarse de calidad aceptable (en el sentido de que es posible que exista señal de resonancia) si la relación  $S/N > 2$ , es decir, si la amplitud de la señal+ruido es al menos dos veces superior al ruido ambiental. Sólo en estas condiciones puede hacerse una interpretación cuantitativa o inversión fiable. Si  $S/N > 2$  no es necesario que  $EN/IN \approx 1$ .
- Si  $S/N \leq 1$ , aunque  $EN/IN \approx 1$ , no se ha detectado señal (no porque no la haya, sino porque está por debajo del nivel mesurable), por lo que no puede hacerse interpretación cuantitativa con fiabilidad.
- Si la relación  $S/N \approx 1$  y  $EN/IN > 1$ , lo único que puede concluirse es que la señal SRM es igual o inferior al nivel de ruido, no siendo el sondeo de calidad aceptable para su inversión cuantitativa. Por ejemplo, si  $EN/IN = 5$  pero  $S/N = 1$ , si existiera señal sería inferior a 25 nV (para  $IN = 5$  nV). Si  $S/N \approx 1$  lo único que es factible es una interpretación cualitativa, estimando la máxima cantidad de agua que es posible que exista en el volumen investigado, sin garantizar su existencia.

En resumen, los criterios de calidad en función del ruido se sintetizan en la Tabla 7.1:

EN/IN	S/N	Validez del SRM
<1	≈ 1	No válido; por debajo de la precisión instrumental
cualquiera	>2	Válido para interpretación cuantitativa
cualquiera	<1	No hay señal
>1	≈ 1	Sólo es posible una interpretación cualitativa

**Tabla 7.1 Criterios de calidad**

Teniendo en cuenta estos criterios, todos los datos registrados van a ser sometidos a un proceso de filtrado e inversión, a fin de evaluar definitivamente la fiabilidad de las conclusiones obtenidas.

Para el análisis del resultado de la distribución de la cantidad de agua en función de la profundidad  $w(z)$  hay que tener en cuenta que en el proceso estándar de inversión de los datos de campo empleando 16 momentos de excitación y antenas de 30 m de lado la resolución es la siguiente (Tabla 7.2):

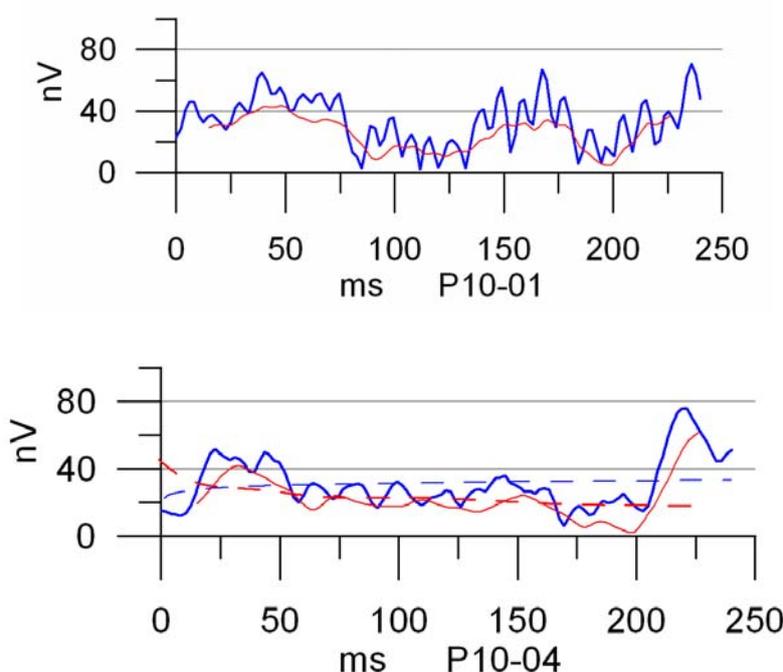
inicio	fin	potencia
0	1	1
1	2	1
2	3	1
3	4	1
4	5	1
5	6	1
6	7	1
7	8	1
8	9	1
9	10	1
10	11	1
11	13,1	2,1
13,1	16,3	3,2
16,3	20,2	3,9
20,2	25	4,8
25	30	5

**Tabla 7.2 Resolución del modelo de inversión utilizando una antena de 30 m de lado y 16 momentos de excitación. Los valores están expresados en metros.**

Por lo tanto, dentro de la profundidad de investigación en el Barranco de Lerma, empleando 16 momentos la resolución es de un metro.

## 7.2 Alcance de la inversión de los SRM

Una de las conclusiones del análisis de los datos de campo efectuado es que la calidad de los registros es en general mala para poder efectuar una inversión cuantitativa de los datos. Sin embargo, dicho proceso va a aplicarse a todos los SRM efectuados, con la finalidad de tratar de mejorar los datos brutos de campo mediante la aplicación de filtros. En la Figura 7.1 se aprecia cómo para el registro del SRMP10, el filtro suaviza los valores de la curva  $e(t)$  del momento  $q_1$ , sin que por ello se evidencie un carácter exponencial de la señal, mientras que los valores filtrados para el cuarto momento si que mejoran ese aspecto, permitiendo la obtención de un valor  $E_0$  más fiable.



**Figura 7.1** Ejemplo de la mejora que puede producir la aplicación de filtros a los datos de campo. En azul, valores FID1 medidos; en rojo, valores filtrados con un filtro run average de 15 ms de operador. Para la señal P10-04 se han incluido los ajustes de una exponencial a los valores medidos y filtrados (línea discontinua azul y roja respectivamente).

El proceso de datos se va a efectuar utilizando el software SAMOVAR v.6.2 de NUMIS Instruments. Para cada SRM se van a indicar los siguientes parámetros de proceso (ver capítulo 2.2 Interpretación de los datos de campo de un SRM y Figura 2.4):

**Filtering window:** tiempo utilizado del registro de 250 ms para su proceso

**Filtro run average con time constant:** tipo de filtro utilizado y longitud del operador

**Average S/N:** valor medio de la relación Señal/Ruido

**EN/IN:** valor medio de la relación ruido externo/ruido interno

**Fitting error:** error de ajuste entre los valores medidos y el modelo encontrado, para las señales del primer pulso (FID1) y segundo pulso (FID2) en %

**Param. of regular.:** parámetro de regularización ajustado automáticamente por el software para la inversión de  $E_0$ ,  $T_2^*$  y  $T_1^*$

**Permeability constant Cp:** factor de calibración standard =  $7.00e-09$

El resultado del proceso se expone de forma gráfica (ver capítulo 2.3 Presentación de los resultados), a través de las siguientes funciones:

- Curvas **e(t)** filtradas (signal) y exponencial ajustada (exp.fit,)
- Curva de ruido(q) (ambient noise)
- Curva f(q) (frequency) con indicación de la frecuencia de excitación utilizada (reference frequency)
- fase(q)
- $E_0(q)$  para la señal FID1 junto con el ruido y la curva teórica del modelo (inv.fit.).

Se representa así mismo el modelo del subsuelo resultado de la inversión:  $w(z)$  (water content en %) con codificación en color del valor de  $T_1^*$  y la función  $T_1^*(z)$ .

**Advertencia** sobre una cuestión de nomenclatura: se denomina “pulso” a la envolvente de la intensidad (senoidal) de corriente eléctrica  $I$  que se hace circular por el circuito de emisión durante un cierto tiempo  $\Delta t$ , a fin de generar el campo electromagnético de excitación de los protones de hidrógeno. La magnitud que mide el pulso se denomina “momento”, ya que es el producto  $I\Delta t$  y sus dimensiones son A.ms. Al efectuar apilamiento o stacking de señales se emite varias veces un pulso del mismo momento. Para efectuar un sondeo, se emiten varios pulsos de momentos crecientes. Sin embargo, aunque las palabras “pulso” y “momento” no son lo mismo, se utilizan a veces con el mismo significado, a fin de no reiterar la locución “pulso de momento ...”.

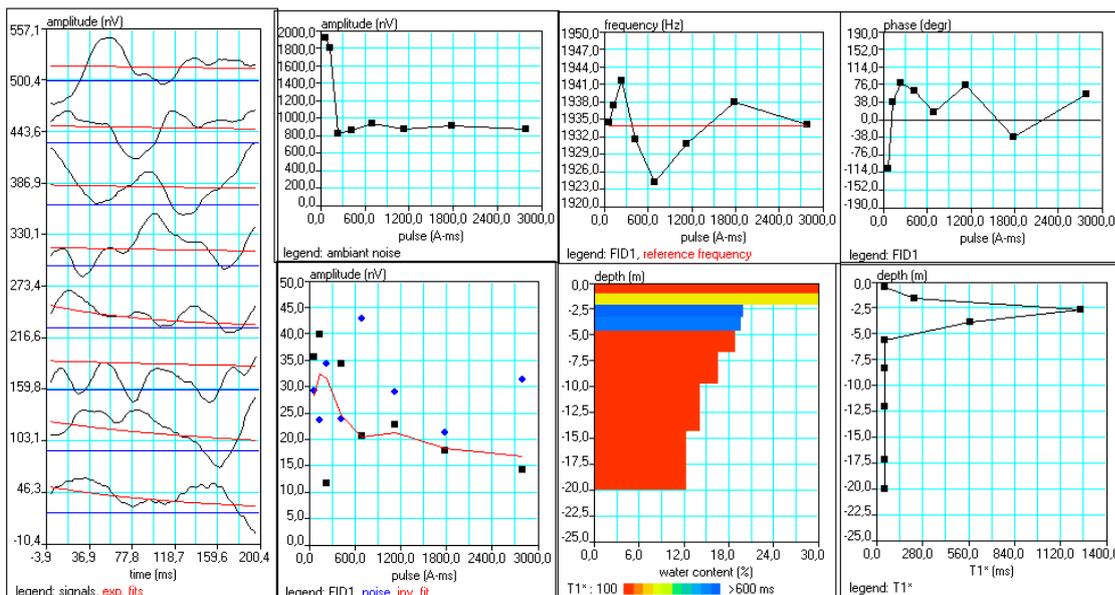
## 8. Inversión e interpretación

### SRM P10

Está efectuado junto al piezómetro P10, comenzando las arcillas a 4.8-4.9 m y con 0.77-0.87 m de capa de agua a los 4 m. Del análisis de los datos de campo se concluye que no es fiable una interpretación cuantitativa de este registro, en el que no es claramente visible la señal del agua, excepto para  $q_6$ , siendo el nivel de la señal igual al del ruido para el resto de los momentos de emisión. Registro: antena de 15 m, 8 momentos.

Su proceso con los siguientes parámetros, da el resultado indicado en la Figura 8.1:

Filtering window = 198.6 ms  
 Filtro run average con time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 0.85; EN/IN = 5.88**  
**fitting error: FID1 = 32.88%; FID2 = 45.70 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 59.1; T1\* = 1.669  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

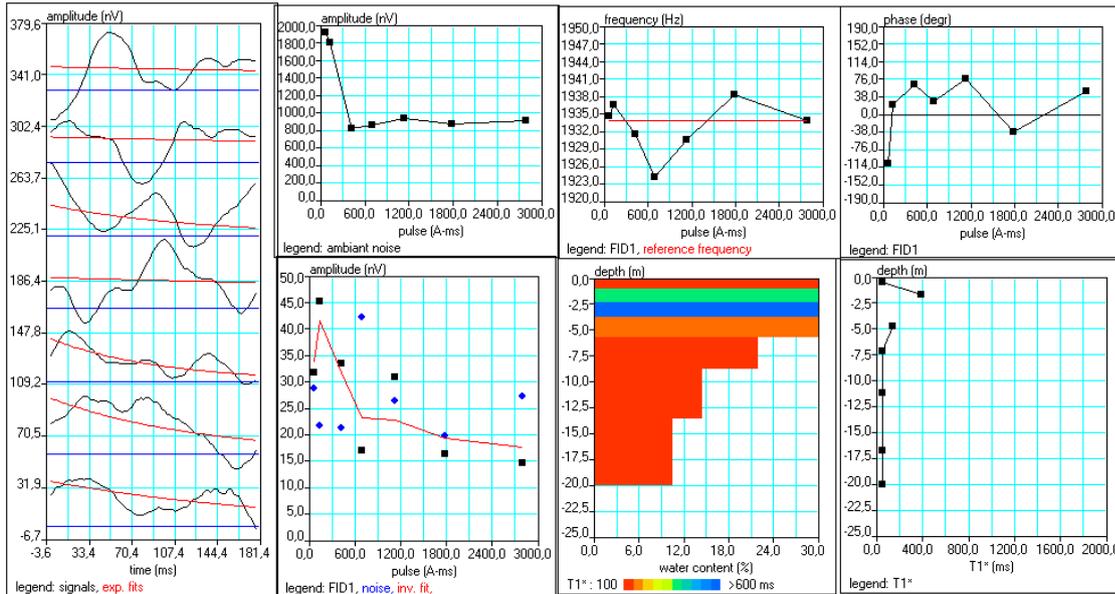


**Fig. 8.1 Resultado de la inversión del SRMP10 completo, para 200 ms.**

La aplicación del filtro de suavizado (run average) permite apreciar la posible existencia de señal para el cuarto pulso. Aunque la amplitud de los valores registrados de la señal son superiores al umbral del ruido instrumental (EN/IN = 5.88), la relación señal/ruido es 0.85, lo que ratifica la duda de ausencia de señal de resonancia. La aplicación de un filtro de 15 ms a las curvas  $e(t)$  de campo ha mejorado algo la forma de la curva  $E_0(q)$ , sugiriendo la eliminación del tercer pulso. Los datos procesados siguen mostrando una frecuencia muy dispersa.

Eliminado el tercer pulso y reduciendo además el tiempo de proceso a 180 ms, se obtiene el siguiente resultado (Figura 8.2):

Filtering window = 180.0 ms  
 Filtro run average con time constant = 20.00 ms  
**average S/N = 0.85; EN/IN = 5.35**  
**fitting error: FID1 = 15.55%; FID2 = 47.68 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 91.6; T1\* = 1.192  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

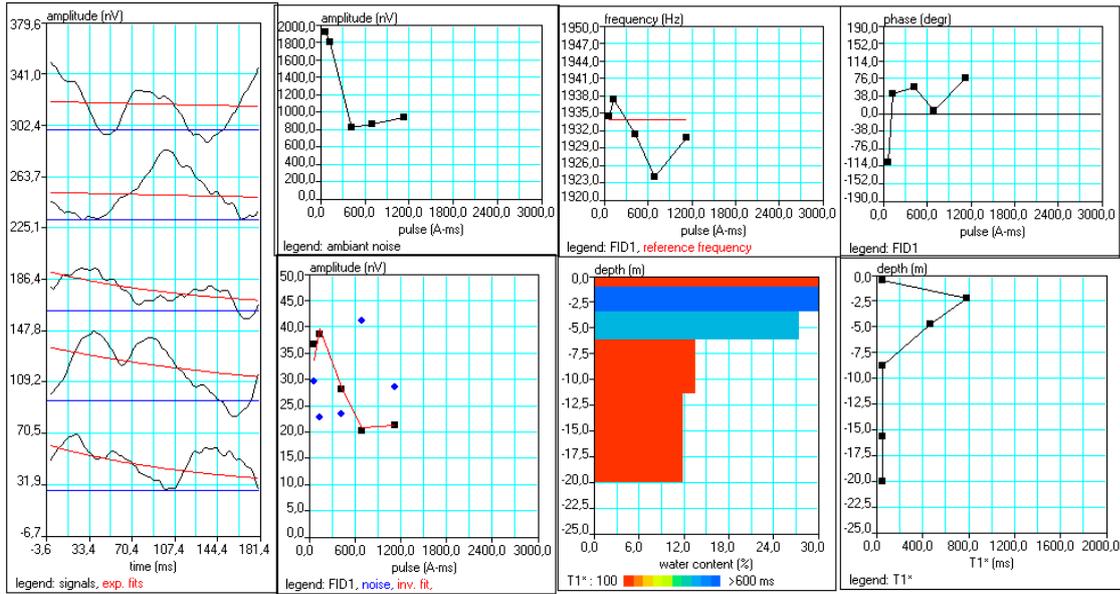


**Fig. 8.2 Resultado de la inversión del SRMP10 para 180 ms, eliminando el momento q3.**

Es evidente que ninguno de los modelos obtenidos es aceptable, sobre todo por debajo de los cinco metros, presentado elevados errores de ajuste. Los valores de tiempos de relajación  $T_1^*$  para la parte superior carecen de significado (superiores a 2000 ms), pero son más consistentes en la zona por debajo de los 5 m, donde indican permeabilidad prácticamente nula. La porosidad está falsamente exagerada, superior a 30 %.

El proceso con la supresión de los momentos q3, q7 y q8, utilizando 200 ms, proporciona la siguiente solución (Figura 8.3):

filtering window = 198.6 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 0.84; EN/IN = 5.81**  
**fitting error: FID1 = 4.80%; FID2 = 47.06 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 61.0; T1\* = 2.146  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



**Fig. 8.3** Resultado de la inversión del SRMP10 con supresión de los momentos q3, q7 y q8, utilizando 200 ms.

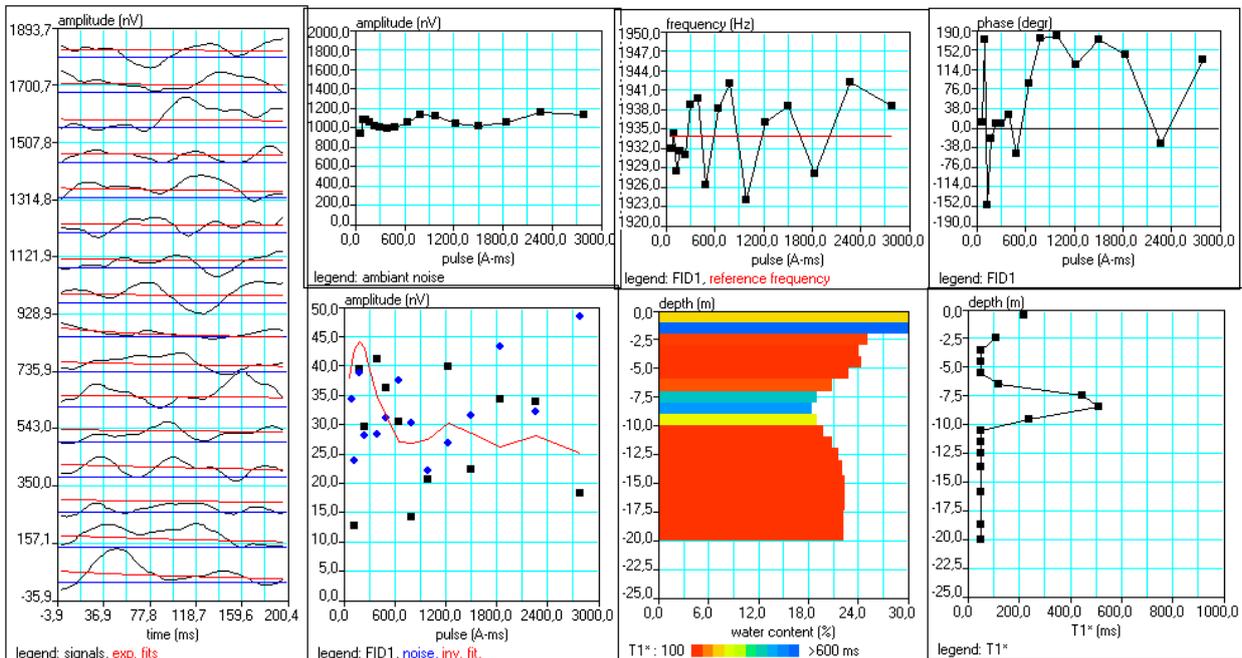
Aunque se ha conseguido un error de ajuste del 4.8 %, el valor de porosidad superior al 30% no es fiable y está muy distorsionado por la mala calidad de los datos, con baja relación señal/ruido (0.8). Aunque no procede un tratamiento ni cualitativo ni cuantitativo, parece haberse detectado la presencia de agua, ya que los tiempos de relajación se corresponden con la situación hidrogeológica real (valores muy pequeños para más de 6 m de profundidad).

**SRM P11**

Realizado junto al piezómetro P11, con una capa saturada de agua de 1.8 m (en P11) y 2.7 m (en P11v) a 5.1 m de profundidad, situándose las arcillas a 6.9 y 7.8 m respectivamente. No pueden procesarse los ficheros data del SRMP11 (porque no se corresponden los tipo data con los declarados en el fichero \*.inp, y son rechazados por Samovar), por lo que para la inversión se han utilizado los datos recuperado de fichero bin Test2P11. Registro: antena en ocho de 15 m, 16 momentos de emisión. El proceso utilizando los siguientes parámetros:

filtering window = 198.6 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 0.94; EN/IN = 7.88**  
**fitting error: FID1 = 34.29%; FID2 = 49.06 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 23.8; T1\* = 0.715  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

proporciona el resultado expuesto en la Figura 8.4. Sigue sin apreciarse señal en las curvas **e(t)**. La relación señal/ruido está por debajo del límite aceptable, lo que se manifiesta en la falta de morfología de la curva  $E_0(q)$ , influida además por el diferente stacking de cada pulso y la ausencia de sintonía con la frecuencia de resonancia.



**Fig .8.4 Resultado de la inversión del SRMP11 para 120 ms.**

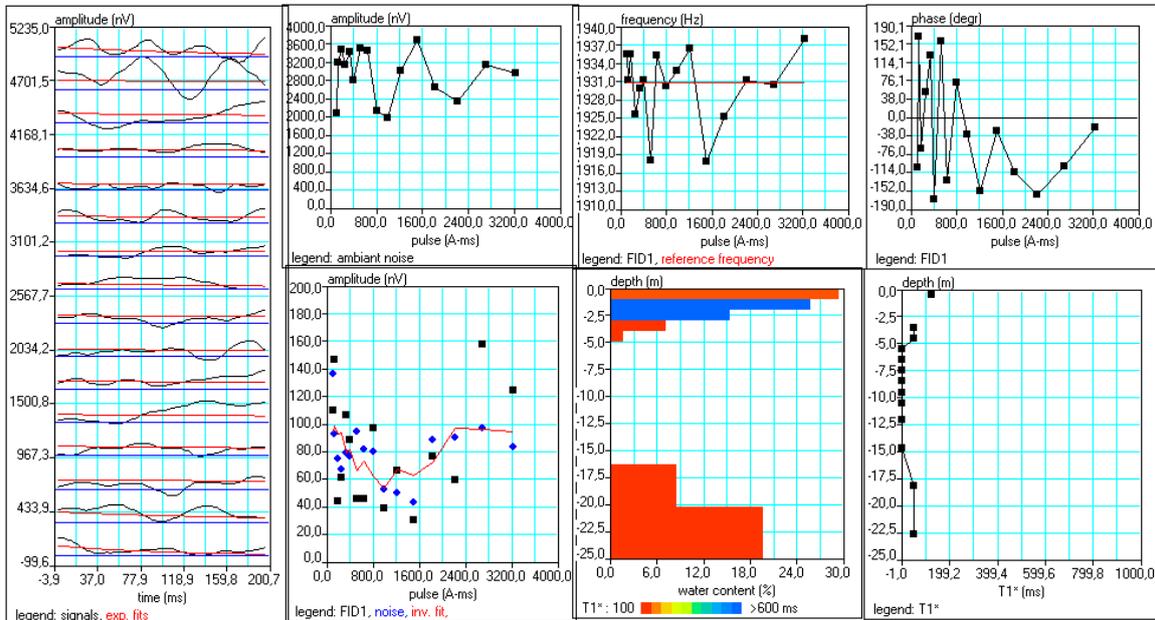
*En consecuencia, este registro no produce información, aunque resulta casi sorprendente que con datos de campo de esta mala calidad, el parámetro  $T_1^*(z)$  refleje la realidad hidrogeológica, con sólo un metro de desfase.*

**SRM P4**

Situado junto al piezómetro P4, con 4.14 m de capa saturada a 3.16 m de profundidad y estando las arcillas de base a 7.3 m. Como consecuencia de un posible fallo en el sistema de registro (señales sin stacking), no es fiable invertir estos datos. Registro con antena en ocho de 30 m, emisión de 16 pulsos. El proceso con los parámetros

filtering window = 198.9 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.08; EN/IN = 16.11**  
**fitting error: FID1 = 35.75%; FID2 = 46.98 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 370.0; T1\* = 0.238  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

proporciona el resultado expuesto en la Figura 8.5:

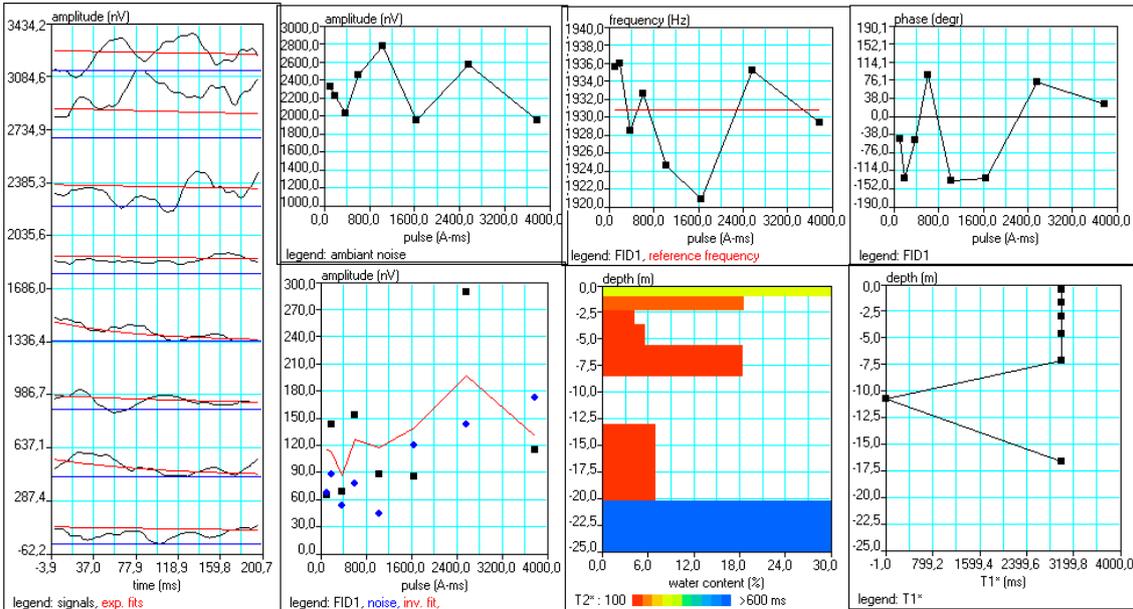


**Fig. 8.5 Resultado de la inversión del SRMP4 completo.**

La aplicación del filtro no mejora la calidad de las curvas e(t), indicando los valores de la relación EN/IN y S/N=1.08 que sólo es factible una interpretación cualitativa. Sin embargo, a pesar del elevado ruido, debido a la ausencia de stacking, y de la caótica forma final de la curva E<sub>0</sub>(q), el modelo ajustable refleja la situación hidrogeológica, sobre todo en la distribución T<sub>1</sub>(z).

Utilizando para la inversión los datos del registro test4P4, efectuado con ocho pulsos sin registrar T<sub>1</sub>, se obtiene el siguiente resultado (Figura 8.6):

filtering window = 198.9 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.27; EN/IN = 19.10**  
**fitting error: FID1 = 32.36%; FID2 = 209385.31 %**  
 param. of regular.: E, T<sub>2</sub>\* = 298.5; T<sub>1</sub>\* = 500000.000  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

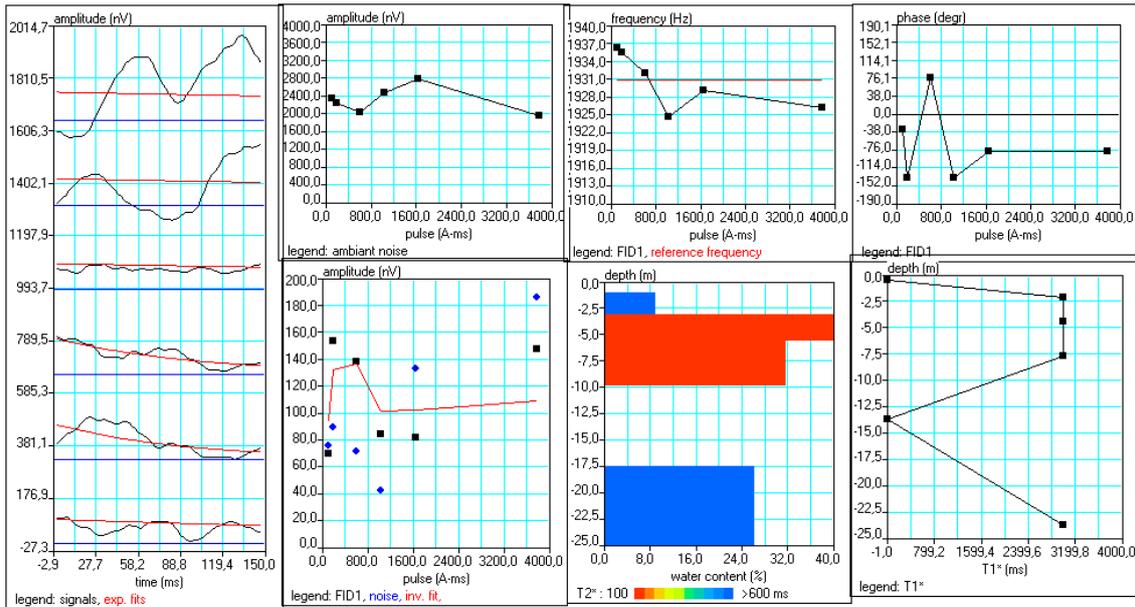


**Fig. 8.6 Resultado de la inversión del Test4P4.**

con cierta mejora en la relación señal/ruido, en la apreciación de señal en las curvas **e(t)** y en la morfología de la curva  $E_0(q)$  para los primeros pulsos, estando muy afectada no obstante por la anómala amplitud para los momentos q3 y q7. Los tiempos  $T_2^*$  son muy elevados al haber utilizado 200 ms de registro para el ajuste de las exponenciales.

Un nuevo proceso de estos datos, limitado a los primeros 150 ms y eliminando los momentos q3 y q7 da como resultado (Figura 8.7):

filtering window = 149.2 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.01; EN/IN = 19.87**  
**fitting error: FID1 = 19.64%; FID2 = 139006.44 %**  
 param. of regular.: E, T<sub>2</sub>\* = 312.8; T<sub>1</sub>\* = 500000.000  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



**Fig. 8.7** Resultado de la inversión del registro Test4P4 para 150 ms y sin tener en cuenta los momentos q3 y q7.

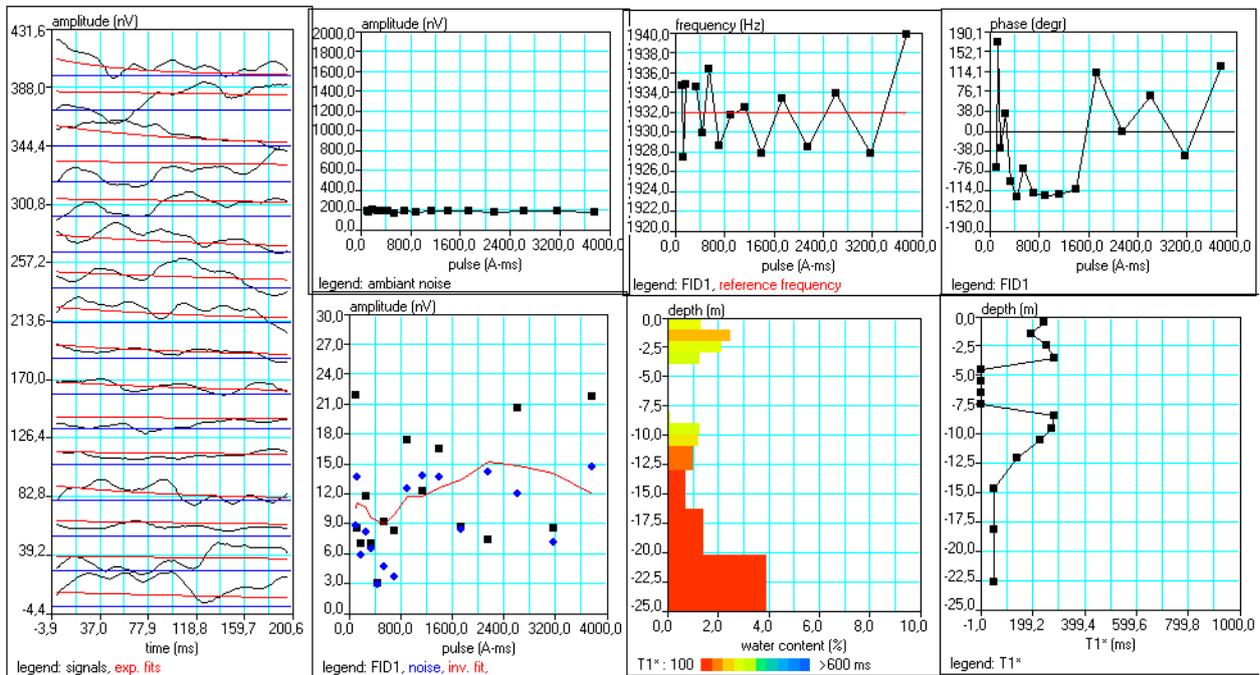
Este resultado puede aceptarse en el sentido de que señala la presencia de agua (curvas **e(t)**) a la profundidad donde realmente existe (entre los metros reales 3 a 7), pero con una porosidad exagerada. La variación de la frecuencia es índice de existencia de materiales magnéticos, que han distorsionado el resultado, a pesar de tener un valor S/N=1.27. La inversión por debajo de los 10 m no es válida, debido a la diferencia tan grande en el stacking utilizado (sólo de 16) para los momentos q6 a q8.

*En consecuencia, la información obtenida en este lugar sólo puede ser considerada de forma cualitativa, indicando la presencia de agua en las profundidades esperadas y la presencia de una capa totalmente impermeable bajo el acuífero, con contenidos en agua y tiempos de relajación carentes de significado.*

**SRM L12**

Efectuado junto al SEV L12, en donde el perfil eléctrico P4 sitúa el nivel de arcillas a 5 m de profundidad, pudiendo existir una zona saturada de agua superior a los 3 m. Está registrado con antena en ocho de 30 m y 16 pulsos. Del análisis de los datos de campo se dedujo la no fiabilidad de una inversión numérica de este registro; utilizando 200 ms y con todos los momentos se obtiene (Figura 8.8):

filtering window = 198.8 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.07; EN/IN = 1.88**  
**fitting error: FID1 = 41.93%; FID2 = 48.35 %**  
 param. of regular.: E, T<sub>2</sub>\* = 167.8; T<sub>1</sub>\* = 0.238  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



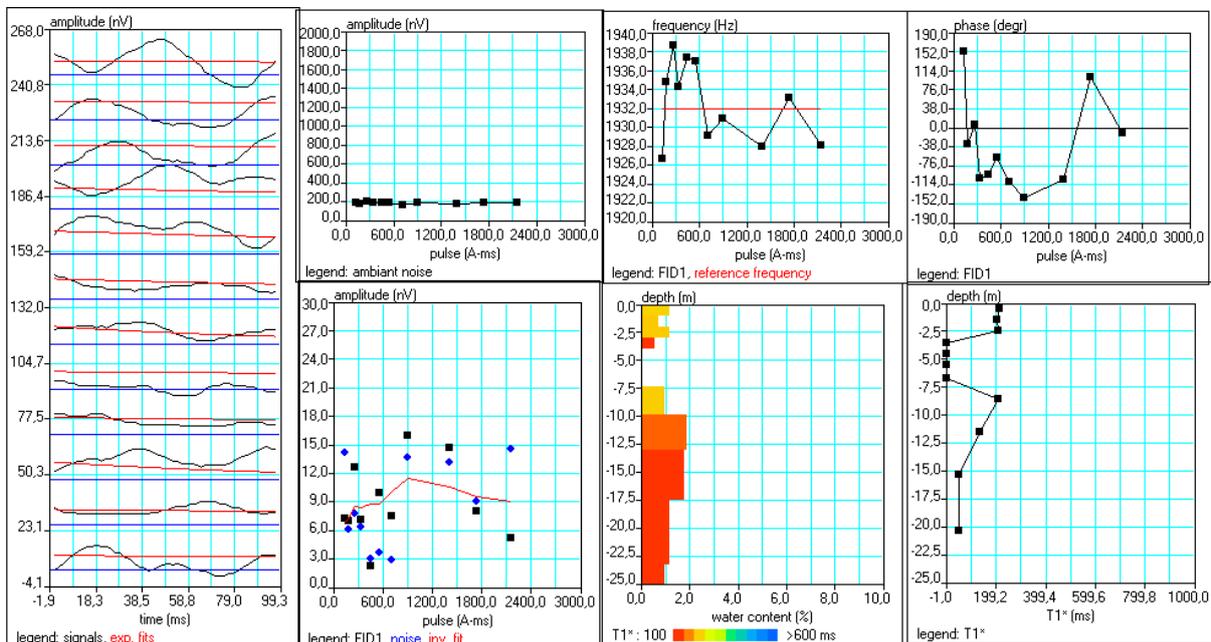
**Fig. 8.8 Resultado de la inversión del registro SRM L12.**

El valor de la relación S/N=1.07 del SRML12 ratifica que no es posible su inversión, al menos utilizando todos los momentos. La curva E<sub>0</sub>(q) tiene una gran dispersión, posiblemente debida a la variación del stacking utilizado; por otra parte los valores de E<sub>0</sub> son inferiores a 10 nV, por lo que aunque la relación media EN/IN sea de 1.88 el ruido es, para muchos pulsos, superior a la señal. No obstante, no deja de sorprender que en el modelo ajustable a estos datos se corrobora que a partir de los cinco metros empiezan las arcillas, y tanto los valores de w(z) como los de T<sub>1</sub> se hacen cero, mientras que por encima se detecta un contenido en agua inferior al 2% . Los valores de T<sub>1</sub> de 300 ms (T<sub>2</sub>\* inferior a 200 ms) no

se corresponden con los observados en las curvas  $e(t)$  brutas, obtenidos utilizando todo el tiempo registrado para hacer la inversión.

El resultado de efectuar una inversión suprimiendo los momentos  $q_1$ ,  $q_{10}$ ,  $q_{14}$  y  $q_{16}$ , y procesando 100 ms está representado en la Figura 8.9:

filtering window = 99.4 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.03; EN/IN = 1.70**  
**fitting error: FID1 = 33.60%; FID2 = 56.31 %**  
 param. of regular.: E,  $T_2^* = 244.1$ ;  $T_1^* = 1.192$   
 permeability constant  $C_p = 7.00e-09$



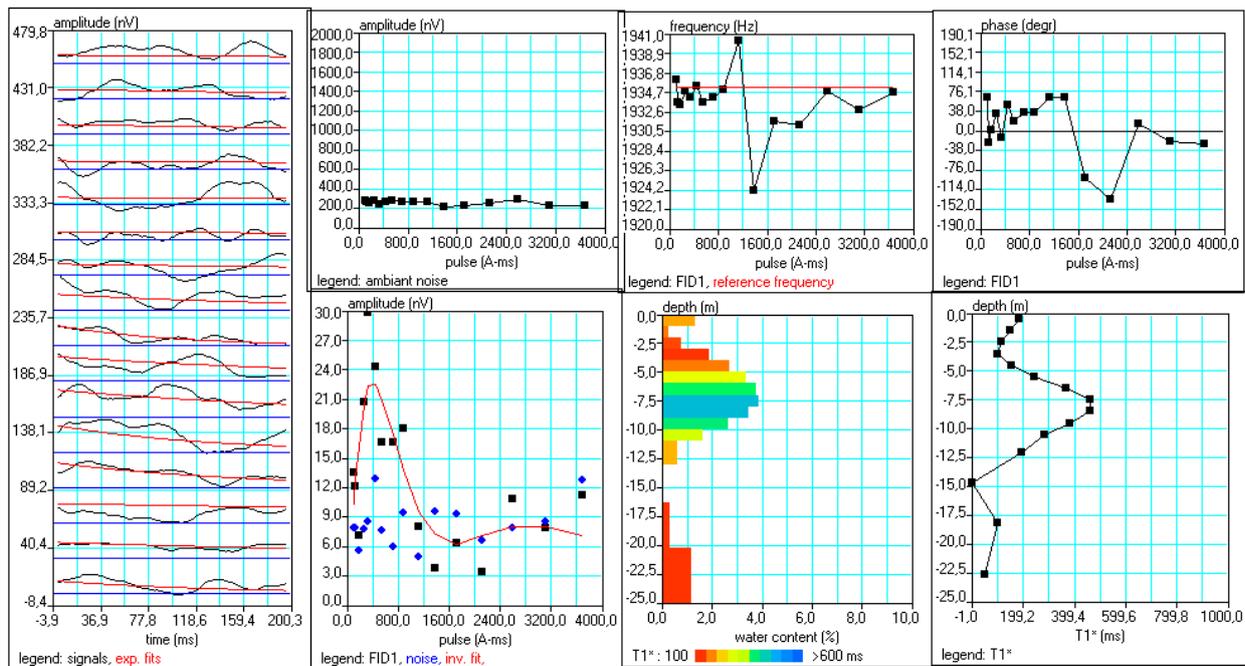
**Fig. 8.9** Resultado de la inversión del registro SRM L12 para 150 ms y sin tener en cuenta los pulsos  $q_3$  y  $q_7$ .

El resultado obtenido es equivalente a los anteriores, porque evidentemente el nivel de señal es excesivamente bajo. Por lo tanto la única conclusión fiable que puede obtenerse es de tipo cualitativo: hay un contenido muy bajo de agua, que dificulta su registro, a pesar de utilizar 156 stacks, aunque el modelo corrobora la situación hidrogeológica existente.

## SRML2

El SEV L2, en el perfil eléctrico P2, sitúa las arcillas a 9 m de profundidad, pudiendo existir un nivel saturado de unos 3-4 m. Está medido con antena en ocho de 30 m de lado y 16 momentos de excitación. El análisis de los datos de campo de este registro permite identificar claramente la presencia de agua; puesto que se han utilizado los mismos parámetros de registro que en otros lugares podría deducirse que en los casos en que la presencia de señal no es patente se deben a que en ellos no había agua suficiente para ello. La inversión con todos los pulsos y 200 ms proporciona el siguiente resultado (Figura 8.10):

filtering window = 198.4 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.31; EN/IN = 1.67**  
**fitting error: FID1 = 25.78%; FID2 = 33.52 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 244.1; T1\* = 0.715  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



**Fig. 8.10 Resultado de la inversión del registro SRM L2 para 200 ms y teniendo en cuenta todos los pulsos.**

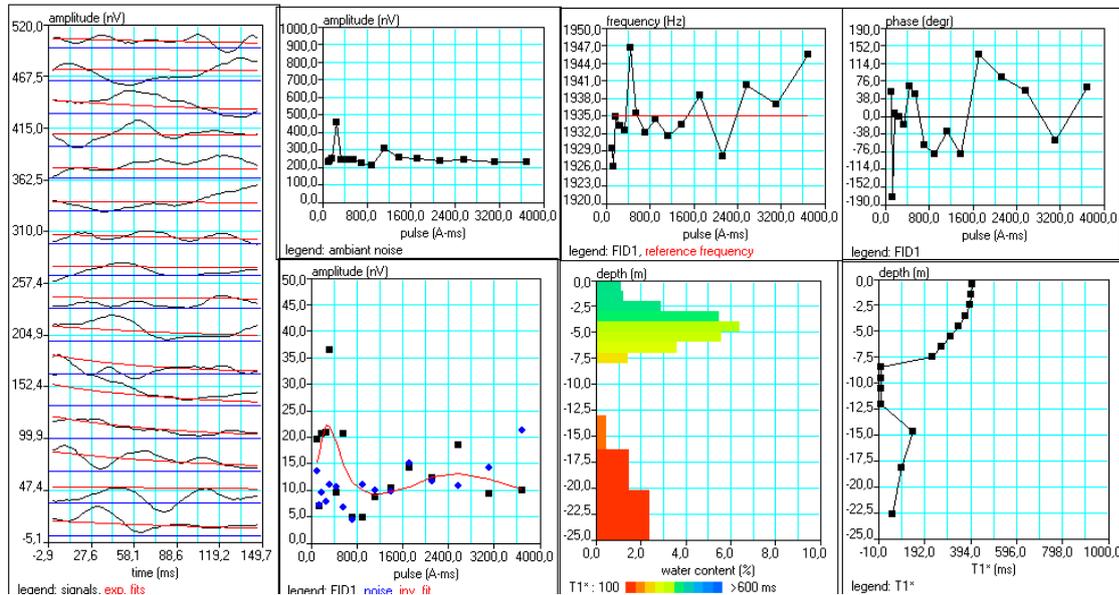
El carácter exponencial de la señal  $e(t)$  filtrada es aún más evidente que en los valores brutos. La relación Señal/Ruido sigue siendo baja (1.31), aunque mayor que en los SRM anteriores, con un valor EN/IN=1.67, por lo que se está en el límite para aceptar una interpretación cuantitativa. La morfología de la curva  $E_0(q)$  es aceptable, aunque con amplitud muy baja. El mantenimiento de la frecuencia en los primeros pulsos y la expresión del cambio de fase indican así mismo que la inversión cuantitativa de este registro es fiable. El error de ajuste es muy elevado (25%), lo que se debe fundamentalmente a los últimos

pulsos. *El resultado obtenido tiene buena coincidencia con los datos conocidos: a partir de unos 10 m no hay contenido en agua y el tiempo de relajación  $T_1$  se hace cero, correspondiendo a la presencia de arcillas. Puede aceptarse una capa saturada, de mejor permeabilidad ( $T_1=500$  ms) partir de los 5 m, con una porosidad del orden del 3 %. El resultado por debajo de los 20 m es debido al aumento de la intensidad para los pulsos superiores, no teniendo significado geológico.*

**SRM L27**

Situado en las proximidades del SEV L27, en el que las arcillas se localizan entre los 4-5 m de profundidad. Medido con antena en ocho de 30 m de lado y 16 momentos. Del análisis de los datos de campo se deduce la viabilidad de utilizar este registro con posible significado cuantitativo, aunque, al haber sido efectuado con una variación del stacking muy grande de un momento a otro, los resultados pueden estar distorsionados. Utilizando todos los momentos, para 150 ms, se obtiene el siguiente resultado (Figura 8.11)

filtering window = 148.8 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.09; EN/IN = 2.17**  
**fitting error: FID1 = 36.76%; FID2 = 33.71 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 274.7; T1\* = 7.629  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



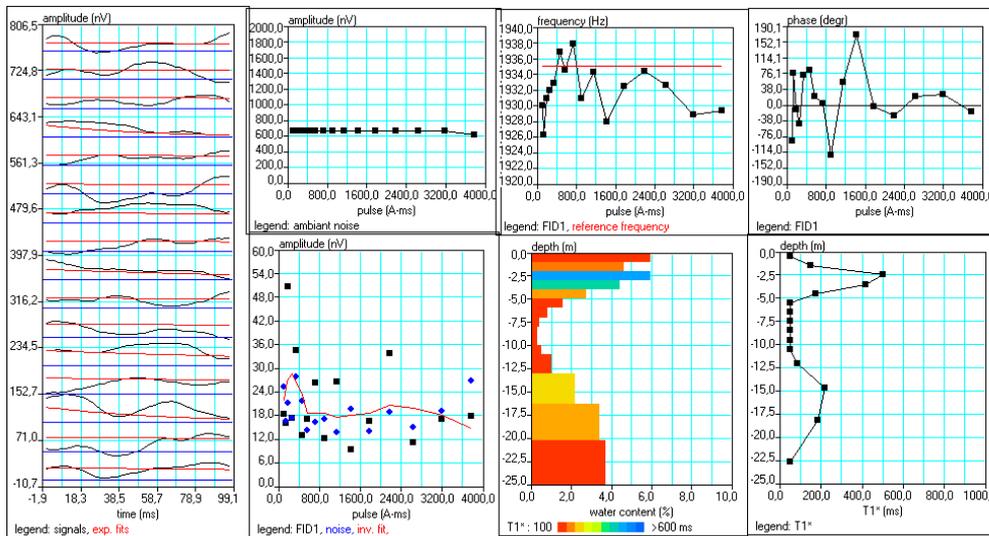
**Fig. 8.11 Resultado de la inversión del registro SRM L27 para 150 ms y teniendo en cuenta todos los pulsos.**

A pesar de medir valores de señal tan bajos (inferiores a 10 nV) y de tener una relación S/N de 1.09 y EN/IN=2.17 que están en el límite de fiabilidad, la mejora en la morfología de las curvas  $e(t)$  y  $E_o(q)$  tras filtrar los datos de campo permite aceptar el resultado para los primeros pulsos, siendo evidente la distorsión producida a partir del momento q11 con 22 stacks, que produce un falso acuífero por debajo de los 15 m de profundidad. La frecuencia de resonancia parece ser unos 3 Hz inferior a la de emisión. Se detecta la ausencia total de agua a partir de unos 6 m (el tiempo de relajación se hace cero), lo que está en consonancia con los resultados de los SEV. La porosidad del acuífero es del orden del 4 %, con un tiempo de relajación correspondiente a arenas gruesas-gravas.

**SRM L19**

Situado entre los SEV L19 y L39, donde las arcillas se encuentran a 9 y 8 m respectivamente. Se ha utilizado una antena en ocho de 30 m de lado, con emisión de 16 momentos. Por una anomalía producida en el apilamiento de señales durante el registro, este SRM no es fiable en su inversión. Tomando solamente los primeros 100 ms, se obtiene el siguiente resultado (Figura 8.11):

filtering window = 99.2 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.04; EN/IN = 3.80**  
**fitting error: FID1 = 40.40%; FID2 = 40.36 %**  
 param. of regular.: E,T2\* = 221.3; T1\* = 0.238  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



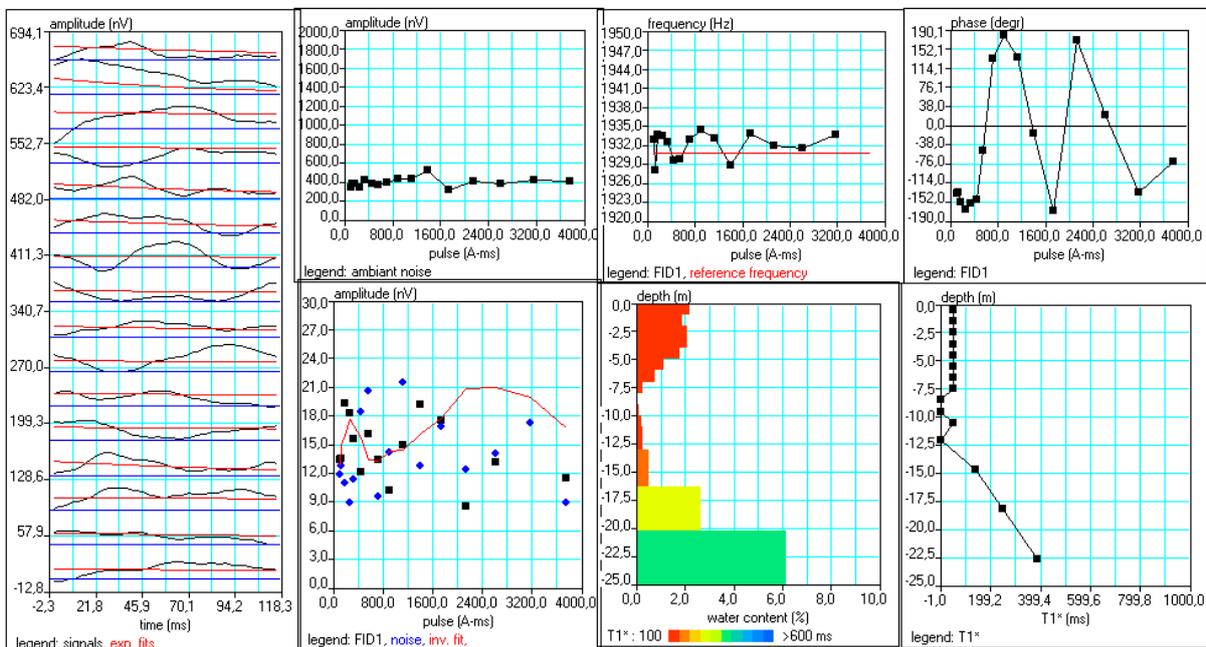
**Fig. 8.11 Resultado de la inversión del registro SRM L19 para 100 ms y teniendo en cuenta todos los momentos.**

Posiblemente debido a la falta de apilamiento en los registros  $e(t)$ , la amplitud de la curva  $E_0(q)$  no presenta coherencia, con valores inferiores a los 18 nV para la mayoría de los pulsos, sin que se configure una función interpretable. Para los valores filtrados la variación de la fase y frecuencia confirman la mala calidad del registro, cuyo valor de la relación Señal/Ruido (1.04) lo hace efectivamente poco adaptado a una interpretación cuantitativa. El ajuste del modelo proporciona sin embargo una solución que indica la existencia de una capa impermeable a la profundidad indicada por los SEV, con acuífero superior de porosidad del orden del 4%, pasando a terrenos impermeables por debajo de los 8 m. El elevado error de ajuste para todos los pulsos hace que esta interpretación no tenga otro valor que el cualitativo. El resultado por debajo de los 12 m es carente de significado.

## SRM L48

Situado entre los SEV L48 y L30, donde las arcillas se localizan a 8 m de profundidad. La antena en ocho tiene 30 m de lado y se han emitido 16 pulsos de excitación. Se ha producido también en este registro un posible fallo de apilamiento. Su inversión con todos los pulsos, para los primeros 120 ms proporciona el siguiente resultado (Figura 8.12):

filtering window = 118.1 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.10; EN/IN = 2.78**  
**fitting error: FID1 = 45.38%; FID2 = 42.73 %**  
 param. of regular.: E, T2\* = 366.2; T1\* = 2.146  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



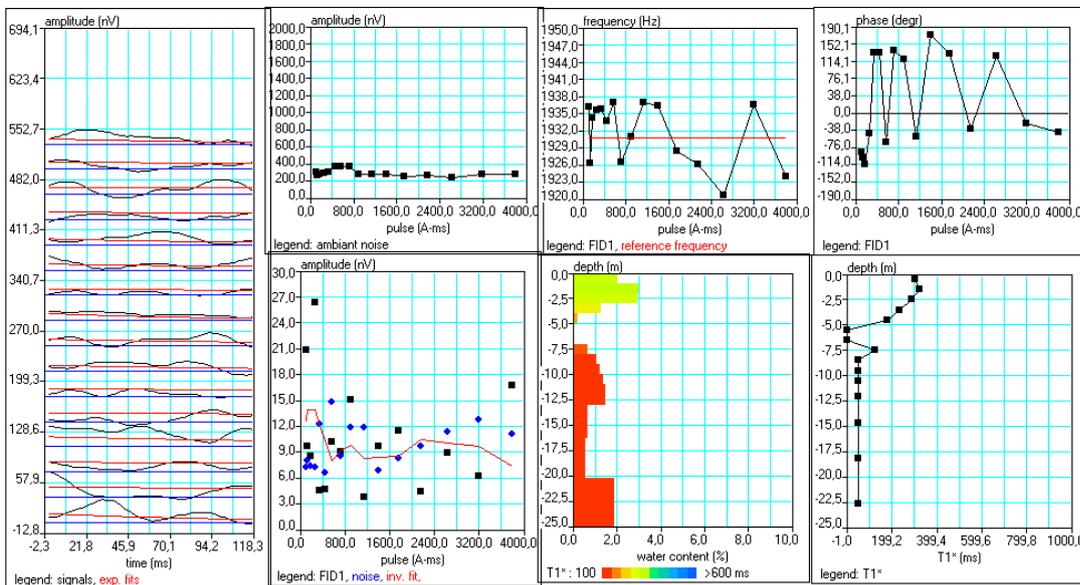
**Fig. 8.12 Resultado de la inversión del registro SRM L48 para 120 ms y teniendo en cuenta todos los pulsos.**

Aunque la relación  $S/N=1.1$  hace dudosa la inversión fiable de este registro, con amplitudes de la curva  $E_0(q)$  inferiores a 18 nV, sin forma identificable, sorprende no obstante que proporciona un modelo automático en el que la presencia de las arcillas a la profundidad indicada por los SEV está perfectamente corroborada por el SRM, así como la baja porosidad y permeabilidad del acuífero. Puede aceptarse la interpretación cualitativa, excepto evidentemente para la zona inferior a 10 m de profundidad, distorsionada. Como en el resto de estos SRM el error de ajuste tan elevado debe ser entendido para el conjunto de los datos, sin que afecte forzosamente a todos los rangos de profundidad.

**SRML8**

Situado junto al SEVL8, en el que se detectan las arcillas a 6 m de profundidad. La antena en ocho es de 30 m de lado, y se registró con 16 pulsos de emisión. La inversión de los datos de campo tomando todos los pulsos, para 150 ms proporciona el siguiente resultado (Figura 8.13):

filtering window = 149.2 ms  
 time constant = 15.00 ms  
**average S/N = 1.02; EN/IN = 1.95**  
**fitting error: FID1 = 48.15%; FID2 = 44.19 %**  
 param. of regular.: E,T2\* = 152.6; T1\* = 2.146  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



**Fig. 8.13 Resultado de la inversión del registro SRM L48 para 120 ms y teniendo en cuenta todos los pulsos.**

A pesar de tener una relación S/N de 1.02 y amplitud de la curva  $E_0(q)$  por debajo del límite del umbral instrumental (valores inferiores a 5 nV) para la mayoría de los pulsos, la relación EN/IN indica que la amplitud de la señal duplica el ruido instrumental gracias al stacking efectuado. La inversión da lugar a un modelo que se aproxima a la información proporcionada por el SEV L8, no detectando la presencia de agua a partir de unos 4 m de profundidad, haciéndose además nulo el tiempo de relajación  $T_1$  a partir de dicha profundidad. El acuífero superior, de muy baja permeabilidad, tiene del orden del 2-3 % de porosidad; el inferior no existe, es fruto de la falsa amplitud de la señal para armónicos superiores. Esta inversión sólo puede aceptarse en sus términos cualitativos.

## 9. Conclusiones sobre el registro y la inversión

### 9.1 Presencia de la señal del agua en los datos registrados

La frecuencia de la señal recibida (funciones  $f(q)$ ) de todos los SRM efectuados presenta grandes variaciones con el momento de excitación  $q$ , con un rango que llega a ser de 15-20 Hz para todos los sondeos. No siempre se ha utilizado una frecuencia de emisión  $f_e$  igual a la frecuencia de Larmor  $f_L$  deducida de la intensidad de campo magnético, porque se ha dado preferencia a la frecuencia aparentemente recibida durante el registro. Las diferencias entre  $f_e - f_L$  (Tabla 9.1, columna  $f_e - f_L$ ) son del orden de 1 a 4 Hz, por lo que no es motivo suficiente para no establecer sintonía en caso de existencia de agua.

SRM	Antena	forma	$f_e$ (Hz)	$f_L$ (Hz)	$f_e - f_L$	$f_r$	$f_{inver}$	Stacks	$k_{SI} \times 10^5$	$f_r - f_L$	$f_r - f_e$
SRMP10	15x15	c-esp	1933,8	1933,1	0,7	1931,0	1931,0	72		2,1	2,8
SRMP11	15x15	c-esp	1933,8	1934,3	-0,5	1935-37	1936-42	21-98	99	2,0	2,0
SRMP4	30x30	8	1930,8	1934,6	-3,8	1933,0	1931,0	256	500	1,6	2,2
SRML12	30x30	8	1932	1934,8	-2,8	1935,0	1935,0	18-156	140	0,2	3,0
SRML2	30x30	8	1935,3	1934,9	0,4	1935,0	1934-36	48-96	312	0,1	0,3
SRML27	30x30	8	1935	1933,8	1,2	1932-33	1932-33	22-96		1,0	2,0
SRML19	30x30	8	1935	1933,6	1,4	1935,0	1933-36	96	280	1,4	0,0
SRML48	30x30	8	1930,8	1934,2	-3,4	1930-34	1933-34	72	97	2,0	1,0
SRML8	30x30	8	1930,8	1934,0	-3,2	1934-36	1935-36	48-72	343	1,0	4,0

**Tabla 9.1 Análisis de la frecuencia.  $f_e$ : emitida;  $f_L$ : de Larmor;  $f_r$ : recibida en campo;  $f_{inver}$ : recibida según el registro filtrado. Se marcan los valores mayores para cada columna de diferencias y de susceptibilidad magnética  $k$ .**

La frecuencia recibida  $f_r$  se refiere a la perteneciente a las curvas  $e(t)$  en las que hay indicios de la presencia de agua (amplitud superior al ruido y cierto carácter exponencial). Considerando solamente los pulsos para los que la morfología de las curvas  $e(t)$  permite presumir la existencia de resonancia, la frecuencia de la señal recibida tomando los 200 ms de registro ( $f_r$ ) presenta muy poca diferencia con la de Larmor o con la de emisión (Tabla 9.1, columnas  $f_r - f_L$  y  $f_r - f_e$ ), normalmente menos de 2 Hz, y sólo en algún caso es del orden de 3-4 Hz. No es evidente una relación entre la mayor dispersión de la frecuencia y los mayores valores de susceptibilidad magnética de los terrenos, lo que permite asegurar que

la causa fundamental de mayores diferencias para el resto de los pulsos es la ausencia de señal de resonancia. Por lo tanto, una variación superior a 5 Hz entre frecuencia de Larmor y frecuencia de la señal registrada puede considerarse como evidencia de que no existe resonancia porque no se ha detectado la presencia de agua (ausente o en cantidad inferior a la detectable).

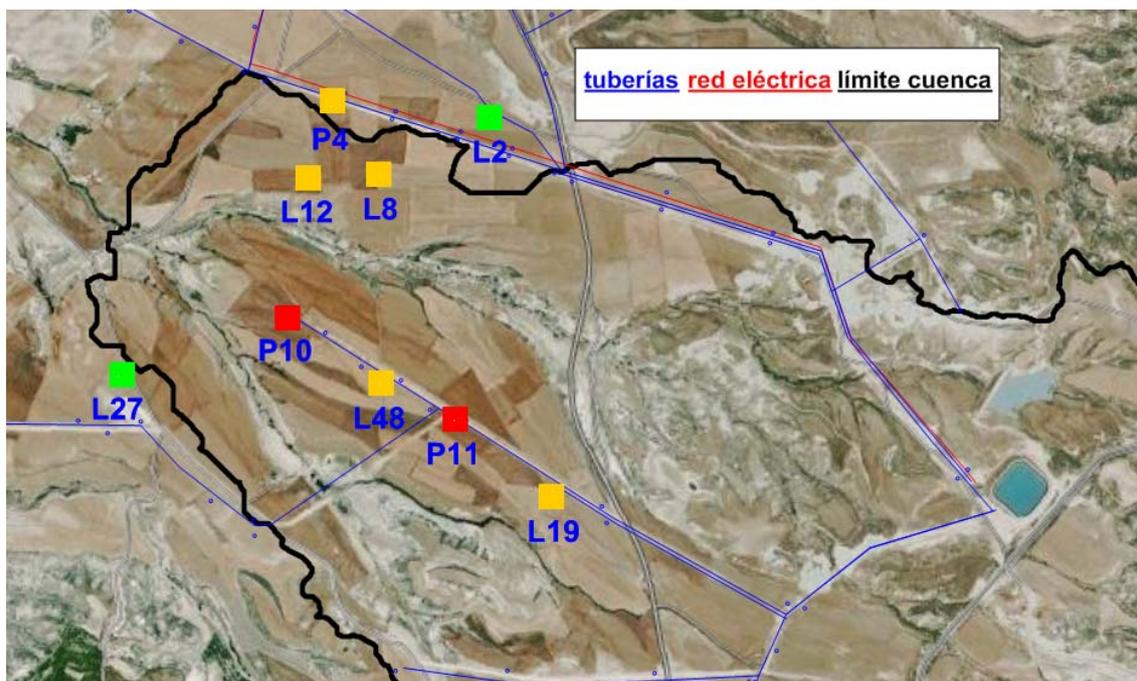
Las frecuencias **finver** de las señales tras el filtrado de los datos (en el proceso de inversión) se refieren solamente al tiempo de las curvas e(t) donde se aprecia decaimiento exponencial, y se encuentra en el mismo rango que las recibidas (columna **finver** de la Tabla 9.1).

## 9.2 Interpretación cuantitativa y cualitativa

En la Tabla 9.2 se resumen los resultados de los datos procesados y en la Figura 9.1 su posición con indicación del tipo de interpretación que es posible efectuar en cada SRM:

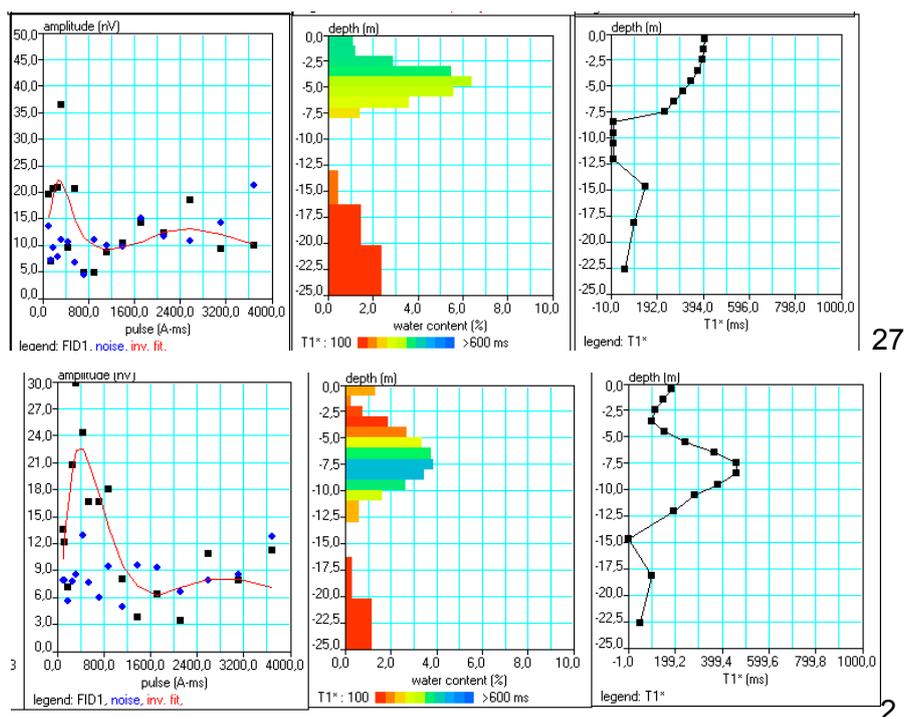
SRM	Antena	forma	Stacks	tiempo	S/N	EN/IN	error%	observaciones	INTERPRETACIÓN
SRMP10	15x15	c-esp	72	200	0,85	5,9	33	posible señal en q2 q4 q6	
				180	0,85	5,4	16	Inversión sin q3	
				200	0,84	5,8	5	Inversión sin q3 q7 q8;	NULO
SRMP11	15x15	c-esp	21-98	200	0,94	7,9	34	procesado con Test02P11	NULO
SRMP4	30x30	8	256	200	1,08	16	36	datos sin stack	
test04P4	30x30	8	16-92	200	1,27	19	32	8 pulsos q2-6 a 8 s=16	
test04P4	30x30	8		150	1,01	20	20	Inversión sin q3 q7	CUALITATIVA
SRML12	30x30	8	18-156	200	1,07	1,9	42	q4 a q8 s=156	
				100	1,03	1,7	34	Inversión sin q1 q10 q14 q16	CUALITATIVA
SRML2	30x30	8	48-96	200	1,31	1,67	26	q5-6-11-13-15-16 s=48	CUANTITATIVA
SRML27	30x30	8	22-96	150	1,09	2,2	37	stack muy variable	CUANTITATIVA
SRML19	30x30	8	96	100	1,04	3,8	40	datos sin stack	CUALITATIVA
SRML48	30x30	8	72	120	1,1	3,8	45	datos sin stack (q12 a q16 s=72)	CUALITATIVA
SRML8	30x30	8	48-72	150	1,02	1,95	48	q15-16 s=48	CUALITATIVA

Tabla 9.2 Resumen de los datos procesados.



**Fig. 9.1** Posición de los SRM efectuados e indicación en color del tipo de interpretación viable en cada uno, según la Tabla 9.2. Solamente resulta aceptablemente fiable la interpretación cuantitativa del SRM L2 y SRM L27; los SRM P10 y P11 no son utilizables en ningún sentido y para el resto de los SRM es aceptable una interpretación cualitativa de sus resultados.

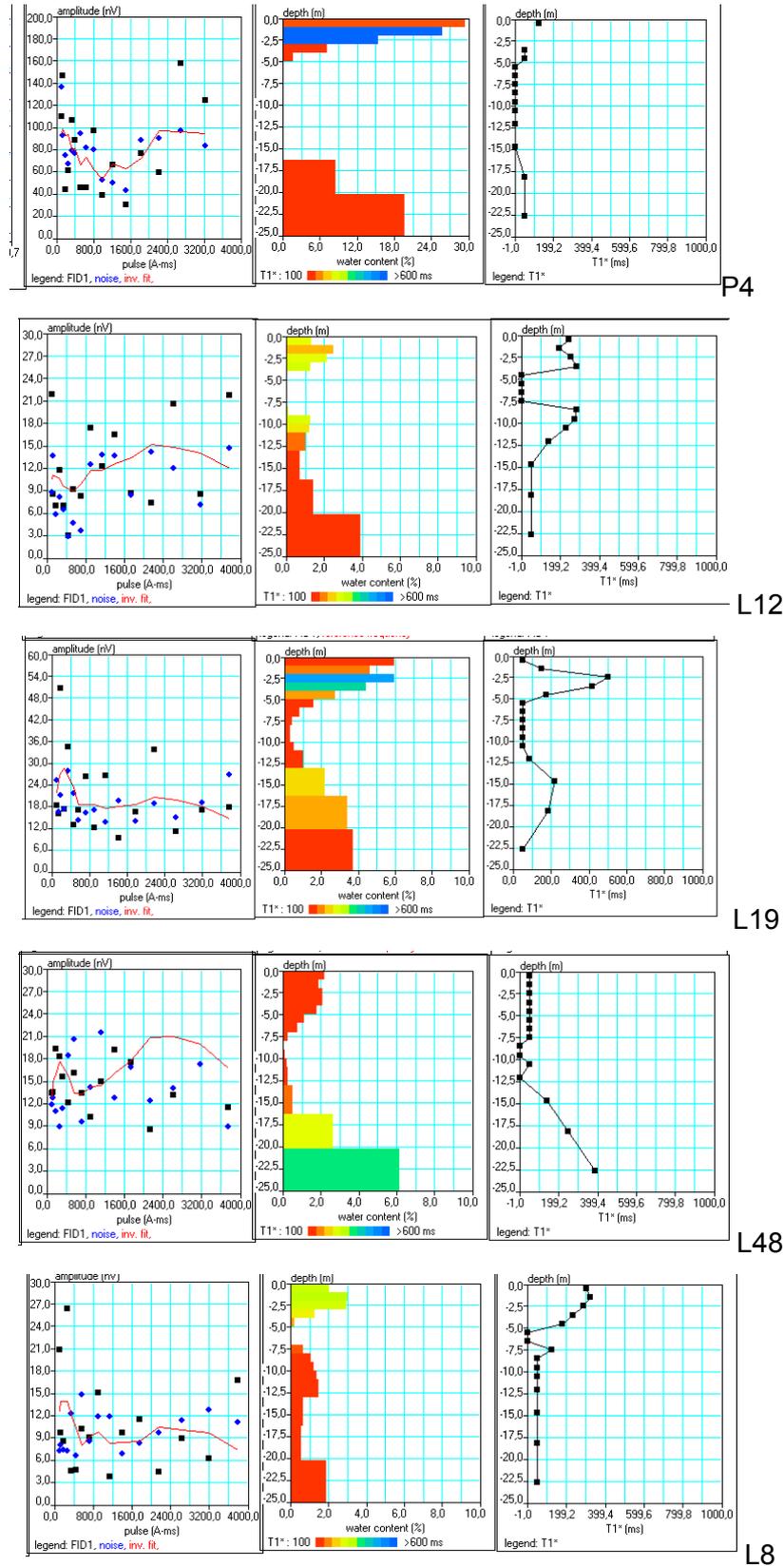
Según los diversos criterios utilizados, puede aceptarse el resultado cuantitativo de la inversión como una aproximación a la realidad para el SRM L2 y en menor medida para el SRM L27 (Figura 9.2). Para ambos se obtienen curvas  $E_0(q)$  con una morfología coherente y valores de señal superiores al ruido para los primeros pulsos. El modelo hidrogeológico obtenido tiene buena coincidencia con los datos conocidos a partir de los SEV, presentando un tiempo de relajación  $T_1$  nulo en la zona donde se conoce que se encuentran las arcillas. La capa saturada tiene un tiempo de relajación  $T_1$  del orden de 400 ms, lo que indica la presencia de materiales tipo arenas-gravas gruesas, con una porosidad del 3-5 %, siendo inferior en el SRML2. El resultado en ambos para los pulsos superiores está distorsionado por un efecto fantasma, aunque cualitativamente reproduce bien la mucha menor o la nula presencia de agua y valores de tiempos de relajación indicadores de gran arcillosidad. El error de ajuste entre la curva teórica del modelo y los datos (37% para SRML27 y 26% para el SRML2) se debe principalmente a los pulsos superiores (fuera del acuífero), aunque para el L27 tienen también importancia en algunos pulsos inferiores, cuya dispersión se adjudica al stacking variable empleado en su registro. Estos dos sondeos se sitúan fuera de los límites actuales de la zona objeto de estudio.



**Fig. 9.2** Curva  $E_0(q)$ , modelo hidrogeológico interpretado y variación del tiempo de relajación  $T_1$  (indicador de la permeabilidad) en función de la profundidad para los SRM L27 (parte superior) y L2 (parte inferior).

El resto de las mediciones sólo pueden interpretarse de forma cualitativa.

De los ensayos realizados junto a piezómetros, los SRM P10 y P11, medidos con antenas especiales que incluyen la inductancia suplementaria, pueden considerarse prácticamente nulos, proporcionando una imagen del subsuelo carente de significado. Tan solo los bajos tiempos de relajación se corresponden con la situación hidrogeológica real, pero el valor de la porosidad y su distribución en profundidad está claramente muy distorsionado por la mala calidad de los datos. El modelo obtenido para el SRM P4 indica la presencia de agua a las profundidades esperadas y una capa totalmente impermeable bajo el acuífero (Figura 9.3). Los valores de alta porosidad (superior al 15%) obtenidos en este SRM no son fiables, porque la mayor amplitud de la señal (único sitio donde llega a más de 100 nV) puede ser debida a la anomalía en el apilamiento durante el registro, no teniendo tampoco ningún significado los tiempos de relajación obtenidos, por lo que no pueden ser utilizados para ninguna estimación de permeabilidad. Queda por lo tanto descartada la posibilidad de utilizar los ensayos de bombeo como método para la calibración de los SRM.



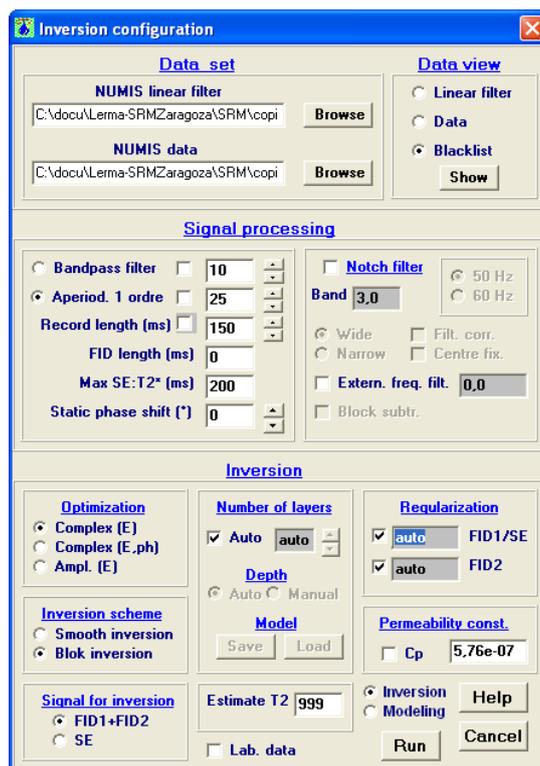
**Fig. 9.3** Visión conjunta de los modelos obtenidos en los SRM P4, L12, L19, L48 y L8, cuya interpretación sólo puede ser cualitativa.

La inversión de los SRM L12, L19, L48 y L8 es más fiable desde el punto de vista cualitativo, indicando porosidades bajas (Fig. 9.3), del orden de 1-4%?, y tiempos de relajación

correspondientes a granulometrías gruesas (de 200-400 ms ?), excepto en la localización del SRML48, donde la arcillosidad sería elevada (tiempo de 50 ms?). Lo más evidente de estos SRM es la aceptable morfología de los modelos de distribución del agua y tiempo de relajación con la profundidad, que se corresponde muy bien con la indicada por los SEV. Esta pequeña cantidad de agua puede explicar la baja amplitud de la señal y la mala calidad de los resultados obtenidos. En todos los casos la aparente detección de un acuífero inferior es fruto de la falsa amplitud de la señal para armónicos superiores.

### 9.3 Reproceso con SAMOVARv11

A fin de tratar de optimizar los resultados, se ha procedido a reprocesar los datos de campo de los SRM L2 y L27 con la nueva versión del software para proceso SAMOVARv11, que permite tener en cuenta la existencia de señales complejas, originadas en el caso de existir acuíferos muy superficiales, así como la selección de modelos de inversión con transición suave entre capas (smooth inversion) o brusca (block inversion) (Figura 9.4).



**Fig. 9.4 Selección de parámetros de proceso en el software SAMOVAR v11 (comparar con Figura 2.4).**

Para ello ha sido necesario volver a calcular la matriz de inversión (aquí denominada linear filter) **lerma830samv11.mrm** con los mismos parámetros que la utilizada anteriormente.

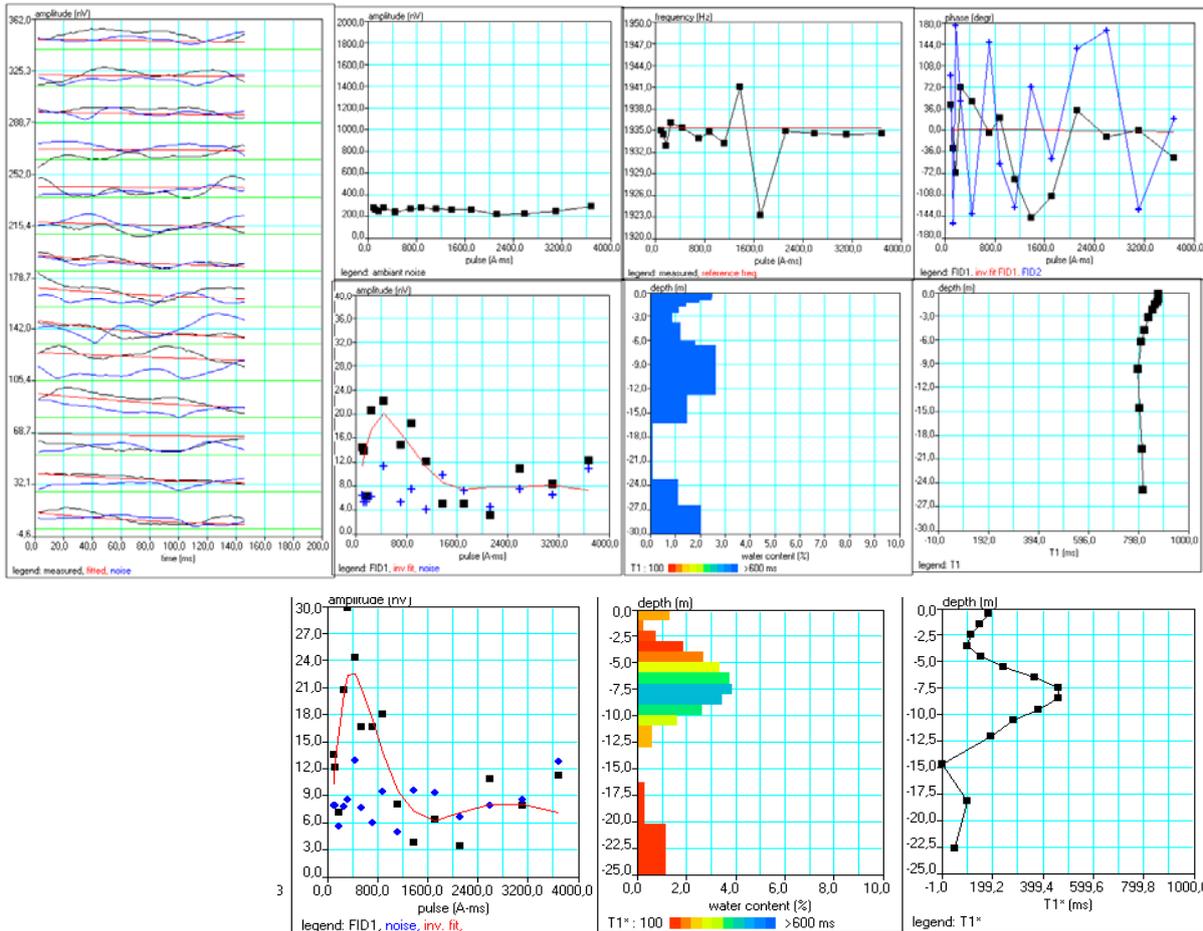
**SRM L2**

Se han utilizado los siguientes parámetros:

This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software  
 measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 343.1 ms  
 inversion scheme: block inversion  
 optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

filtering window = 148.8 ms sin q5 y q7  
 time constant = 25.00 ms  
 static phase shift = 0 degr.

**average S/N = 1.40; EN/IN = 1.39**  
 estimated vertical resolution: < 4 layers  
 estimated max. depth of investigation = 40.5 m  
**inversion RMSE : FID1 = 3.70 nV; FID2 = 7.62 nV;**  
 smoothing factor: SF1 = 12.4 ( 0.0 - 0.0); SF2 = 11.9 ( 5.4 - 39.2)  
 permeability constant Cp = 5.76e-07

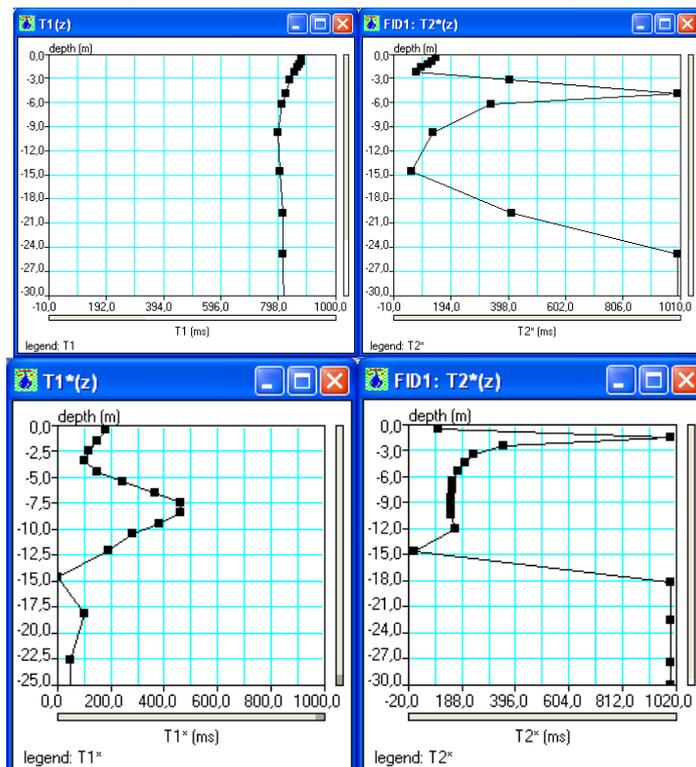


**Fig. 9.4 resultado de la inversión del registro SRM L2 utilizando el software SAMOVARv11 (parte superior) y SAMOVARv6 (parte inferior).**

Respecto del proceso anterior, se han tomado solamente los primeros 150 ms, aumentando el operador del filtro a 25 ms; las relaciones S/N y EN/IN obtenidas son prácticamente las

mismas (1.31 y 1.67 respectivamente con Samovarv6), pero utilizar un modelo de bloques el factor de regularización ha cambiado notablemente (244 y 0.7 respectivamente).

La distribución de agua  $w(z)$  y porosidad es similar en ambos procesos; la mayor diferencia estriba en los valores del tiempo de relajación, que en el proceso complejo calcula para  $T_1^*$  valores superiores a los 800 ms a lo largo de toda la profundidad, mientras que en el proceso normal no pasa de 400 ms y señala claramente los tramos sin agua. Sin embargo, los valores de  $T_2^*(z)$  de ambas inversiones son mucho más parecidos (Figura 9.5) y diferencian bien la zona saturada de la zona sin agua, para los que proporciona valores fuera de rango (superiores a 1000 ms), ya que no son resultado de una señal de resonancia. El tiempo de relajación transversal  $T_2^*$  es el resultado del ajuste exponencial a las curvas de campo  $e(t)$ , por lo que la variación se debe al distinto sistema de filtros y tiempo de registro utilizado, siendo consistente en ambos procesos.



**Fig. 9.5** Valor de  $T_1$  y  $T_2^*$  en función de la profundidad, resultado del proceso del SRM L2 por Samovar v11(parte superior) y Samovar v6 (parte inferior).

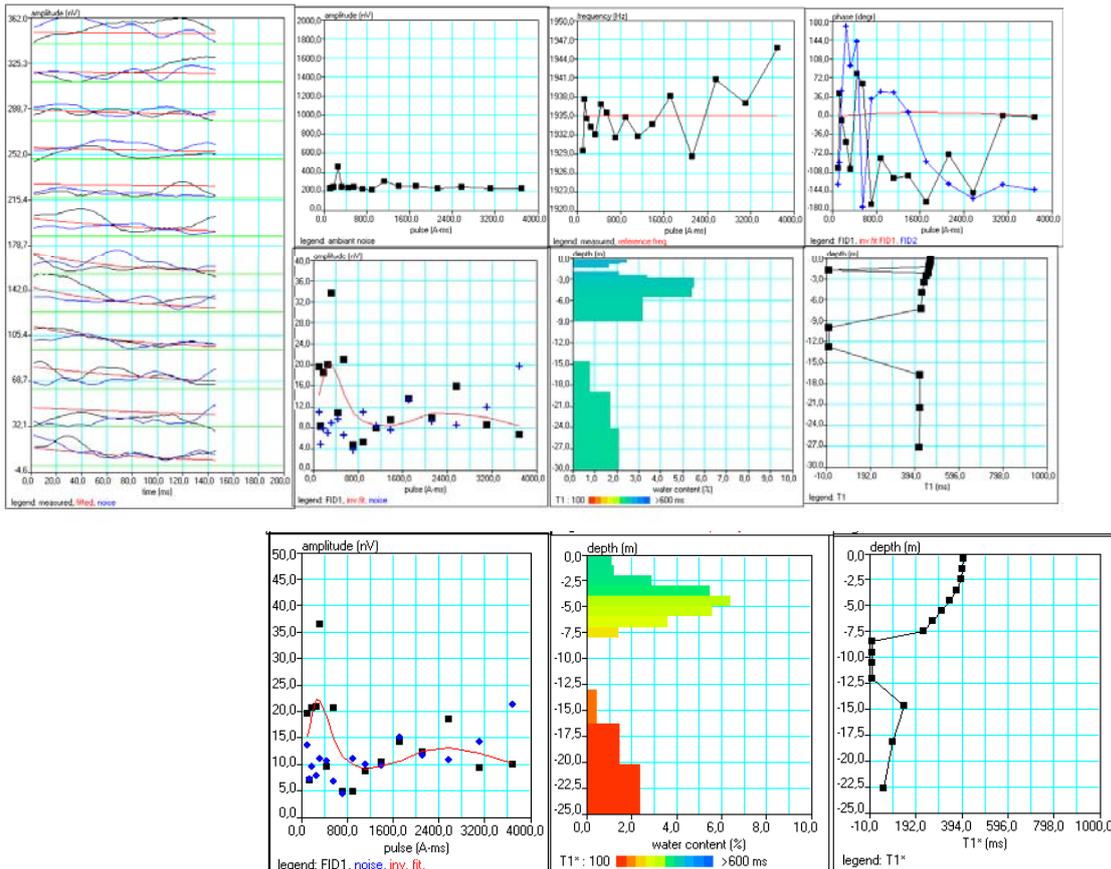
El sistema de cálculo seguido en la versión Samovar v11 para el tiempo de relajación longitudinal  $T_1^*$  no ha diferenciado si la señal es o no de resonancia (valores uniformes en toda la profundidad), por lo que cabe considerar que resulta menos fiable que el proporcionado por Samovar v6, lo que puede ser debido a la mala calidad de los datos de campo.

**SRM L27**

Se ha procesado con los siguientes parámetros:

This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software  
 measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 343.2 ms  
 inversion scheme: blok inversion  
 optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

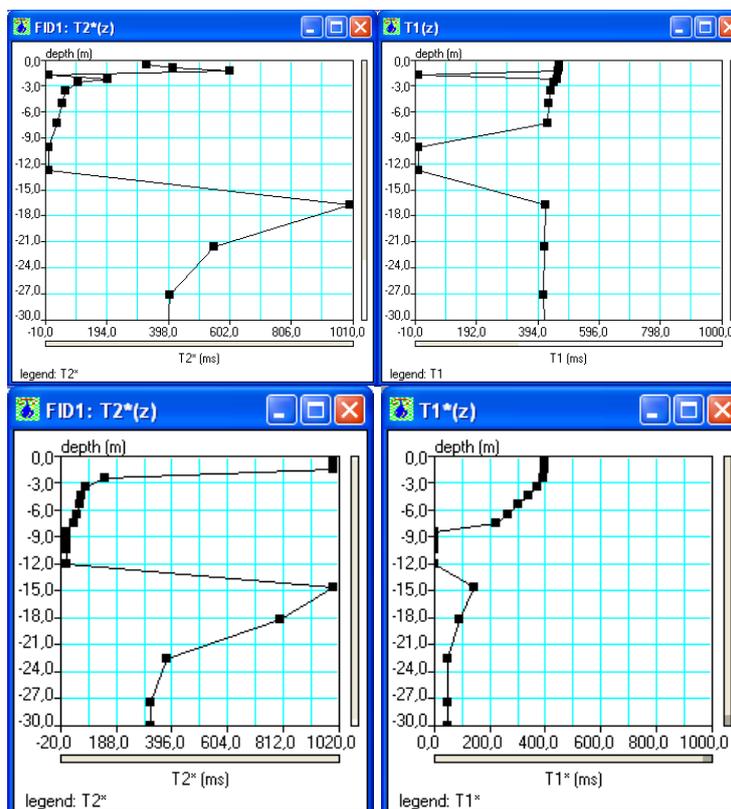
filtering window = 148.8 ms  
 time constant = 25.00 ms  
 static phase shift = 0 degr.  
**average S/N = 1.11; EN/IN = 1.87**  
 estimated vertical resolution: < 4 layers  
 estimated max. depth of investigation = 38.5 m  
**inversion RMSE : FID1 = 5.36 nV; FID2 = 5.93 nV;**  
 smoothing factor: SF1 = 11.7 ( 0.0 - 0.0); SF2 = 7.5 ( 4.3 - 14.1)  
 permeability constant Cp = 3.00e-09



**Fig. 9.6 resultado de la inversión del registro SRM L27 utilizando el software SAMOVARv11 (parte superior) y SAMOVARv6 (parte inferior).**

La mayor diferencia reside, también en este caso, en el valor del factor de suavizado o parámetro de regularización para la señal FID1, siendo la misma para FID2 (274 en este proceso, y 7.6 anteriormente).

Los valores y distribución de la porosidad  $w(z)$  son análogos en ambas inversiones, así como los del tiempo de relajación  $T_1^*$  y  $T_2^*(z)$  (Figura 9.7), que diferencian bien entre zona saturada y zona de arcillas, donde al no existir señal de resonancia los valores o son nulos o están fuera de rango. No obstante, desde el punto de vista cuantitativo, existen algunas diferencias entre ambos modelos.



**Fig. 9.7** Valor de  $T_1$  y  $T_2^*$  en función de la profundidad, resultado del proceso del SRM L27 por Samovar v11 (parte superior) y Samovarv6 (parte inferior).

En conclusión, la inversión que resulta de mayor fiabilidad es la del SRM L27.

## 10. Cálculo de la permeabilidad en los SRM L2 y L27

Como se explica en el apartado **2.4 Determinación de la permeabilidad**, la obtención de la permeabilidad  $k$  y transmisividad  $T_{srm}$  a partir de los resultados de un SRM puede efectuarse mediante las expresiones:

$$k = C_p \cdot w^a \cdot T^b \qquad T_{srm} = k \Delta z$$

donde  $w$  es la porosidad,  $T$  el tiempo de relajación, e  $\Delta z$  la potencia de cada capa del modelo de acuífero resultado de la inversión. Los exponentes más aconsejables son  $a=1$   $b=2$ . Utilizando la expresión  $F=wT_1^2\Delta z$ , la transmisividad se calcula por:

$$T_{srm} = C_p F$$

El coeficiente de calibración  $C_p$  puede obtenerse:

- Si se dispone del valor de la transmisividad  $T_{eb}$  en un ensayo de bombeo próximo al SRM  $C_p$  se calcula haciendo  $T_{srm} = T_{eb}$ , obteniéndose:

$$C_p = T_{eb} / F$$

Para otros lugares del acuífero, donde no existan ensayos de bombeo, la transmisividad se calculará mediante  $T_{srm} = C_p \cdot F = C_p \cdot \Sigma w \cdot T_1^2 \cdot \Delta z$  con el valor de  $F$  para cada nuevo SRM.

- Por autocalibración, calculando  $C_p$  en cada SRM por la expresión  $C_p = m \cdot F^{-n}$  donde  $m$  y  $n$  toman los valores dados por la Tabla 10.1:

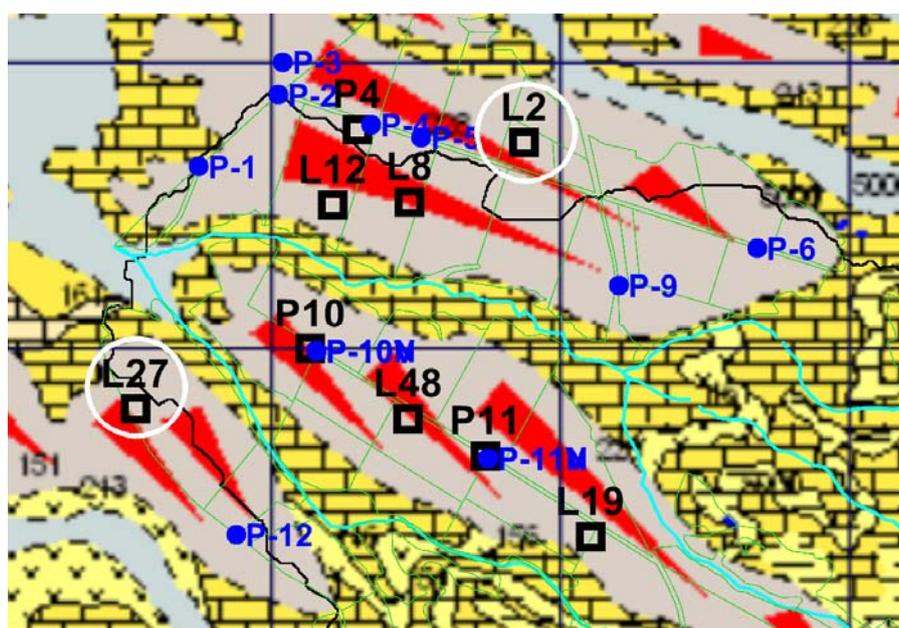
Intervalos	m	n
$F < 5 \cdot 10^4$	0,6974	1,30620
$5 \cdot 10^4 < F < 5 \cdot 10^5$	4,89E+06	2,65330
$F > 5 \cdot 10^5$	4,05E-07	0,41860
general	51,2321	1,67640

**Tabla 10.1 Valores de los coeficientes  $m$  y  $n$  según el valor del parámetro  $F$**

La transmisividad viene dada por  $T_{srm} = C_p \cdot F$  para cada SRM. Es aconsejable disponer de algún punto de control para ratificar la validez de esta metodología, ya que el está basada en valores estadísticos encontrados en varios acuíferos detríticos, y puede tener sus excepciones.

- Si no se dispone de ninguna información puede emplearse el valor estándar  $C_p = 7 \times 10^{-9}$ , que será útil sólo a efectos comparativos si no es el adecuado para ese acuífero.

La idea original de este trabajo era utilizar los SRM para apoyar la interpretación de los SEV, así como para determinar la porosidad y permeabilidad en lugares donde no se dispone de piezómetros y ensayos de bombeo. Por las razones explicadas anteriormente, se han podido medir menos SRM de los previstos, y además sólo los resultados de los SRM L2 y L27 (Figura 10.1) pueden tratar de utilizarse con finalidad cuantitativa, y ésta con reservas. Solamente los SRM P4, P10 y P11 están junto a piezómetros, por lo que la obtención del método de cálculo de la permeabilidad utilizando la información de ensayos de bombeo no es viable. Por otra parte, si se utilizara la transmisividad determinada por ensayos de bombeo en los piezómetro más próximos, P5 y P12, para calibrar los SRM L2 y L27 respectivamente, no se aportaría absolutamente nada, ya que el valor del coeficiente de calibración así obtenido no puede utilizarse en ningún otro de los SRM medidos, cuyos valores de porosidad y tiempo de relajación no son válidos nada más que a efectos de información cualitativa.



**Fig. 10.1 Situación de los SRM medidos y de los piezómetros, con indicación (circulo blanco) de los SRM con posible utilidad cuantitativa de sus resultados.**

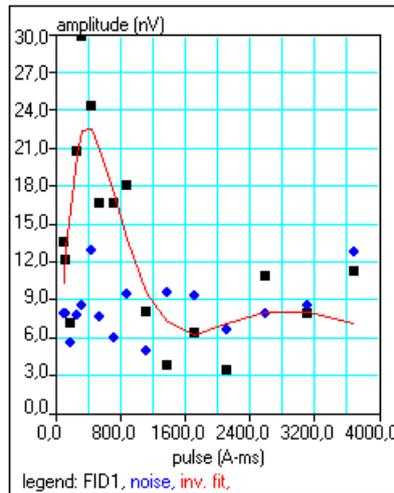
En estas circunstancias se ha optado por seguir el método de autocalibración.

### 10.1 Utilizando los datos de los SRM procesados por Samovar v6

En la Tabla 10.2 se indica el modelo resultado de la inversión del **SRM L2**. Cada capa del modelo viene definida por su profundidad (desde-hasta, potencia  $\Delta z$  y profundidad media  $z_{med}$ ), dándose los valores de la porosidad en % calculada con el valor de  $E_0$  para  $t=0$  ( $w\%$ ) y para  $t=-40$  ms ( $w\%_{extr}$ : valor extrapolado al origen real de la exponencial  $e(t)$ ), así como los tiempos de relajación  $T_1$  y  $T_2^*$ . Para cada capa se ha calculado el valor del parámetro  $F = \Delta z w_{extr} T_1^2$

desde	hasta	$\Delta Z$	$z_{med}$	w %	$T_2^*$	$w\%_{extr}$	$T_1$	$F_i$
0	1	1	0,5	0,8787	93,8	1,3373	181,3	439,6
1	2	1	1,5	0,2637	1000	0,2744	149,6	61,4
2	3	1	2,5	0,6879	348,9	0,7707	114,4	100,9
3	4	1	3,5	1,5948	235,9	1,8864	98,7	183,8
4	5	1	4,5	2,2174	203,3	2,6943	151,1	615,1
5	6	1	5,5	2,6587	171,2	3,3498	244,4	2000,9
6	7	1	6,5	2,9183	152	3,7847	365,9	5067,1
7	8	1	7,5	2,956	148,6	3,8563	460,4	8174,1
8	9	1	8,5	2,6352	147,6	3,4443	462,1	7354,8
9	10	1	9,5	2,0206	146,4	2,647	382,8	3878,8
10	11	1	10,5	1,2637	148	1,6506	282,5	1317,3
11	13,1	2,1	12,1	0,4849	163,7	0,6173	191,3	474,4
13,1	16,3	3,2	14,7	0	0	0	0	0,0
16,3	20,2	3,9	18,2	0,2822	1000	0,2937	99,5	113,4
20,2	25	4,8	22,6	1,1206	1000	1,166	50	139,9
25	30	5	27,5	1,6582	1000	1,7254	50	215,7

**Tabla 10.2 Fragmento del fichero SRML2.nov (recogido en el ANEXO Digital) resultado de la inversión, al que se ha añadido el cálculo del factor F. Se ha sombreado la zona considerada para los cálculos, con porosidad superior al 2 %.**

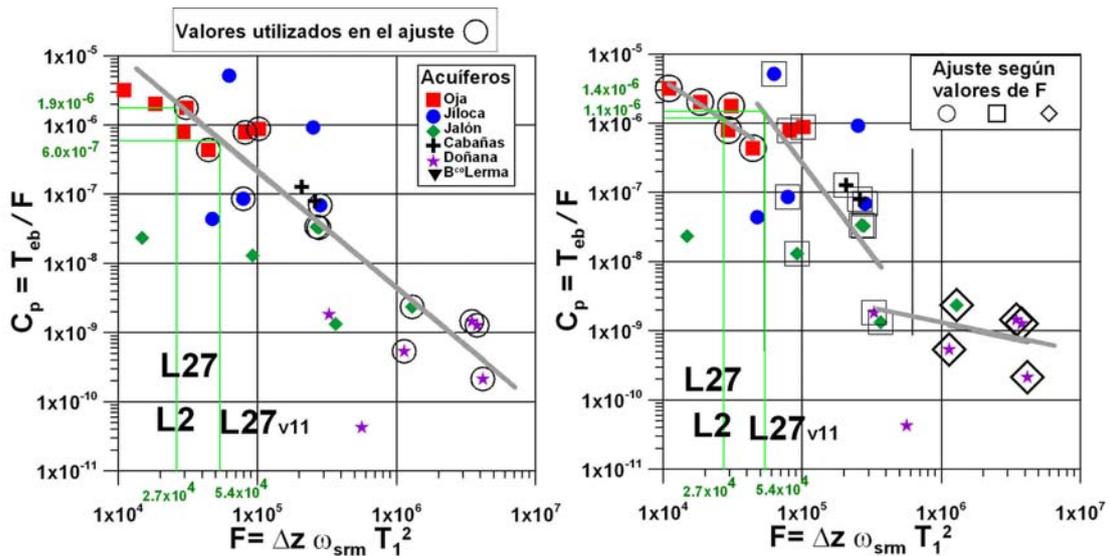


**Fig. 10.2 Ajuste de la curva SRM teórica del modelo (línea de color rojo) a los valores  $e(t)$  filtrados del SRM L2 (cuadrados negros). Ruido: rombos azules.**

En la Figura 10.2 se reproduce la curva teórica del modelo junto con los valores medidos; aunque el error de ajuste sea del 25.78 % se aprecia que la desviación producida se debe principalmente a los valores pertenecientes a los pulsos de momento superior a 1200 A.ms, por lo que puede aceptarse que la aproximación para la parte más superficial, que es donde

está el acuífero, es mejor. No obstante, los máximos valores medidos de  $E_0$  (30 nV para unos 400 A.ms) no han sido incorporados al modelo, por lo que los valores del parámetro  $w(z)$  de la inversión pueden considerarse como valores mínimos.

Se va a tomar como zona saturada en este modelo la que tiene valores de porosidad  $w(z)$  superiores al 2%, que es el tramo de los 4 a los 10 m de profundidad, como una aproximación válida a la información dada por el SEV L2 y piezómetro P5, en los que las arcillas se sitúan a 8-9 m de profundidad, con una zona saturada de unos 4-5 m de potencia. El valor acumulado de  $F$  para dicho tramo es 27090. Utilizando el método de cálculo  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , se van a emplear los valores de  $m$  y  $n$  correspondientes al intervalo  $F < 5 \times 10^4$  del factor  $F$ , así como los correspondientes a un ajuste general (Tabla 10.1), obteniéndose  $C_p = 1.13 \times 10^{-6}$  y  $C_p = 1.89 \times 10^{-6}$  respectivamente (Figura 10.3 y Tabla 10.3). Con estos valores se han calculado la Transmisividad y permeabilidad correspondientes a la potencia de 6 m considerada (Tabla 10.3).



**Fig. 10.3 Autocalibración de los SRM L2 y L27, según el valor del parámetro  $F$  (derecha) y según el ajuste general (izquierda). Para el SRM L27 se ha efectuado el cálculo según el modelo deducido en la inversión utilizando la aplicación Samovar v.6 y v.11. Esta Figura es copia de la Figura 2.10, a la que se ha superpuesto los valores de  $F$  ahora calculados.**

método	$C_p$	$T_{srm} \text{ m}^2/\text{s}$	$T_{srm} \text{ m}^2/\text{día}$	$K \text{ m/d}$	$K \text{ m/s}$
Para $F < 5 \times 10^4$	1,13E-06	0,0306	2646,460	441,0767	0,005105
General	1,89E-06	0,0514	4443,1876	740,5312	0,008570

**Tabla 10.3 Cálculo del coeficiente de calibración y transmisividad en el SRM L2.**

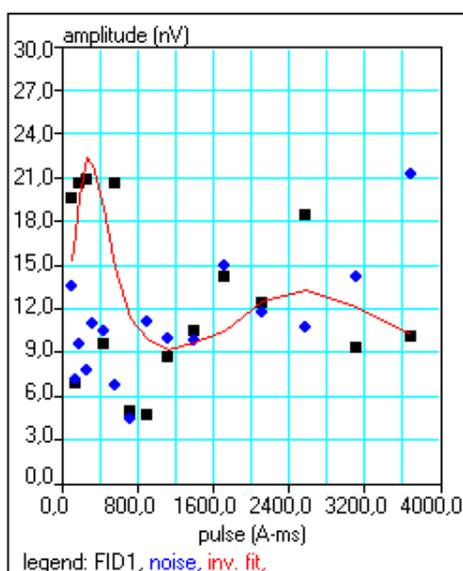
Para el SRM L2 puede adoptarse un valor medio de  $C_p = 1.5 \times 10^{-6}$  y una permeabilidad del orden de 400-700 m/día ( $5-8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ).

El resultado numérico del modelo obtenido en la inversión del **SRM L27** se encuentra recogido en la Tabla 10.4.

desde	hasta	Z m	zmed	w%	T2* ms	w%extr	T1 ms	Fi
0	1	1	0,5	1,0899	1000	1,1341	398,6	1801,8
1	2	1	1,5	1,1526	1000	1,1993	396,5	1885,4
2	3	1	2,5	2,2184	144,3	2,9172	391,7	4475,8
3	4	1	3,5	3,234	73,9	5,501	373,1	7657,5
4	5	1	4,5	3,2995	59,1	6,398	341	7439,6
5	6	1	5,5	2,5432	49,3	5,6066	303,4	5160,9
6	7	1	6,5	1,3513	39,4	3,6182	263,3	2508,3
7	8	1	7,5	0,3885	30	1,4024	223,8	702,4
8	9	1	8,5	0	0	0	0	0
9	10	1	9,5	0	0	0	0	0
10	11	1	10,5	0	0	0	0	0
11	13,1	2,1	12,1	0	0	0	0	0
13,1	16,3	3,2	14,7	0,4197	1000	0,4368	142,2	282,6
16,3	20,2	3,9	18,2	1,4153	804,7	1,487	89,4	463,5
20,2	25	4,8	22,6	2,1578	378,6	2,3963	50	287,5
25	30	5	27,5	2,443	318,8	2,7666	50	345,8

**Tabla 10.4** Fragmento del fichero **SRML27.nov** (recogido en el ANEXO Digital) resultado de la inversión, al que se ha añadido el cálculo del factor **F**.

En la Figura 10.4 se reproduce la curva teórica de dicho modelo superpuesta a las mediciones de campo filtradas. El error de ajuste del 36.76 % se debe fundamentalmente a la desviación producida por los valores pertenecientes a los pulsos de momento superior a 1600 A.ms, aunque la desviación es también grande para pulsos inferiores cuando la señal está por debajo de 10 nV y es del mismo orden de magnitud que el ruido, por lo que la aproximación del modelo va a proporcionar valores máximos.



**Fig. 10.3** Ajuste de la curva SRM teórica del modelo (línea de color rojo) a los valores  $e(t)$  filtrados del SRM L27 (cuadrados negros). Ruido: rombos azules.

De este modelo  $w(z)$  (Tabla 10.4) se va a tomar como zona saturada la que tiene valores de porosidad ( $w_{extr}$ ) superiores al 2%, que es tramo de los 2 a los 7 m de profundidad. La información del SEV L27 indica que la base del acuífero se sitúa a unos 5 m de profundidad, no teniéndose información de la zona saturada que quizá se corresponda sólo con la zona de porosidad superior al 5-6 %; no obstante, por congruencia con el SRM L2 se ha optado por utilizar el mismo valor de corte de porosidad. El valor acumulado de F para dicho tramo es 27242, del mismo orden que el valor calculado en el SRM L2. Utilizando el método de cálculo  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , con los valores de m y n correspondientes al rango de F y al ajuste general (Tabla 10.1) se obtiene  $C_p = 1.12 \times 10^{-6}$  y  $C_p = 1.88 \times 10^{-6}$  respectivamente (Figura 10.3 y Tabla 10.5) siendo aplicable un valor medio de  $C_p = 1.5 \times 10^{-6}$ . En la Tabla 10.5 se han calculado los valores de transmisividad y permeabilidad correspondientes.

método	Cp	Tmrs m2/s	Tmrs m2/día	k m/d	k m/s
Para $F < 5 \times 10^4$	1,122E-06	0,03058	2641,942939	528,3885	0,006115
General	1,8806E-06	0,05123	4426,451065	885,290	0,010246

**Tabla 10.5 Cálculo del coeficiente de calibración en el SRM L27**

En el tramo de los 5 m de este emplazamiento la permeabilidad sería del orden de 500-900 m/día ( $6-10 \times 10^{-3}$  m/s), igual a la obtenida para el SRM L2.

Aunque para el resto de los SRM efectuados no es posible utilizar los valores numéricos, dada la distribución geográfica del SRM L2 y SRM L27 (Figura 10.1) y la similitud cualitativa del resto de las mediciones (Figura 9.3), es factible asumir que el rango de permeabilidad es representativo de toda el área.

## 10.2 Utilizando los datos de los SRM procesados por Samovar v11

Para el SRM L27 pueden realizarse también los cálculos de permeabilidad utilizando los resultados de su inversión con Samovar.v11. Del modelo  $w(z)$  obtenido (Tabla 10.6) se va a tomar como zona saturada la que tiene valores de porosidad superiores al 2%, que es tramo de los 2 a los 9.11 m de profundidad, en el que se alcanza un máximo del orden del 5 %.

desde	hasta	z	zmed	W %	T2*(ms)	%extr	T1 (ms)	Fi
0,24	0,8	0,56	0,52	2,1997	324,4	2,4859	466	3023,037362
0,8	1	0,2	0,9	1,9354	413,8	2,1303	465,4	922,8338599
1	1,5	0,5	1,25	1,5369	602,6	1,6416	461,9	1751,190015
1,5	2	0,5	1,75	0	0	0	0	0
2	2,5	0,5	2,25	1,7333	195,4	2,1226	456,6	2212,636022
2,5	2,78	0,28	2,64	2,271	98,2	3,3915	447,6	1902,523406
2,78	4,33	1,55	3,56	2,8025	57,7	5,5226	438,4	16451,91199
4,33	5,62	1,29	4,98	2,3249	45,8	5,4439	429,4	12948,63322
5,62	9,11	3,49	7,37	0,8888	30	3,2083	426,1	20329,34877
9,11	10,99	1,88	10,05	0	0	0	0	0
10,99	14,62	3,63	12,8	0	0	0	0	0
14,62	18,98	4,36	16,8	0,7667	1000	0,7978	418,3	6086,340572
18,98	24,14	5,16	21,56	1,5797	550,5	1,698	416,6	15206,38279
24,14	30,15	6,01	27,14	1,9	402,2	2,097	414,3	21632,30358
30,15	37,08	6,93	33,61	1,9762	390,8	2,1875	418,8	26588,5493
37,08	38,28	1,2	37,68	1,988	420,4	2,1849	421,9	4666,936175

**Tabla 10.6 Fragmento del fichero SRML27.nov resultado de la inversión por Samovar.v11, al que se ha añadido el cálculo del factor F.**

El valor acumulado de F en dicho tramo es 53845. Utilizando el método de cálculo por autocalibración  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , con los valores de m y n correspondientes al rango de F (Tabla 10.1) se obtiene  $C_p = 1.368 \times 10^{-6}$ , y utilizando los valores generales  $C_p = 6 \times 10^{-7}$  (Figura 10.3), siendo aplicable un valor de  $C_p = 5.305 \times 10^{-7}$ . En la Tabla 10.7 se han calculado los correspondientes valores de transmisividad y permeabilidad.

método	Cp	Tmrs m2/s	Tmrs m2/día	k m/d	k m/s
$5 \cdot 10^4 < F < 5 \cdot 10^5$	1,368E-06	0,07367	6365,30518	896,5218563	0,01037641
<b>General</b>	6,00136E-07	0,03231	2791,95795	393,2335141	0,004551314

**Tabla 10.7 Cálculo del coeficiente de calibración del SRM L27v11.**

Puede adaptarse para este sondeo una permeabilidad del orden de 400-900 m/día ( $4.5 \cdot 10 \times 10^{-3}$  m/s), mismo orden de magnitud al obtenido con el proceso por Samovar.v6.

## 11. Verificación con los resultados de ensayos de bombeo

### 11.1 Comparación de valores obtenidos

El equipo técnico de la Oficina del IGME en Zaragoza participante en este Proyecto ha facilitado los datos reflejados en la Tabla 11.1 referentes a los ensayos hidráulicos para obtener la transmisividad en los diferentes piezómetros del Barranco de Lerma.

piezómetro	Zona saturada m	transmisividad		permeabilidad	
		m <sup>2</sup> /d inyección	m <sup>2</sup> /d recuperación	m/d inyección	m/d recuperación
P1	0,89	8,45	8,33	9,49	9,36
P2	1,16	3,02	1,84	2,60	1,59
P3	1,06	4,73	3,7	4,46	3,49
P4	3,96	19,45	12,53	4,91	3,16
P5	3,54	3,53	2,65	1,00	0,75
P6	0,96	2,37	2,37	2,47	2,47
P7	0	0,17	0,16		
P8	0,19	0,06	0,05	0,32	0,26
P9	2,27	8,93	5,66	3,93	2,49
P10V	1,14	12	12,6	10,53	11,05
P10	0,7	73,8	73,8	105,43	105,43
P11V	2,57	16	15,17	6,23	5,90
P11	1,89	14,52	13,93	7,68	7,37
P12	0,83	5,6	4,61	6,75	5,55
P11V	2,34	4,46	4,46	1,91	1,91
P11V	2,57	2,12	8	0,82	3,11
P11V	2,57	6,04	6,04	2,35	2,35
P10	0,7	68	68	97,14	97,14

**Tabla 11.1 Resultados de ensayos de Inyección y de Bombeo (sombreado en azul) en el Barranco de Lerma. Los valores sombreados en amarillo señalan los piezómetros más próximos a los SRM L2 y L27.**

Estos valores se han representado en su conjunto, ordenados de forma creciente, en las Figuras 11.1 y 11.2. La transmisividad (Figura 11.1) tiene un rango total de  $5.8 \times 10^{-7}$  a  $8.5 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, con media aritmética de  $1.6 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s; suprimiendo los extremos inferior (P7 y P8) y superior (P10), el rango se reduce a  $2.1 \times 10^{-5}$  -  $2.2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, con media aritmética de  $8.8 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, que representa prácticamente la transmisividad de este acuífero. Considerando las potencias de zonas saturadas indicadas en la Tabla 11.1, la permeabilidad (Figura 11.2) tiene como valores extremos  $3 \times 10^{-6}$  m/s de mínimo en el P8 y  $1.2 \times 10^{-3}$  m/s de máximo en el P10; eliminando estos extremos el rango queda en  $1.8 \times 10^{-5}$  -  $1.3 \times 10^{-4}$  m/s, con media aritmética de  $5.5 \times 10^{-5}$  m/s. A estos mismos gráficos se han trasladado los valores de transmisividad y permeabilidad calculados a partir de la autocalibración de los SRM L2, L27 y L27v11 (cálculos en las tablas 10.3, 10.5 y 10.7, sintetizadas en la Tabla 11.2). Resulta evidente que la diferencia entre ambas determinaciones es de un excesivo orden de magnitud para aceptar los valores obtenidos a través de los SRM, por lo que se ha procedido a estudiar la razón de esta desviación.



### 11.2 Análisis de la diferencia

El método de autocalibración, explicado en el apartado 2.4 de este Informe, se basa en un estudio efectuado en varios acuíferos para los que se ha encontrado una relación entre la transmisividad calculada por ensayos de bombeo en sondeos próximos a los SRM efectuados en cada zona y el coeficiente de calibración  $C_p$  obtenido por calibración según el método de hacer  $C_p = T_{eb}/F_i$  (Figura 2.9). Puesto que el valor del factor  $F$  obtenido para los modelos de los SRM L2 y L27 procesados por la aplicación Samovarv6 es el mismo, vamos a considerar aquí solamente los SRM L2 y L27v11 (L27 procesado con Samovarv11). Se han tomado como valores de  $T_{eb}$  más representativos los medios de los rangos total y restringido  $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $8.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  respectivamente (Figura 11.1). Con estos valores se han calculado los correspondientes coeficientes de calibración (Tabla 11.3), que se han transportado a la Figura 2.9, reproducida en la Figura 11.3.

SRM	$T_{eb} \text{ m}^2/\text{s}$	$F_i$	$C_p = T_{eb}/F_i$
L2	1,60E-04	2,71E+04	5,90E-09
L2	8,80E-05	2,71E+04	3,25E-09
L27 v11	1,60E-04	5,38E+04	2,97E-09
L27 v11	8,80E-05	5,38E+04	1,63E-09

Tabla 11.3 Cálculo de los coeficientes de calibración a través de ensayos de bombeo para los SRM L2 y L27v11.

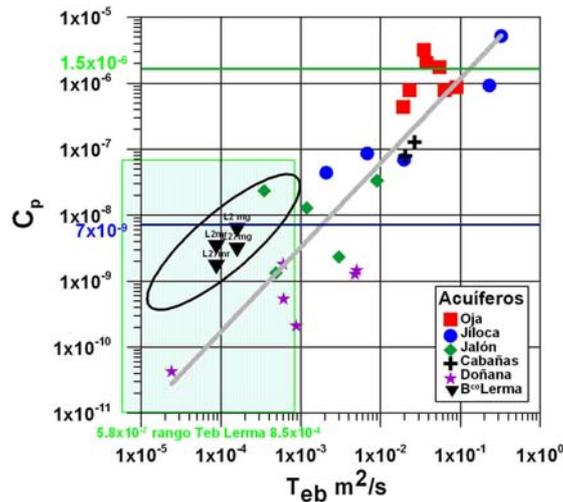
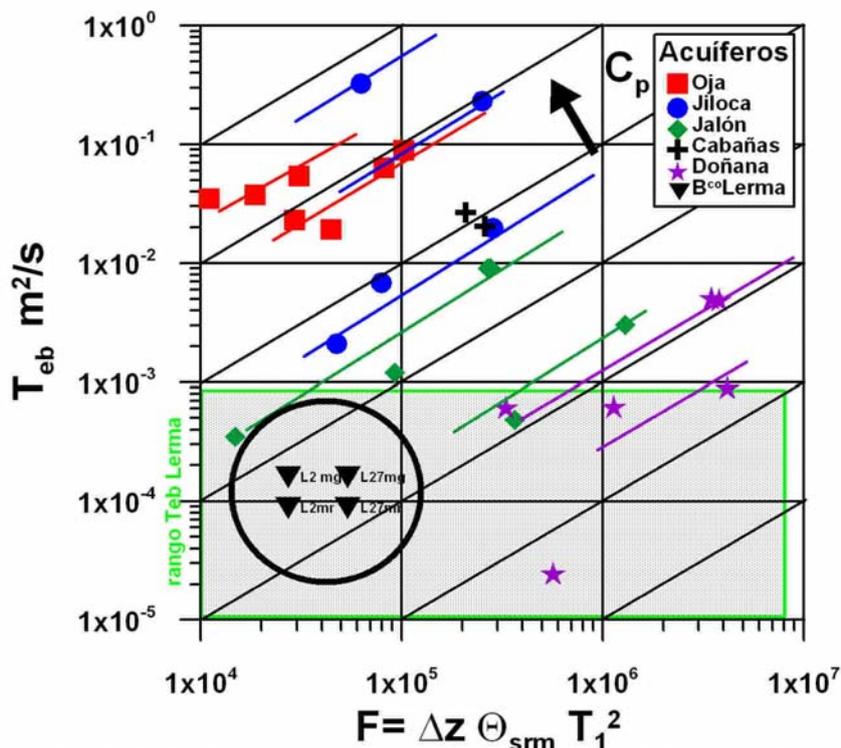


Fig. 11.3 Relación  $C_p$ - $T_{eb}$  para diversos acuíferos, incluyendo el Barranco de Lerma. La zona sombreada indica el rango total de transmisividades medidas en este acuífero. Se señala además el coeficiente calculado por autocalibración de  $1.5 \times 10^{-6}$ .

La regla general hasta ahora encontrada sigue cumpliéndose en el Barranco de Lerma: en acuíferos de baja transmisividad se han encontrado siempre valores del coeficiente de calibración inferiores a los encontrados en acuíferos de mayor transmisividad. Para Lerma,  $T_{eb}$  es del mismo orden de magnitud que para algunas zonas del acuífero estudiado en Doñana y en el río Jalón.

La siguiente relación en que se basa el método de autocalibración es la encontrada entre los valores del factor F calculado con los parámetros de inversión de los SRM y la transmisividad  $T_{eb}$  (Figura 2.9, reproducida en la Figura 11.4). Transportando a este gráfico los valores F- $T_{eb}$  del Barranco de Lerma se observa que se produce una anomalía respecto de la regla general: los acuífero de baja transmisividad hasta ahora estudiados se sitúan en general en esta relación en la zona de altos valores del parámetro F (p.e. acuífero de Doñana), mientras que Lerma se localiza en la zona de bajos valores de F, al igual que alguna zona del acuífero del río Jalón. Esto es debido fundamentalmente a la potencia de la zona saturada, que en Lerma es muy pequeña, mientras que en Doñana es del orden de decenas de metros.



**Fig. 11.4 Relación F-Teb para diversos acuíferos, incluyendo el Barranco de Lerma. La zona sombreada indica el rango total de transmisividades de este acuífero.**

Por lo tanto, el valor de  $C_p$  que se está buscando es en realidad el que debe dar un acuífero de baja transmisividad, con independencia del valor del valor del factor F, es decir, habría que calcularlo utilizando el ajuste realizado para acuíferos como el de Doñana y parte del Jalón, pero para menores valores de F. Se ha procedido por lo tanto a recalcular los valores de  $C_p$  por el método de autocalibración (Tabla 11.4 y Figura 11.5), utilizando los coeficientes m y n de un ajuste a valores de  $F > 5E05$ , pero con el valor de F calculado en los SRM, que es inferior a  $5E05$ . Se ha añadido además el cálculo utilizando el coeficiente estándar  $C_p = 7 \times 10^{-9}$ .

SRM	Fi	método	Cp	Tsm m2/s	k m/s	Tsm m2/dia	k m/d
L2	2,70E+04	F > 5 10 <sup>5</sup>	5,65E-09	1,53E-04	2,55E-05	1,32E+01	2,20E+00
L2	2,70E+04	standard	7,00E-09	1,90E-04	3,16E-05	1,64E+01	2,73E+00
L27v11	5,40E+04	F > 5 10 <sup>5</sup>	4,24E-09	2,28E-04	3,21E-05	1,97E+01	2,77E+00
L27v11	5,40E+04	standard	7,00E-09	3,77E-04	5,30E-05	3,26E+01	4,58E+00

Tabla 11.4 Recalculo del coeficiente Cp por autocalibración, y correspondientes valores de transmisividad y permeabilidad para los SRM L2 y L27v11.

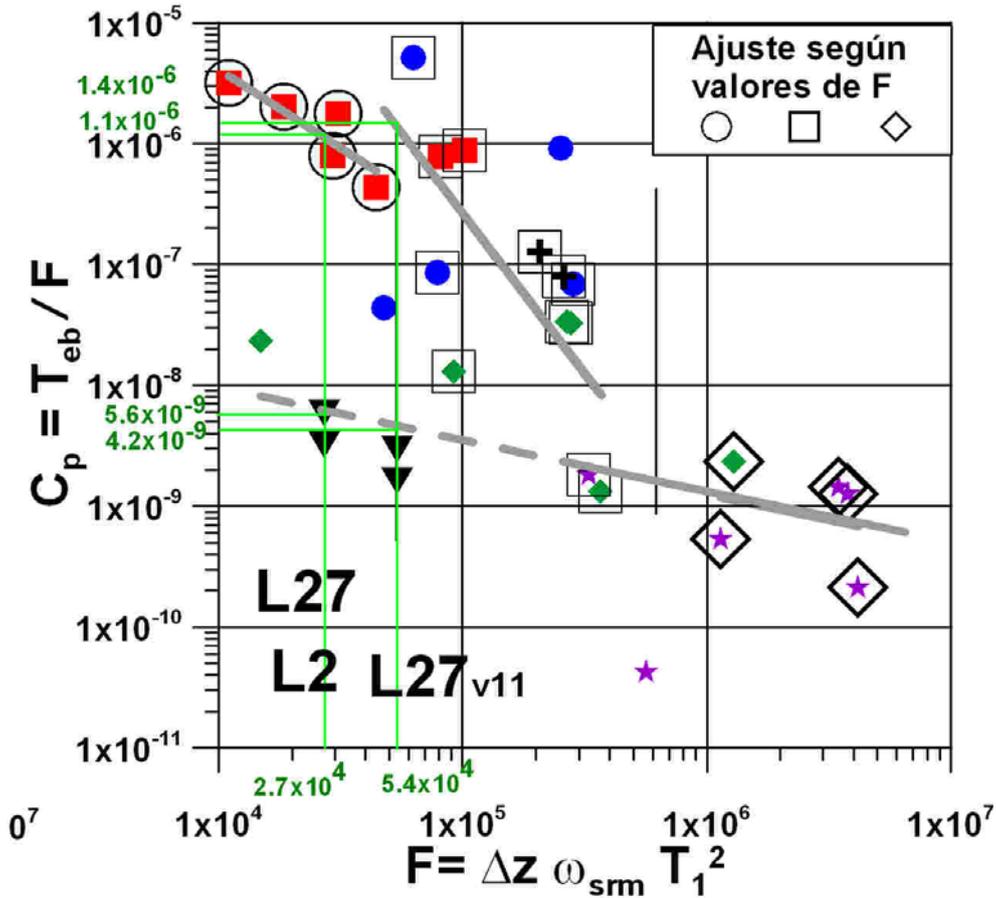
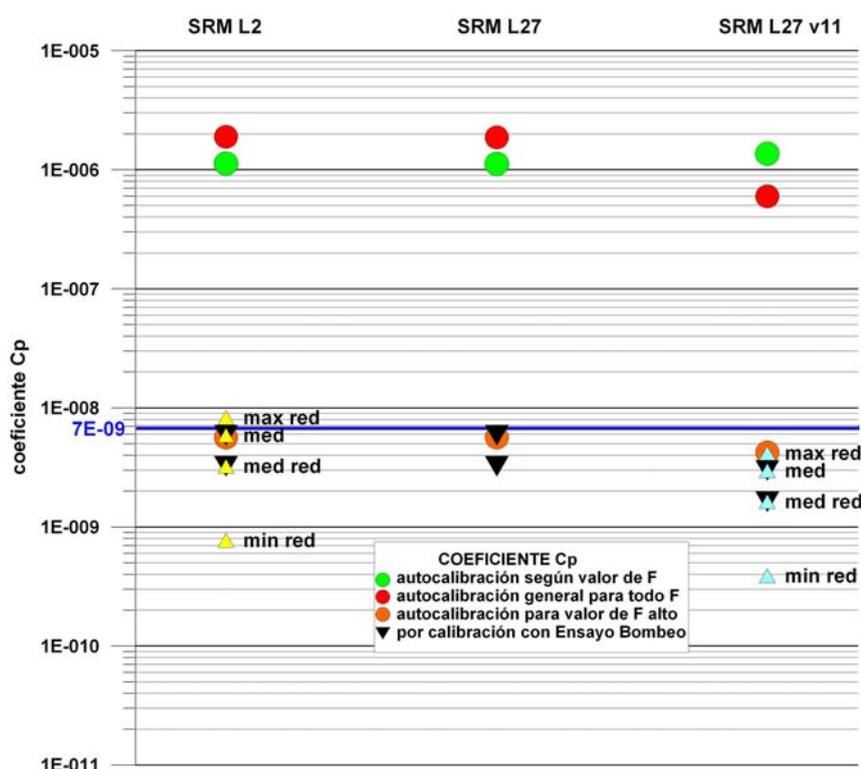


Fig. 11.5 Autocalibración de los SRM L2 y L27.v11 utilizando los coeficientes de ajuste a altos valores de F extrapolado a bajos valores de F, como corresponde a zonas de baja transmisividad con poca potencia de zona saturada.

Los valores de transmisividad y permeabilidad así calculados se han transportado a las Figuras 11.1 y 11.2, apreciándose que se corresponden muy bien con los obtenidos en los ensayos de inyección y de bombeo. La conclusión es que el método SRM es capaz de ayudar a determinar estos parámetros hidráulicos, aunque como en todo método geofísico es muy recomendable (o incluso necesario) el contar con puntos de control.

Como síntesis, en la Figura 11.6 se reúnen los valores de los coeficientes de calibración que se obtienen para los SRM contemplados, calculados por distintos métodos:

- utilizando la expresión de autocalibración  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , con los coeficientes m y n deducidos para el valor de F (según F)
- utilizando la expresión de autocalibración  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , con los coeficientes m y n deducidos para cualquier valor de F (general para todo F)
- utilizando la expresión de autocalibración  $C_p = m \cdot F^{-n}$ , con los coeficientes m y n deducidos para el valores altos de F, pero con el valor de F del SRM (para valor de F alto)
- utilizando la calibración con ensayos de bombeo con el valor medio de transmisividad en el rango total y en el rango reducido



**Fig. 11.6 Valores del coeficiente de calibración  $C_p$  según el método utilizado. En los SRM L2 y L27v11 se han incluido los coeficientes que se hubieran obtenido de utilizar para la calibración los valores máximo y mínimo del rango reducido de valores de transmisividad indicado en la Figura 11.1. Se indica además el valor estándar  $C_p = 7 \times 10^{-9}$**

La novedad que ha introducido este trabajo, con valores de transmisividad excepcionalmente pequeños, es que cuando se emplea en método de autocalibración hay que tener en cuenta no sólo el valor del factor F sino el rango de transmisividad, de lo que no existía experiencia hasta ahora en los acuíferos investigados con SRM. Para este acuífero ha resultado además que el uso del coeficiente  $C_p$  estándar proporciona un resultado aceptable; dicho coeficiente ha sido el utilizado en el proceso de datos de inversión, representándose en las Figuras 11.7 y 11.8 la distribución de la transmisividad y permeabilidad en los sondeos SRM L2 y L27 respectivamente.

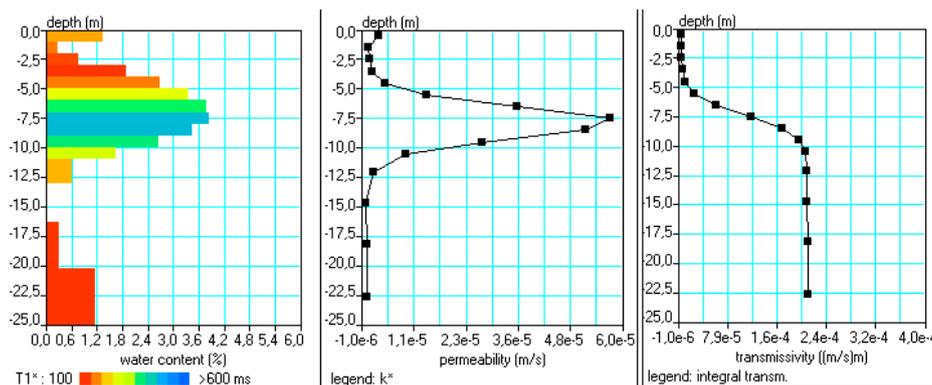


Fig. 11.7 Distribución de la porosidad (% de contenido en agua), permeabilidad en m/s y transmisividad acumulada en m<sup>2</sup>/s en función de la profundidad para el SRM L2, utilizando un coeficiente de calibración Cp=7x10<sup>-9</sup>.

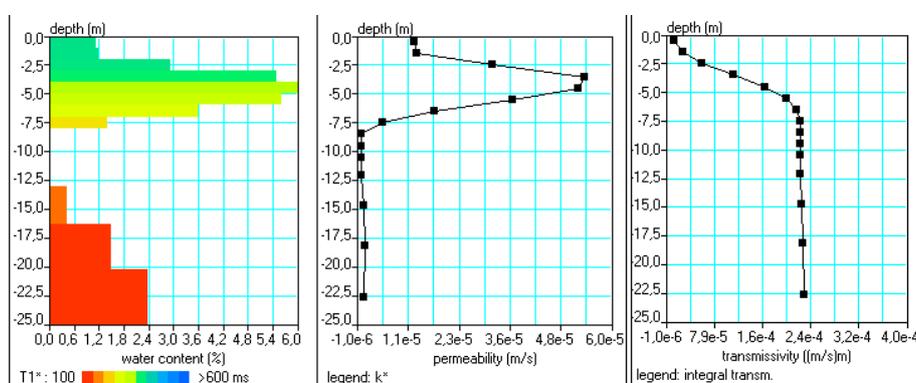


Fig. 11.8 Distribución de la porosidad (% de contenido en agua), permeabilidad en m/s y transmisividad acumulada en m<sup>2</sup>/s en función de la profundidad para el SRM L27, utilizando un coeficiente de calibración Cp=7x10<sup>-9</sup>.

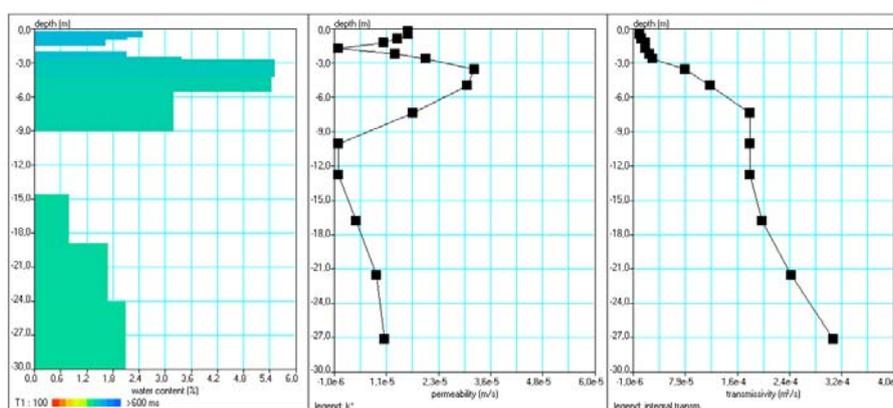


Fig. 11.9 Distribución de la porosidad (% de contenido en agua), permeabilidad en m/s y transmisividad acumulada en m<sup>2</sup>/s en función de la profundidad para el SRM L27v11, utilizando un coeficiente de calibración Cp=3x10<sup>-9</sup>.

Para el modelo obtenido procesando los datos de campo del SRM L27 con la aplicación Samovar v.11, el coeficiente de calibración deducido teniendo en cuenta el valor medio de transmisividad en los ensayos de inyección y bombeo es Cp=3x10<sup>-9</sup>. Recalculando la

transmisividad y permeabilidad con este coeficiente, se obtiene la distribución con la profundidad indicada en la Figura 11.9.

Finalmente, como demostración de la forma en que funciona el método, se ha utilizado el coeficiente Cp evaluado en el SRM L2 mediante la información de los ensayos de bombeo (Tabla 11.3), para calcular la transmisividad en el SRM L27 (F=27242, potencia 5 m) (Tabla 11.5).

Cp	Tsrm m <sup>2</sup> /s=Cp x F	k m/s	Tsrm m <sup>2</sup> /día	k m/d
5,90E-09	1,61E-04	3,21E-05	1,39E+01	2,78E+00
3,25E-09	8,85E-05	1,77E-05	7,65E+00	1,53E+00

**Tabla 11.5 Cálculo de la transmisividad en el SRM L27 utilizando el coeficiente de calibración deducido en el SRM L2.**

Estos valores han sido transportados a las Figuras 11.1 y 11.2. De la misma forma se procedería con el resto de los SRM, si los modelos del subsuelo obtenidos en la inversión de los mismos tuvieran la fiabilidad necesaria para su uso cuantitativo.

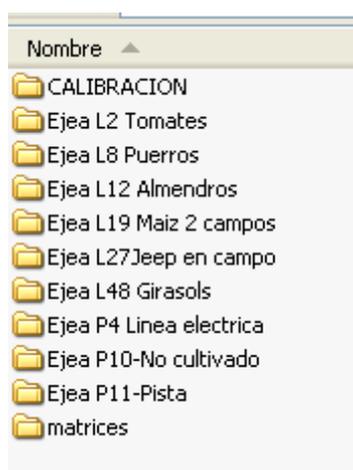


## ANEXO DIGITAL

Contiene los ficheros de texto y figuras de este documento, así como los ficheros de datos de campo y procesados.

El texto y las tablas están en formato Word y Excel de Microsoft Office 2003; las figuras se han generado en Grapher7 y Surfer9 de Golden. Para manejar los datos de los SRM es preciso disponer de las aplicaciones PRODIVINER y SAMOVAR de Iris Instruments, aunque el formato de la mayoría de los ficheros está en código ascii, por lo que pueden abrirse con cualquier editor de texto.

Los datos de los SRM están organizados en las siguientes carpetas:



En las que se encuentran los datos de campo, los resultados de proceso y todos los gráficos generados con los mismos.

Nota: este Anexo está incluido en el CD que acompaña al *Informe sobre la determinación de la potencia de glaciares en el barranco de Lerma (Zaragoza) mediante SEV, 2011*.

