

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS E
INGENIERÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL SUBSUELO MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA. APLICACIÓN AL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE CLUNIA

FEBRERO DE 2003

Autor:

D. JOSÉ ÁNGEL PORRES BENITO

Director:

D. ENRIQUE ARACIL ÁVILA



UNIVERSIDAD DE BURGOS

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no habría podido desarrollarse sin el apoyo y colaboración de numerosas personas y organismos, sin quienes este trabajo no podría haber salido adelante. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos ellos, y en especial a:

D. Enrique Aracil Ávila, director de esta tesis, por sus amplios conocimientos en geofísica, por su siempre amable y fácil trato, cuyo estímulo e interés ha conseguido que mi trabajo haya sido agradable y sobre todo muy interesante.

D. Luis M^a García Castillo, catedrático de Ingeniería del Terreno, por su amabilidad, confianza y buenas ideas.

D. Sergio Ibáñez García, compañero y amigo, por su constante ánimo, por su desinteresada colaboración y preocupación por mi trabajo, conocedor e impulsor de esta tesis.

Dña. Ana Belén Espinosa González, paciente compañera que me ha facilitado la comprensión de múltiples documentos con su ayuda a la traducción.

D. José Antonio Barco Herrera, por su conducta ejemplar y excepcional calidad técnica, modelo y referencia en mis investigaciones.

También quiero manifestar mi agradecimiento a Organismos y Empresas como:

La Junta de Castilla y León, que a través de la Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural de la Consejería de Educación y Cultura ha subvencionado la investigación realizada en el yacimiento arqueológico de la Ciudad Romana de Clunia.

La Excelentísima Diputación Provincial de Burgos, por aprobar y apoyar esta investigación, permitiendo mi acceso al yacimiento de Clunia y el uso de sus instalaciones en Peñalba de Castro, así como muy especialmente al Equipo Director de las excavaciones, Miguel Ángel de la Iglesia y Francesc Tusset por su disposición permanente y su cordialidad.

La Universidad de Burgos, sin cuyos medios y equipos no habría podido desarrollar esta investigación.

La Empresa Stone Work, por su aportación generosa al permitir incluir en esta investigación diversos perfiles de tomografía para su estudio y análisis.

A las Empresas Meaztegi y Basoinsa, por su cortesía y amabilidad al permitirme analizar e incluir en esta tesis trabajos de tomografía eléctrica realizados en La Arboleda, provincia de Vizcaya.

TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL SUBSUELO MEDIANTE LA
INTERPRETACIÓN DE PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.
APLICACIÓN AL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE CLUNIA**

JOSÉ ÁNGEL PORRES BENITO
LICENCIADO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y PLAN DE INVESTIGACIÓN	5
3. ANTECEDENTES	13
3.1. LA PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO	15
3.2. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA ACTUALES	15
3.3. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DESDE LA SUPERFICIE	19
3.3.1. LA PROSPECCIÓN SÍSMICA	19
3.3.2. LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA	23
3.3.3. LA PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	24
3.3.4. LA PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA	27
3.3.5. LA PROSPECCIÓN MAGNÉTICA.....	30
3.3.6. MÉTODOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA PROTÓNICA ...	32
3.4. PROSPECCIÓN EN SONDEOS (Testificación Geofísica)	33
3.4.1. LA RADIATIVIDAD NATURAL	34
3.4.2. EL POTENCIAL ESPONTÁNEO	35
3.4.3. LA RESISTIVIDAD	36
3.4.4. CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA DEL FLUIDO	37
3.4.5. SÓNICO	37
3.4.6. VERTICALIDAD Y DESVIACIÓN	38
3.4.7. NEUTRÓN-NEUTRÓN	38
3.4.8. DENSIDAD	39
3.4.9. CALIBRE	39
3.5. CONCLUSIONES	40
4. MÉTODOS ELÉCTRICO-RESISTIVOS DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO	43
4.1. INTRODUCCIÓN	45
4.2. CONCEPTO DE CAMPO ELÉCTRICO	45

4.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE GEOFÍSICA	
DE RESISTIVIDADES.....	48
4.3.1. EL FLUJO DE CORRIENTE	49
4.3.2. CONCEPTO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	51
4.3.3. LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS MATERIALES.....	53
4.4. RELACIÓN ENTRE LA GEOLOGÍA Y LA RESISTIVIDAD	56
4.5. TIPOS DE PROSPECCIONES GEOELÉCTRICAS	58
4.5.1. MODELO UNIDIMENSIONAL (1-D).....	58
4.5.2. MODELO BIDIMENSIONAL (2-D)	59
4.5.3. MODELO TRIDIMENSIONAL (3-D)	59
4.6. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES Y CALICATAS	
ELÉCTRICAS	60
4.6.1. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO.....	60
4.6.2. CONCEPTO DE RESISTIVIDAD APARENTE.....	65
4.6.3. DISPOSITIVOS TETRAELECTRÓDICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	65
4.7. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	68
4.7.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	68
4.7.2. ÁMBITOS DE APLICACIÓN	71
4.7.3. ANTECEDENTES. ALGUNOS TRABAJOS PRÁCTICOS	72
4.7.3.1. Introducción	72
4.7.3.2. Aplicación de la tomografía eléctrica para identificar discontinuidades en el terreno. Los deslizamientos de tierras.....	73
4.7.3.3. Investigación de la contaminación de aguas subterráneas en zonas de vertederos usando métodos eléctricos y electromagnéticos	78
4.7.3.4. Imágenes geofísicas dentro de estructuras de sillería ...	84
4.7.4. FIABILIDAD DEL MÉTODO. ESTADO ACTUAL	90
5. ENSAYOS DE RESPUESTA ELÉCTRICA	93
5.1. EL DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS.....	95
5.2. MEDICIONES DE RESISTIVIDAD SOBRE MUESTRAS DE LABORATORIO.....	98
5.2.1. ANTECEDENTES.....	98

5.2.2. MEDIDAS DE LABORATORIO.....	99
5.2.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	101
5.3. EXPERIMENTACIÓN SOBRE MODELOS REDUCIDOS.....	103
5.3.1. DETERMINACIÓN Y OBJETIVOS DEL MODELO	103
5.3.2. EXPERIENCIA 0: ESTRATO DE ARENA (sin objetos).....	109
5.3.3. EXPERIENCIA 1: BLOQUE HUECO DE HORMIGÓN	112
5.3.4. EXPERIENCIA 2: BLOQUE HUECO DE CERÁMICA.....	115
5.3.5. EXPERIENCIA 3: BOVEDILLA VERTICAL.....	120
5.3.5.1. Bovedilla vertical relleno aire.....	123
5.3.5.2. Bovedilla vertical relleno agua -inmediato-	126
5.3.5.3. Bovedilla vertical relleno agua -tras 24 horas-	130
5.3.5.4. Bovedilla vertical relleno aire -vaciado inmediato-	134
5.3.6. EXPERIENCIA 4: TUBO DE PVC de 12 cm de diámetro.....	138
5.3.6.1. Tubo de PVC 12 cm / 4 cm profundidad.....	140
5.3.6.2. Tubo de PVC 12 cm / 8 cm profundidad.....	143
5.3.6.3. Tubo de PVC 12 cm / 15 cm profundidad.....	146
5.3.7. EXPERIENCIA 5: TUBO METÁLICO 15 cm	151
5.3.8. EXPERIENCIA 6: BLOQUE DE SAL COMÚN (halita NaCl) .	155
5.3.9. EXPERIENCIA 7: CILINDRO DE ARCILLA humedad 28% ..	160
5.3.10. EXPERIENCIA 8: BLOQUE DE ARCILLA humedad 6%	165
5.3.11. EXPERIENCIA 9: LOSA VERTICAL.....	170
5.3.12. EXPERIENCIA 10: CILINDRO HUECO VERTICAL.....	173
5.3.12.1. Cilindro hueco vertical a distancia 15 cm	176
5.3.12.2. Cilindro hueco vertical a distancia 8 cm	179
5.3.12.3. Cilindro hueco vertical a distancia 4 cm	182
5.3.12.4. Cilindro hueco vertical a distancia 0 cm	185
5.3.12.5. Calibración arena sin huecos	188
5.3.13. EXPERIENCIA 11: DOS CILINDROS HUECOS	
VERTICALES a distancia 4 cm.....	192
5.3.14. EXPERIENCIA 12: TUBO METÁLICO VERTICAL	196
5.3.14.1. Tubo metálico vertical a distancia 15 cm.....	198
5.3.14.2. Tubo metálico vertical a distancia 8 cm.....	202
5.3.14.3. Tubo metálico vertical a distancia 4 cm.....	205
5.3.14.4. Tubo metálico vertical a distancia 0 cm.....	208
5.4. EXPERIMENTACIÓN EN TRABAJOS A ESCALA REAL	212

5.4.1. OBJETIVO DE LOS TRABAJOS	212
5.4.2. TRABAJO 0: TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 mm	
-RELLENO DE AIRE	213
5.4.3. TRABAJO 1: TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 mm	
-RELLENO MITAD DE AGUA.....	221
5.4.4. TRABAJO 2: TUBO DE PVC DIÁMETRO 16mm.....	229
5.4.5. TRABAJO 3: PEQUEÑO MURO DE LADRILLO	
ENTERRADO	239
5.4.6. TRABAJO 4: BÚSQUEDA DE TÚNELES Y GALERÍAS	
MINERAS EN MINA GALLARTA (Vizcaya)	246
5.4.7. TRABAJO 5: BÚSQUEDA DE POSIBLES HUECOS BAJO	
EL TRAZADO DE UNA CARRETERA EN COMILLAS	248
5.4.7.1. Trabajo 5.1 Dolina en carretera Comillas	248
5.4.7.2. Trabajo 5.2 Hundimiento en Comillas.....	250
5.4.8. TRABAJO 6: LOCALIZACIÓN DE CANALIZACIONES	
METÁLICAS.....	253
5.4.9. TRABAJO 7: DETERMINACIÓN DE ESPESORES Y	
FRACTURAS.....	255
5.4.9.1. Trabajo 7.1 Determinación de espesores	255
5.4.9.2. Trabajo 7.2 Determinación de espesores y fracturas...	256
5.4.10. TRABAJO 8: CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN PARA LA	
LOCALIZACIÓN DE COMPLEJO DE GALERÍAS MINERAS A	
DISTINTAS PROFUNDADES: LA ARBOLEDA (Vizcaya)	258
5.4.10.1. Trabajo 8.1 Perfil GOLF-1	260
5.4.10.2. Trabajo 8.2 Perfil GOLF-2	261
5.4.10.3. Trabajo 8.3 Perfil GOLF-3	263
5.4.10.4. Trabajo 8.4 Perfil GOLF-4	264
5.4.10.5. Trabajo 8.5 Perfil GOLF-5	265
5.4.10.6. Trabajo 8.6 Perfil GOLF-6	266
5.4.10.7. Trabajo 8.7 Perfil GOLF-7	267
5.4.10.8. Trabajo 8.8 Perfil GOLF-8	268
5.4.10.9. Trabajo 8.9 Perfil GOLF-9	270
5.4.10.10. Trabajo 8.10 Perfil GOLF-10	271
5.4.10.11. Trabajo 8.11 Perfil GOLF-11	272
5.4.10.12. Trabajo 8.12 Perfil GOLF-12	273
5.4.10.13. Trabajo 8.13 Perfil GOLF-13	274

5.4.10.14. Trabajo 8.14 Perfil GOLF-14	276
5.4.10.15. Trabajo 8.15 Perfil GOLF-15	277
5.4.10.16. Trabajo 8.16 Perfil GOLF-16	278
5.4.10.17. Trabajo 8.17 Perfil GOLF-17	279
5.4.10.18. Trabajo 8.18 Perfil GOLF-18	280
5.4.10.19. Trabajo 8.19 Perfil GOLF-19	281
5.4.10.20. Trabajo 8.20 Perfil GOLF-20	282
6. APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELECTRICA AL PARAJE KÁRSTICO Y YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE COLONIA CLUNIA SULPICIA.....	285
6.1. DESCRIPCIÓN Y ENCUADRE HISTÓRICO	287
6.1.1. SITUACIÓN DEL YACIMIENTO	288
6.1.2. HISTORIA DE LA CIUDAD.....	288
6.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	295
6.3. ENCUADRE GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	303
6.4. RESULTADOS	304
6.4.1. PERFILES Zona I.....	306
6.4.1.1. Zona I – Dispositivo Schlumberger-Wenner	306
6.4.1.2. Zona I – Dispositivo Dipolo-dipolo	309
6.4.2. PERFILES Zona II.....	312
6.4.2.1. Zona II – Dispositivo Schlumberger-Wenner	312
6.4.2.2. Zona II – Dispositivo Dipolo-dipolo	315
6.4.3. PERFILES Zona III.....	317
6.4.3.1. Zona III – Dispositivo Schlumberger-Wenner	317
6.4.3.2. Zona III – Dispositivo Dipolo-dipolo	319
6.4.4. PERFILES Zona IV.....	322
6.4.4.1. Zona IV – Dispositivo Schlumberger-Wenner.....	322
6.4.4.2. Zona IV – Dispositivo Dipolo-dipolo.....	324
6.4.5. PERFILES RUINAS TERMAS	326
6.4.5.1. Ruinas Termas – Dispositivo Schlumberger-Wenner ...	326
6.4.5.2. Ruinas Termas – Dispositivo Dipolo-dipolo	328
6.4.6. PERFILES MURO ENTERRADO	330
6.4.6.1. MURO enterrado – Dispositivo Schlumberger-Wenner	330
6.4.6.2. MURO enterrado – Dispositivo Dipolo-dipolo	333

6.4.7. PERFILES FORO	335
6.4.7.1. FORO – Dispositivo Wenner	335
6.4.7.2. FORO – Dispositivo Dipolo-dipolo	337
6.5. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	338
7. CONCLUSIONES - AVANCE CIENTÍFICO	341
7.1. CONCLUSIONES	343
7.2. AVANCE CIENTÍFICO.....	347
7.2.1. PLANTILLAS DE INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES.....	347
7.2.2. GRÁFICOS $D_{el} - D_h$	350
7.2.2.1. Gráfico $D_{el} - D_h$ para huecos aislantes en dispositivo Wenner	352
7.2.2.2. Gráfico $D_{el} - D_h$ para huecos aislantes en dispositivo Dipolo-dipolo	354
7.2.2.3. Gráfico $D_{el} - D_h$ para huecos conductores en dispositivo Wenner	356
7.2.2.4. Gráfico $D_{el} - D_h$ para huecos conductores en dispositivo Dipolo-dipolo.....	358
8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	361
BIBLIOGRAFÍA.....	365
ANEXO I ENSAYOS SOBRE MUESTRAS DE LABORATORIO.....	375
ANEXO II PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DEL CAPÍTULO 5.	389
ANEXO III PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y FOTOGRAFÍAS DEL CAPÍTULO 6.....	415

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La prospección del subsuelo mediante la recopilación de datos en superficie por métodos no destructivos se puede resolver satisfactoriamente con la aplicación del método geofísico adecuado. En este sentido, los últimos avances en la obtención de perfiles de resistividad eléctrica mediante sistemas multielectrodo de tomografía eléctrica, suponen un notable progreso y un prometedor futuro hacia sus múltiples aplicaciones, por su versatilidad, rapidez de trabajo, bajo coste, escasez de riesgos y respeto medioambiental.

La idea de este trabajo surge tras contemplar cómo la investigación de huecos por el método de la tomografía eléctrica se resuelve en numerosas ocasiones con imprecisión debido a la dificultad que conlleva la interpretación de los resultados de campo. Esto se debe a que diferentes motivos geológicos suelen tener un comportamiento eléctrico similar.

En un reconocimiento de tomografía eléctrica realizado en julio de 2000 para localizar posibles cavidades del subsuelo en la localidad burgalesa de Gumiel del Mercado, se pudo comprobar dicha indeterminación. De las siete anomalías detectadas, el técnico especialista consideró de significado dudoso a cinco de ellas y tan sólo interpretó como cavidades evidentes las dos primeras.

Efectivamente, las imágenes de resistividad obtenidas en perfiles 2D pueden tener un mismo aspecto y, sin embargo, responder a motivos geológicos muy diferentes. Las anomalías de resistividad eléctrica pueden ser producidas tanto por huecos, como por rellenos de diversa litología o incluso por variaciones petrográficas locales de una unidad litológica concreta.

A raíz de estas limitaciones interpretativas, se consideró que con una investigación específica que abordara la interpretación de dichos perfiles, se podrían mejorar los resultados del método facilitando el ejercicio de interpretación y aumentando su precisión. Con esta investigación se pretende establecer una optimización del método de la tomografía eléctrica al problema concreto de localización de huecos, desarrollando una metodología que permita caracterizar las cavidades con el máximo detalle.

En los siguientes capítulos se expondrán detalladamente los fundamentos teóricos y medidas experimentales que van a permitir avanzar notablemente en la estimación de sus características principales, tales como situación, morfología, dimensiones y tipo de relleno si lo hubiere.

Para llevar a cabo esta aplicación deberán delimitarse las propiedades físicas de los huecos y de sus diferentes rellenos que pueden incidir en la variabilidad de su

resistividad eléctrica.

De este modo se pretende progresar en la interpretación de perfiles eléctrico-resistivos para su posterior aplicación en el campo de la localización de recursos naturales, en los estudios previos de ingeniería civil y para el estudio y prevención de riesgos geológicos.

FINALIDAD DEL PROYECTO

La finalidad del proyecto es desarrollar una metodología científico - técnica aplicada a la interpretación de perfiles eléctrico-resistivos del subsuelo obtenidos mediante tomografía eléctrica con el objeto de detectar y caracterizar la presencia de huecos o cavidades, así como restos de carácter arqueológico.

Para llevarlo a cabo, se han diseñado múltiples experiencias en condiciones controladas tanto sobre modelos reducidos como en trabajos a escala real. La aplicación práctica se ha llevado a cabo en el paraje arqueológico Colonia Clunia Sulpicia, en el municipio de Peñalba de Castro (provincia de Burgos), idóneo para el desarrollo de esta investigación por su singular constitución.

2. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y PLAN DE LA INVESTIGACIÓN

2. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y PLAN DE LA INVESTIGACIÓN

La hipótesis que se formula al inicio de esta investigación será la siguiente: ¿Es posible desarrollar una metodología adecuada para la óptima interpretación de imágenes de resistividad obtenidas por tomografía eléctrica de cara a caracterizar cavidades en el subsuelo?

Otro aspecto que se buscará es la optimización del método de la tomografía eléctrica para la búsqueda de cavidades, proponiendo un criterio de elección para la utilización del espaciado interelectródico y el dispositivo multielectródico más adecuados para la caracterización de cada tipo concreto de cavidades.

El objetivo principal es desarrollar un método claro y con una destacada precisión, fundamentada en una sólida base experimental, que facilite y optimice la interpretación de imágenes obtenidas mediante tomografía eléctrica, y en concreto, aplicado a la localización de cavidades en el subsuelo.

La investigación desarrollada en esta tesis doctoral aborda los siguientes aspectos:

En primer lugar se analiza la situación actual a partir de la revisión de algunos trabajos prácticos existentes (apartado 4.7.4), documentación en la que se plantea la necesidad de aportar ideas claras en lo que respecta a la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica.

A continuación se diseñan y ensayan un gran número de experiencias sobre muestras de laboratorio, modelos reducidos y trabajos reales, para conocer el comportamiento eléctrico de los materiales y su variación con la presencia de heterogeneidades (capítulo 5).

Por último se pone a prueba el conocimiento adquirido en dichas experiencias sobre un problema real: la localización de cavidades y restos arquitectónicos en el yacimiento arqueológico de Colonia Clunia Sulpicia (capítulo 6). En Clunia se ha abordado un doble objetivo: Por un lado, la localización y caracterización de cavidades en el sustrato calizo sobre el que se sitúa el yacimiento arqueológico de Clunia, y que se encuentran a una profundidad ligeramente superior a los veinte metros. Por otra parte, la observación de estructuras arquitectónicas enterradas de la antigua ciudad romana, restos localizados en los dos metros más superficiales.

Este doble motivo es posible debido a que la respuesta eléctrica de ambos modelos de subsuelo es muy similar, es decir, que un muro enterrado se manifiesta geoelectríicamente de la misma forma que un hueco. Los bloques de caliza del muro rodeados por un material arcilloso responderán en forma de anomalía positiva, al igual

que una cavidad en la roca. Clunia ofrece restos arqueológicos de pequeña dimensión en su nivel superficial y grandes cavidades kársticas a gran profundidad.

La aplicación arqueológica de la presente Tesis Doctoral se debe a la carencia de información y datos a este respecto. Esta reducida documentación alienta a investigar con detalle el subsuelo del mencionado yacimiento mediante tomografía eléctrica persiguiendo el doble propósito de optimizar la técnica prospectiva y localizar nuevos hallazgos con la consecuente aportación al conocimiento sobre el conjunto de la ciudad romana.

A continuación se enumeran los objetivos específicos.

OBJETIVOS

1. Utilizar la tomografía eléctrica como herramienta de caracterización de cavidades en el subsuelo, así como la localización de estructuras con contenido arqueológico.
2. Desarrollar indicadores en la interpretación de perfiles 2D de resistividad eléctrica para la detección e identificación de oquedades y discontinuidades en el subsuelo.
3. Delimitar los factores principales que inciden en la calidad y cualidad de las imágenes de resistividad que se obtienen por tomografía eléctrica.
4. Desarrollar una herramienta para conocer de forma no destructiva el subsuelo de los terrenos en que se asienta la ciudad romana de Clunia.
5. Determinar el dispositivo electródico y el espaciado interelectródico más adecuado para la prospección de oquedades en el subsuelo.

EL DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS PERSEGUIDOS

Los objetivos perseguidos en esta investigación tienen como punto común el desarrollo de una técnica que permita diferenciar distintas características del subsuelo importantes desde el punto de vista geológico y arqueológico. En esta estrategia de investigación se incluirá también la calibración de los equipos de medición utilizados, realizando para ello perfiles sobre objetivos bien conocidos para así determinar la respuesta eléctrica que presentan diferentes estructuras en el subsuelo.

Estos perfiles de tomografía eléctrica se realizarán con doble configuración de dispositivo y con separación electrodica variable para observar las respuestas en los distintos perfiles.

METODOLOGÍA

Numerosas unidades litológicas del subsuelo (como es el caso de calizas, dolomías, yesos) se encuentran en ocasiones con huecos, cavidades y galerías más o menos desarrolladas debido a procesos de disolución de los componentes de la roca. En el caso que se presenta en esta Tesis Doctoral se ha aplicado la tomografía eléctrica a un yacimiento arqueológico que contiene dos niveles de estas discontinuidades, uno superficial, constituido por canalizaciones y aljibes y restos de carácter antrópico próximos a la superficie, y uno profundo consistente en cavidades kársticas sobre roca caliza.

Estas cavidades condicionan una reducción de masa en la roca lo cual puede tener consecuencias importantes en su comportamiento mecánico como, por ejemplo, asentamientos, desplomes, derrumbamientos, colapsos, etc. En la superficie del yacimiento se han localizado diversas dolinas y depresiones topográficas consecuencia de esta debilidad provocada por la existencia de cavidades relativamente cerca de la superficie. La adecuada interpretación de estas medidas de resistividad del subsuelo permitirá localizar dichas discontinuidades con el consiguiente progreso científico y la corrección de posibles riesgos de hundimiento.

El desarrollo de una metodología adecuada respecto al empleo de la tomografía eléctrica para la identificación y caracterización de estas anomalías en el subsuelo evitará la necesidad de emplear métodos destructivos (catas, sondeos), que son claramente más caros y agresivos, permitiendo disponer de una herramienta capaz de localizar estructuras o cavidades que tengan una marcada influencia en el conocimiento del terreno y a la hora de planificar algún tipo de actuación sobre él.

Además, desde el punto de vista hidrogeológico, la acumulación y circulación de aguas subterráneas va a concentrarse, como es lógico, en los sectores donde existan estas cavidades. La identificación de estas cavidades en el subsuelo va a permitir definir los emplazamientos de pozos y sondeos con vistas al aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos en tiempos en los que la ciudad de Clunia Sulpicia estaba densamente poblada.

PLAN DE LA INVESTIGACIÓN

El denominado Plan de Investigación está diseñado para ejecutar, de forma sistemática, una serie de actividades, denominadas tareas, para alcanzar unos propósitos.

TAREA 1: BIBLIOGRAFÍA, CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y DISEÑO DE EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

Propósitos de la Tarea 1:

1.a. Recopilación de datos y bibliografía. Solicitud de artículos de revistas y otras publicaciones a través del Servicio de Acceso al Documento de la Biblioteca de la Universidad de Burgos mediante la opción de Préstamo Interbibliotecario.

1.b. Definición de los parámetros técnicos que inciden en la variabilidad de la respuesta eléctrica del subsuelo y su distribución estructural.

TAREA 2: EXPERIMENTACIÓN SOBRE MODELOS REDUCIDOS DE LABORATORIO

Propósitos de la Tarea 2:

2.a. Construcción de modelos reducidos que permitan conocer los verdaderos valores de resistividad del terreno en variadas condiciones naturales. Ensayos de medición de resistividad sobre terrenos de diferente litología, humedad y densidad.

TAREA 3: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

Propósitos de la Tarea 3:

3.a. Verificación de las hipótesis formuladas durante la construcción teórica de la Tarea 1 para validarlas o desestimarlas y repetir el planteamiento si los resultados no fueran satisfactorios.

TAREA 4: TOMA DE DATOS DE CAMPO EN CASOS REALES

Propósitos de la Tarea 4:

4.a. Mediciones a escala real sobre objetivos bien conocidos. Se pretende la adquisición de datos mediante la Tomografía Eléctrica en que puedan ser contrastados con la estructura real del subsuelo.

TAREA 5: EXTRAPOLACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO A LA EXPERIENCIA DE CAMPO

Propósitos de la Tarea 5:

5.a. Verificación de que los parámetros acotados en laboratorio tienen la influencia prevista en pruebas a escala real. Comparación de resultados y determinación de una sistemática precisa acerca de la interpretación de perfiles reales de Tomografía Eléctrica.

TAREA 6: DELIMITACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL TERRENO QUE REPERCUTEN EN SU RESPUESTA ELÉCTRICA Y VALORACIÓN DE SU INFLUENCIA EN LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES 2D DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUBSUELO. DELIMITACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA EN LA DISTRIBUCIÓN ANISÓTROPA DE SU RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Propósitos de la Tarea 6:

6.a. Comprender el funcionamiento real en el terreno del reparto de la resistividad mediante la interpretación de imágenes en dos dimensiones obtenidas por Tomografía Eléctrica. Establecer una sistemática clara y bien definida acerca de la interpretación de perfiles de Tomografía Eléctrica que dé como resultado una valoración precisa de la estructura geológica del terreno.

TAREA 7: SOLUCIÓN ANALÍTICA A LA INTERPRETACIÓN DE PERFILES 2D EN EL CASO CONCRETO DE DETECCIÓN DE HUECOS.

Propósitos de la Tarea 7:

7.a. Concretar soluciones analíticas claras y precisas respecto de la utilización de la Tomografía Eléctrica en el problema de localización y caracterización de huecos en el terreno. Propuesta de una plantilla de interpretación de imágenes cualitativa y directa.

7.b Propuesta de unos ábacos que pongan en relación la distancia de separación entre electrodos con el diámetro de las cavidades, de cara a determinar el espaciado

interelectrónico óptimo para los diferentes tamaños de huecos, teniendo en cuenta el factor profundidad y relleno.

TAREA 8: COMUNICACIÓN DE LOS AVANCES CIENTÍFICOS

Propósito de la Tarea 8:

8.a. Publicación de la Tesis Doctoral.

8.b. Posteriormente, presentación de comunicaciones en congresos, simposium, jornadas, etc, sobre los avances que ha supuesto este trabajo.

3. ANTECEDENTES

3. ANTECEDENTES

3.1 LA PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO

La localización de objetos en el subsuelo a partir de medidas realizadas en superficie se ha pretendido desde que el hombre se interesó por los recursos ocultos en el terreno. Los sistemas más rudimentarios, basados en la radiestesia, constan de un sencillo péndulo o una vara con formas concretas en manos del zahorí que interpreta sus movimientos. En 1546 Georgius Agricola describe con precisión en su obra *De re metálica* (Hoover, H.C., 1950) la prospección de diferentes metales o también “venas de agua” mediante el empleo de la vara de zahorí. Ya por aquel entonces existía gran controversia en cuanto al empleo de dicha herramienta, comenta Agricola en su libro II.



Figura 3.1. Grabado de Georgius Agricola en el que representa una prospección minera del siglo XVI mediante vara de zahorí. Tomado de Hoover, H.C., 1950.

Hoy en día, gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías y la electrónica se ha podido fabricar un instrumental basado en observaciones de carácter científico que permiten tener una fiabilidad notable en todo lo referente a la auscultación del subsuelo.

3.2 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA ACTUALES

Cada uno de los diferentes métodos geofísicos que actualmente existen analizan una propiedad físico-química de las rocas o alguna otra característica que se pueda relacionar con ellas. El objeto de cada uno de estos métodos será determinar la distribución de esa propiedad en el subsuelo y, de este modo, deducir un modelo de disposición geológico-estructural que pudiera crear dichas variaciones.

La Geofísica, disciplina mixta entre dos ciencias, la Física y la Geología, se nutre de ambas para aportar una serie de conocimientos útiles tanto para una como para otra. La prospección geofísica puede considerarse la parte de la Geofísica que emplea esos conocimientos de forma aplicada para prospectar el terreno y determinar diferentes características del subsuelo. Inicialmente empezó usándose para el estudio de la forma y estructura de la Tierra en su conjunto, pero desde 1920 comienza a usarse para estudios a menor escala y con una finalidad más práctica. Son los inicios de la Geofísica Aplicada.

Dentro de la generalidad de la prospección geofísica hay numerosos métodos de investigación del subsuelo, cada uno basado en un fundamento específico (Parasnis, D.S., 1997). Pueden diferenciarse dos modalidades distintas: **la prospección desde la superficie**, aquella en la que los dispositivos se extienden en superficie y, por lo tanto adquieren parámetros del terreno desde el exterior, y **la prospección en sondeos**, aquella en la que la medición de los parámetros del subsuelo se realiza de forma directa mediante la introducción de sondas en pozos (Rider, M. 2002).

En función del objetivo perseguido habrá que seleccionar el método más adecuado para cada caso concreto. Así, por ejemplo, si se trata de analizar el terreno para identificar zonas contaminadas, como por ejemplo la presencia de una cuña de intrusión marina en un acuífero del subsuelo, se empleará un equipo que mida parámetros capaces de diferenciar masas de agua de diferente salinidad, como es la conductividad eléctrica (se utilizará la prospección geoeléctrica), y no se optará por otros métodos que informen, por ejemplo, sobre sus características texturales o geomecánicas (método sísmico de refracción).

También desde este punto de vista hay que considerar la magnitud del objetivo y su profundidad: no tiene la misma consideración una investigación a gran profundidad, como es el caso de los estudios de grandes cuencas sedimentarias, que otra superficial, como el estudio de una capa somera poco potente.

En cualquier caso, lo que sí resulta lógico pensar es que cuantos más métodos prospectivos se empleen, más completa será la información de que se disponga y más consistentes serán consecuentemente los resultados (Sumanovac, F.; Weisser, M., 2001).

El objetivo de las prospecciones geofísicas es detectar y localizar cuerpos o estructuras geológicas del subsuelo, y si es posible determinar sus dimensiones y, en ocasiones, alguna de sus propiedades físicas. Generalmente, una prospección geofísica consiste en realizar una serie de medidas sobre la superficie del terreno, o en algunos casos en el aire paralelamente a ella o incluso dentro de un sondeo. Estas mediciones son determinaciones en el espacio o en el tiempo de uno o varios campos de fuerzas, cuyo valor viene determinado, entre otros factores, por la naturaleza de las

estructuras del subsuelo o por la gran variación espacial de alguna o varias propiedades físicas de las rocas.

Las propiedades de las rocas que más usan en prospección geofísica son densidad, susceptibilidad magnética, elasticidad y conductividad eléctrica. También se emplean, aunque en menor proporción, otras propiedades como la radiactividad.

Existen numerosos métodos de prospección geofísica, cada uno basado en un fundamento específico. En la tabla 3.1 se esquematizan los más importantes.

La elección del método prospectivo a utilizar para un estudio va a depender de factores como la finalidad del mismo, las condiciones geológicas, condiciones del entorno, coste previsto, etc. En algunas ocasiones un mismo problema se estudia por más de un método, porque permiten acotar soluciones, ya que la combinación de los resultados de la interpretación de dos métodos distintos referentes a la misma zona va a permitir eliminar falsas soluciones sin necesidad de efectuar una nueva investigación más detallada.

MÉTODOS	FUENTE O PARÁMETROS	CAMPO UTILIZADO
Eléctrico	Corrientes telúricas	Natural
	Potencial propio	Natural
	Líneas equipotenciales	Inducido
	Resistivo	Inducido
	Caída de potencial	Inducido
Sísmico	Terremotos	Natural
	Refracción	Inducido
	Reflexión	Inducido
Gravimétrico	Gravedad	Natural
Magnético	Campo magnético	Natural
Electromagnético	Corrientes electromagnéticas	Inducido
Radiactivo	Radiactividad	Natural o inducido
Térmico	Temperatura	Natural o inducido

Tabla 3.1. Clasificación de métodos prospectivos geofísicos

Un importante objetivo al que habitualmente se aplica la prospección geofísica es la investigación hidrogeológica, tanto en lo que se refiere a la definición de áreas favorables para su búsqueda, como a la identificación de profundidades de niveles productivos e, incluso, la determinación de las características cualitativas del agua subterránea, como contaminación y salinización de acuíferos.

Como ya se ha dicho anteriormente, esta investigación puede realizarse tanto desde superficie, mediante unos equipos de prospección característicos, como dentro de sondeos, con otros equipos específicos. De una y otra manera, los principios sobre los que se asientan los métodos son los mismos y los resultados generalmente son positivos. Lo importante es saber qué método o métodos emplear en cada caso para obtener la mejor información.

A continuación se van a ver los métodos de prospección más frecuentes, así como los principios básicos de su utilización.

3.3 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DESDE LA SUPERFICIE

Se desarrolla implantando y registrando la información del subsuelo con los equipos de prospección geofísica dispuestos sobre la superficie. La ventaja principal es que no son métodos destructivos y que se pueden analizar áreas extensas. En contrapartida, la desventaja está en que los datos obtenidos deberán interpretarse conjuntamente con información de sondeos, muestreos o cortes geológicos cercanos para contrastar esa información, y han de interpretarse con gran rigor y cautela en base a la experiencia.

Los métodos que se van a detallar a continuación se han seleccionado por considerarse los más adecuados para investigar el subsuelo en sus metros más superficiales ya que tienen una aplicación más o menos contrastada para fines parecidos a los que se ha enfocado la investigación de esta Tesis Doctoral. Cada uno de ellos estudia la distribución de las unidades litológicas en el subsuelo en base al análisis de alguna determinada propiedad físico-química o de alguna característica relacionada con dichas propiedades.

3.3.1 LA PROSPECCIÓN SÍSMICA

Los métodos sísmicos necesitan provocar una perturbación en el terreno mediante una fuente de energía y “leer” el comportamiento del mismo ante esa perturbación. Esta fuente de energía puede ser una explosión controlada, una vibración generada por un vibrador, una detonación por escopeta o un impacto de un martillo y, con ella se generan ondas sísmicas.

El principio del método consiste en registrar los tiempos de llegada de esas ondas sísmicas reflejadas (en el caso de la sísmica de reflexión) o refractadas (en el caso de la sísmica de refracción), en los contactos del subsuelo hasta una serie de detectores situados en superficie, denominados geófonos. En función de cuáles sean esos tiempos de llegada de las ondas a los distintos geófonos, localizados a distancias conocidas, se podrá conocer la posición y estructura de los estratos en profundidad.

Este esquema, que en sí parece sencillo, se complica mucho con la topografía, la heterogeneidad de los materiales, los cambios laterales de facies, las fracturas, los pliegues, las capas inclinadas, etc. En definitiva, que para conseguir obtener una sección sísmica interpretable con garantías es necesario el paso previo de los datos por una serie de “tamices” que filtren el ruido y los errores de la señal buena, situando cada reflector o refractor en su lugar correspondiente y generando una línea en la que la componente horizontal sea la posición de los geófonos y la componente vertical la profundidad de los distintos reflectores.

La situación de los geófonos, distancia entre ellos, número, fuente de energía a emplear, etc., constituyen el dispositivo a realizar. Según sean las características del objetivo perseguido y la profundidad a investigar, el dispositivo cambiará aumentando o disminuyendo el número de geófonos, su disposición en superficie, su separación, etc.

La variante de la sísmica que sería más adecuada para la investigación del subsuelo cuyos objetivos sean la localización de cavidades o de restos arqueológicos es la sísmica de refracción. La sísmica de reflexión se emplea más para estudios de gran profundidad. La sísmica desde superficie se puede utilizar en sus variantes de refracción y reflexión, según el tipo y calidad de información que se pretenda.

SÍSMICA DE REFRACCIÓN

La sísmica de refracción estudia la transmisión de ondas sísmicas en el terreno cuando se producen refracciones totales sobre superficies que delimitan medios con distintas constantes elásticas. Este fenómeno permite el retorno a la superficie de una onda cuando incide sobre las discontinuidades del subsuelo y detectarla con los geófonos.

Utilizando las leyes de la óptica, podemos reconstruir el camino seguido por las ondas refractadas y calcular, por tanto, la profundidad a que se producen dichas refracciones, así como las velocidades de transmisión de las ondas sísmicas para cada nivel.

Las ondas sísmicas con las que se “trabaja” se originan mediante explosivos, caídas de masas o golpeo de mazas en un punto del terreno, registrándose las llegadas de la onda en una serie de puntos elegidos mediante receptores, los denominados geófonos (figura 3.2) Normalmente se mide el tiempo que tarda en llegar el primer frente de onda a los geófonos, que corresponde a una trayectoria de ondas de compresión (ondas P) pues son las más rápidas.

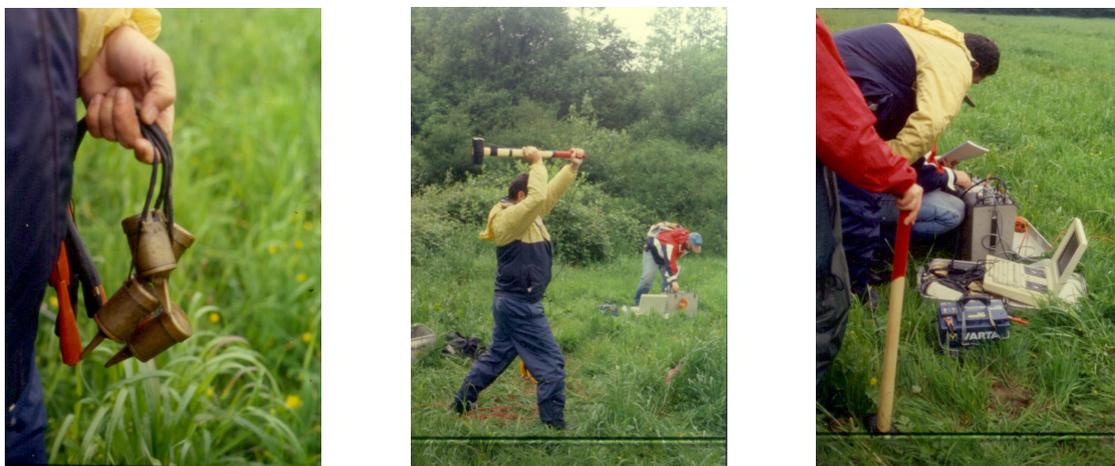


Figura 3.2. Equipo simple de sísmica de refracción. Izquierda: detalle de los geófonos. Centro: Golpeo de maza. Derecha: Registro de los frentes de onda.

Es también posible identificar otros frentes de onda como las ondas transversales (ondas S) para determinar los módulos dinámicos del terreno.

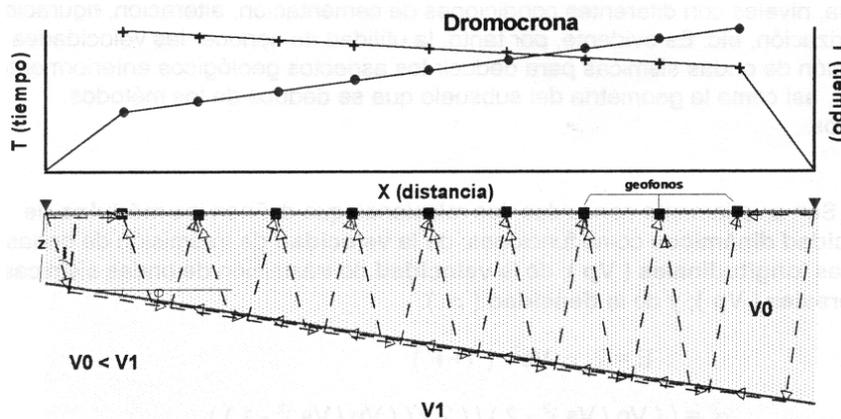


Figura 3.3. Representación gráfica de dos Dromocronas, una de ida y otra de vuelta, para un modelo de perfil geológico del subsuelo de dos capas con refractor inclinado. La capa más superficial tiene una velocidad de transmisión de ondas (V_0) menor que la capa profunda (V_1), lo cual queda reflejado claramente en la curva dromocrona (tanto la de ida como la de vuelta). Tomado de Garbó, A., 1998.

El procedimiento para realizar este tipo de prospecciones, consiste en situar a distancias conocidas y alineados con el lugar en que se genera el impulso, varios geófonos. Los tiempos de llegada a cada uno de ellos, permiten representar la curva denominada dromocrona (Figuras 3.3 y 3.4).

A partir de las curvas dromocrónicas (o dromocronas) que son gráficos de tiempos de llegada en función de la distancia al origen emisor de la perturbación se deduce la distribución de materiales en el terreno en profundidad.

El número de segmentos rectos de la dromocrona indica el número de refractores. A partir de cada segmento, se calcula la velocidad de transmisión, como inversa de cada pendiente, y la profundidad a que se sitúan los refractores, por su relación con la ordenada en el origen.

Si la superficie refractora (la superficie que separa V_0 de V_1) se encuentra inclinada, habrá que repetir la operación con impulsos a uno y otro lado de la línea de geófonos, para determinar el ángulo de buzamiento del plano de discontinuidad (Figura 3.3). Son las denominadas dromocronas en "ida y vuelta" que, para mejorar los resultados, deben reforzarse generando impulsos en algún otro punto intermedio, habitualmente en el centro de la implantación de geófonos.

Las superficies límite citadas, desde el punto de vista geológico, son generalmente las que separan distintas unidades litológicas o, dentro de la misma litología, niveles con diferentes condiciones de cementación, alteración, fisuración, meteorización, etc. Es evidente, por tanto, la utilidad de conocer las velocidades de transmisión de ondas sísmicas para deducir los aspectos geológicos anteriormente citados, así como la

geometría del subsuelo que se deduce de los métodos sísmicos (Miller, R.D. et al, 1989).

No obstante, y a pesar de que la investigación de los metros más superficiales es de la que suele ocupar la sísmica de refracción, no es un método muy empleado para fines arqueológicos ni de localización de huecos. Se trata, como se ha podido ver de forma sucinta, de un método que define muy bien contactos entre capas horizontales o con poco buzamiento pero que no es muy apropiado para los objetivos perseguidos en esta Tesis Doctoral ya que su resolución no es buena para los objetivos de carácter local como las cavidades.

Bien es cierto, como puede verse en el listado de velocidades de la figura 3.4, que la transmisión por el aire de este tipo de ondas es una de las más lentas (330 m/s) por lo que una cavidad situada en el subsuelo podría causar un descenso importante en la velocidad de las ondas sísmicas al pasar del medio rocoso al aire de la cavidad.

MATERIAL	VELOCIDAD (m/s)
Aire	330
Agua dulce	1450
Suelo superficial	170- 500
Arcilla	1000-2800
Arcilla arenosa	975-1160
Arcilla arenosa cementada	1160-1280
Limo	200-760
Aluvi3n	550-1000
Aluvi3n profundo	1100-2360
Dep3sito glaci3r	490-1700
Dunas	500
Loes	400- 475
Arena seca	300
Arenisca	2400-4000
Lutita	1800-3800
Marga	300-4700
Caliza	3000-5700
Granito	3000-5000
Basalto	4000-6000
Dolerita	4000-7000
Gabro	4000-7000
M3rmar	3500-6000
Cuarcita	5000-6500
Esquistos	3000-4500

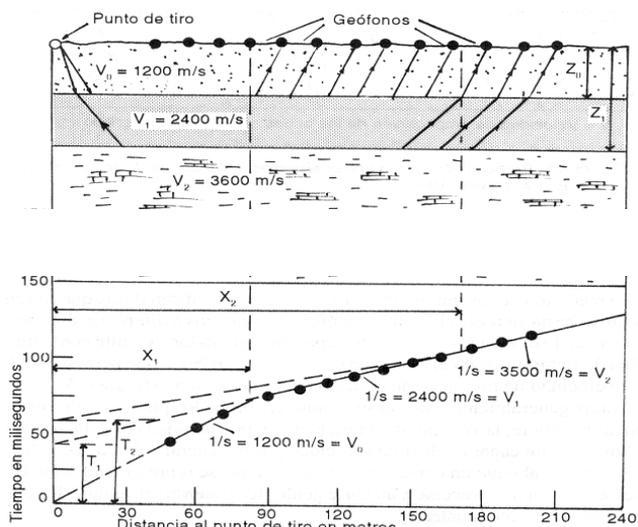


Figura 3.4. Perfil ejemplo para tres capas de velocidades crecientes (arcilla $V_0=1200$ m/s; arenisca $V_1=2400$ m/s y caliza $V_2=3600$ m/s) y representaci3n de la Dromocrona correspondiente. Tomado de Ruiz, M; Gonz3lez, S. (1999). Pp. 64

El problema radica en que la ralentizaci3n de la onda no ser3a constatable a no ser que se tratara de una cavidad de extensi3n importante (m3s de lo que ocupara el dispositivo de medida) y de dimensiones constantes y morfolog3a m3s o menos aplanada. Tanto condicionante restringe las cavidades a detectar y, consecuentemente las posibilidades de 3xito son reducidas.

Respecto a la b3squeda de restos arqueol3gicos como objetivo, tambi3n es un m3todo apropiado pero su utilizaci3n est3 restringida ya que precisar3a de que estos

restos formaran niveles con una cierta continuidad lateral y una cierta constancia en su espesor y características. La respuesta poco definida que se obtiene con este tipo de métodos prospectivos no sería la más propicia para intentar identificar y definir la existencia de restos arqueológicos bajo superficie.

3.3.2 LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA

Las propiedades eléctricas que se tienen en cuenta en estos métodos son la resistividad y la cargabilidad fundamentalmente. La resistividad eléctrica es la resistencia media entre dos superficies equipotenciales separadas una distancia determinada, y se aborda su investigación mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Calicatas Eléctricas (CE) y Tomografía eléctrica (TE). La cargabilidad es la capacidad de ciertos minerales de cargarse y descargarse eléctricamente lo cual se mide mediante investigaciones por Polarización Inducida (PI).

El método de la Polarización Inducida consiste en inyectar una corriente eléctrica en el terreno durante un tiempo y cortarla repentinamente. Si el material infrayacente tiene cargabilidad su efecto de polarización inducida se manifestará con una caída suave de la diferencia de potencial durante un tiempo determinado "tiempo de decaimiento".

La Tomografía Eléctrica no es más que una adquisición automática de resistividad combinando diversos electrodos, generando finalmente una malla de mediciones a distintas profundidades y distancias como si se hicieran a partir de un gran número de SEV realizados sobre una misma lineación.

Estos métodos se explicarán más detalladamente en el capítulo 4 ya que son la base primordial sobre la que se fundamenta la investigación descrita en esta Tesis Doctoral.

También se emplean otros métodos eléctricos como el del Potencial Espontáneo (PE) que mide los potenciales naturales que se producen en el subsuelo debido a variaciones estructurales o efectos electroquímicos.

Otros métodos menos empleados son el método de las corrientes telúricas y el método de los campos magnetotelúricos, que son corrientes eléctricas y magnéticas naturales debidas a la radiación solar y al efecto de la ionosfera. El método telúrico tan sólo mide el campo eléctrico natural generado en el subsuelo. El método magnetotelúrico mide la amplitud de las componentes horizontales ortogonales de los campos eléctrico y magnético en la superficie terrestre. Usando diferentes frecuencias se puede conocer cómo varía la resistividad en el subsuelo con la profundidad. Éste último es mucho más completo que el anterior.

3.3.3 LA PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Este tipo de prospección geofísica también estudia los materiales del subsuelo en función de su carácter más o menos conductor pero, en lugar de emplear los campos eléctricos naturales o artificiales para conseguir ese objetivo, lo hace mediante el empleo de campos magnéticos y para ello se basa en que un campo magnético alterno inducirá una corriente en un material conductor. Si no existe material conductor, un campo electromagnético dado tendrá ciertas características, pero si existe material conductor, las características de ese campo teórico serán diferentes y, además, esta diferencia podrá reconocerse y medirse.

Desde un punto de vista Geofísico esta idea conceptual quiere decir que existirá una anomalía en el subsuelo cuando el campo magnético se aparte de las características que debe cumplir un campo normal.

Los equipos electromagnéticos son muy diversos, dependiendo de cuál sea su fundamento y metodología de trabajo pero en todos es similar el principio de actuación: todos se componen de un transmisor y un receptor. El emisor consta de una bobina conectada a una fuente de corriente alterna. Esta bobina produce un campo magnético a su alrededor que crea una corriente inducida que es registrada por el receptor mediante una bobina de cable conectada a un voltímetro para poder medir el voltaje inducido.

Entre los numerosos métodos de análisis del subsuelo basados en la prospección electromagnética se detallan a continuación características referentes a los sondeos electromagnéticos, al VLF y al georrádar ya que, en mayor o menor medida, pueden aplicarse a la búsqueda de objetivos parecidos a los expuestos en esta Tesis Doctoral.

Los sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (los denominados SEDT) son una modalidad de prospección geofísica que guarda parecidos muy importantes con los SEV. Su denominación se debe a que la lectura de la resistividad eléctrica de los materiales la establecen en base al comportamiento de los mismos en presencia de un campo magnético generado, realizándose las lecturas en unos determinados tiempos ya preestablecidos. Dependiendo el voltaje medido se calcula, en el procesado, la resistividad de las formaciones del subsuelo lo que permite, consecuentemente, determinar las características bajo la superficie del terreno.

Este método tiene unas características que permitiría emplearlo como alternativa a la prospección mediante SEV, pero fundamentalmente se ha cuando las profundidades de investigación son importantes.

El otro método geofísico basado en la prospección electromagnética, de actuación más limitada por restringirse a la detección de fracturas, su caracterización y orientación, es el denominado VLF (de las iniciales de Very Low Frecuencia) cuyas probabilidades de éxito son mayores si se desarrolla la investigación en materiales competentes y homogéneos, como es el caso de los granitos.

Pero, a pesar de todas estas limitaciones, es un método destacable por la sencillez y rapidez de ejecución. En esta metodología, los aparatos de medida utilizan los componentes magnéticos del campo electromagnético generado por transmisores de larga distancia en la banda de muy baja frecuencia (de ahí su nombre), y que proceden de una serie de antenas distribuidas por el mundo. Estas antenas emiten ondas de radio de manera continuada y llegan a los receptores de estos equipos en forma de una señal constante, excepto en los puntos donde haya presencia de estructuras conductoras cercanas a superficie, como las fracturas, al generarse un campo secundario que da lugar a un “pico” en la lectura. La aplicación de este método a la detección de cavidades es factible en tanto que teóricamente puede dar una anomalía registrable. Pero requiere, para ello, unos condicionantes como, por ejemplo, extensión suficiente, morfología más o menos aplanada y disposición algo verticalizada; es decir, con una morfología que recuerda a una “fractura ancha”. El relleno arcilloso de la misma “ayudaría” a su detección. No obstante, se une a esto a la necesidad de que la roca encajante sea bastante homogénea para que sea más fácilmente identificable lo cual es poco frecuente en rocas carbonatadas, las que más comúnmente presentan un desarrollo de fenómenos kársticos.

Esta distorsión del campo magnético es lo que permite localizar las estructuras, sus características y su orientación, aspectos que se analizan en función de la respuesta de dos líneas generadas, la componente Real y la componente Imaginaria, que se refieren a la geometría de la fractura y a la calidad del relleno (conductor o resistivo), respectivamente.

El tercer método basado en la prospección electromagnética es el denominado georrádar, el más adecuado de los tres para los fines aquí perseguidos.

El método GPR (Ground Penetrating Radar) produce perfiles continuos de alta resolución. Sus ventajas principales son la rapidez de toma de datos (cada punto de medida se toma en pocos segundos), su versatilidad, por la posibilidad de intercambiar antenas con diferentes frecuencias (hasta determinar la más adecuada a cada terreno) y su carácter no destructivo. (Peters, L. et al., 1994)

La principal desventaja, es la excesiva dependencia de las características del terreno al que se aplica, debido a que determinadas circunstancias atenúan la penetración del impulso electromagnético. En caso de existir elevados contenidos en arcilla este fenómeno de atenuación se agravará, como también sucede cuando el nivel freático está próximo a superficie. Un importante nivel de ruido ambiental anula la

operatividad de este sistema, como es el caso de la existencia de tendidos eléctricos, por los campos electromagnéticos que provocan.

Los equipos de radar de subsuelo radian mediante una antena transmisora impulsos cortos de energía electromagnética con radio-frecuencias. Cuando la onda radiada halla heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo, parte de la energía se refleja de nuevo a la superficie y parte se transmite hacia profundidades mayores.

La señal reflejada se amplifica, transforma al espectro de la audiodiferencia, registra, procesa e imprime. El registro muestra un perfil continuo en el que se indica el tiempo total de viaje de una señal, al pasar a través del subsuelo, reflejarse en una heterogeneidad, y volver a la superficie. Este doble viaje (TWT - Two Way Time) se mide en nanosegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ segundos).

La selección de la frecuencia de las antenas para un estudio determinado es función del compromiso entre la resolución y la penetración (Garbó, A., 1998). Las frecuencias elevadas son más resolutivas a poca profundidad, mientras que las de baja frecuencia son más penetrativas y tienen menor resolución. Los equipos existentes en el mercado incorporan antenas con frecuencias que van desde el Gigahercio (Ghz) hasta los 110 MHz. Existen antenas de mayor y menor frecuencia pero su uso es mas limitado.

El equipo de Geo-radar consta de 4 elementos principales: la unidad transmisora, la unidad receptora, la unidad de control y la unidad de registro.

La técnica de medida más común, es la de Perfiles de reflexión. Esta modalidad, consiste en desplazar las antenas sobre el objetivo manteniendo fija la distancia entre ambas, lo que permite obtener una sección en la que se representan tiempos dobles en ordenadas y distancia horizontal en abscisas (Figura 3.5). Este tipo de registro es similar al que se utiliza en sísmica de reflexión y sonar. La profundidad de los reflectores puede determinarse si se conoce la velocidad de propagación del impulso EM a través del terreno, o por correlación con sondeos efectuados en puntos sobre el perfil. La representación de los resultados se hace en forma de registros de área variable.

La interpretación de los registros de Geo-radar, también llamados radargramas, se basa normalmente en la caracterización de la textura, amplitud, continuidad y terminación de las reflexiones. Todo trabajo de interpretación de los datos registrados implica las siguientes etapas: reducción, corrección y filtrado de los datos; identificación de las reflexiones y del ruido; conversión de los tiempos dobles de reflexión, ida y vuelta, a sus profundidades equivalentes, e integración de la información proporcionada por los diferentes perfiles con la información geológica disponible.

La aplicación de este método prospectivo para la localización de restos arqueológicos es relativamente frecuente debido a la buena resolución en los metros subsuperficiales y a la adecuada operatividad para la definición de elementos estructurales enterrados.

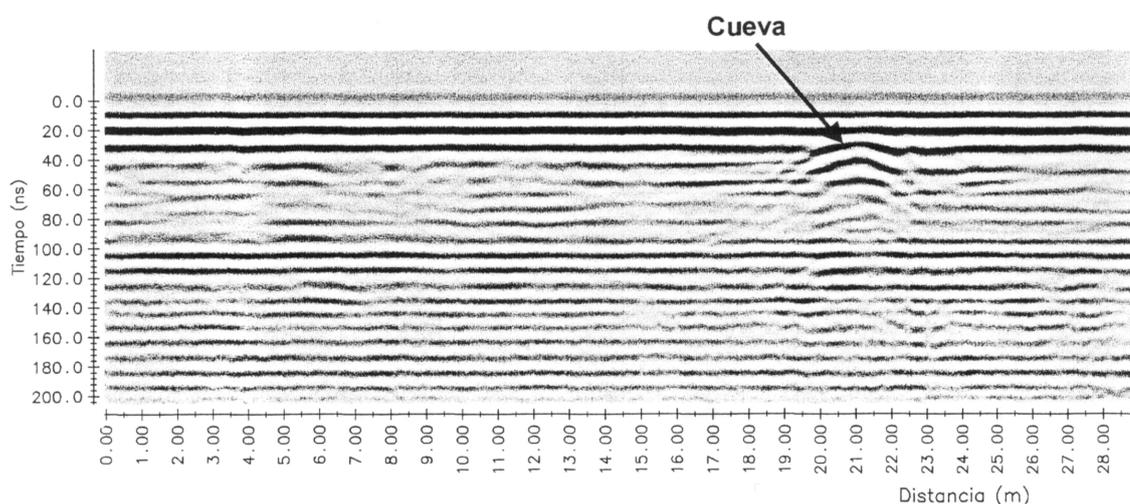


Figura 3.5. Perfil de reflexión mediante Geo-radar operando a 110 MHz, para detectar la presencia de cavidades en el subsuelo. La flecha indica la posición de un reflector indicativo de hueco.

3.3.4 LA PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA

Este método es muy diferente a los anteriormente comentados ya que se basa en la medida en superficie de las anomalías de la componente vertical del campo gravífico terrestre. Un hipotético subsuelo formado por una masa litológica homogénea no presentaría anomalías, pero la real distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades (litologías y texturas distintas dan densidades diferentes) da lugar a la existencia de esas anomalías. Su detección, medición e interpretación conllevan la identificación de esas masas diferentes en el subsuelo.

Puesto que el método gravimétrico detecta variaciones de densidad en el subsuelo producidas por excesos o defectos de masa, resulta un método idóneo para localizar huecos de cierta entidad o estructuras kársticas, que denotan importantes defectos de masa.

Para cubrir el objetivo de localización de huecos se habla de microgravimetría, una variante que emplea un equipo más sensible (microgravímetro) y una mayor densidad de medidas para superficies equivalentes.

La metodología consiste en distribuir en campo una serie de estaciones de medida y medir en ellas el valor de la gravedad mediante el empleo de un aparato denominado gravímetro que no es más que una balanza extremadamente sensible que acusa las

diferencias en el peso de una masa cuando ésta se sitúa en lugares diferentes con materiales distintos en el subsuelo.

La base del método es la ley de la gravitación universal de Newton: el campo gravitatorio terrestre, o gravedad, no es más que un caso particular de la ley de atracción universal por lo que se puede decir que el peso de un cuerpo es igual a la atracción de la Tierra sobre dicho cuerpo, es decir, aplicando la ley de Newton:

$$m \cdot g = G \cdot M \cdot m / r^2$$

donde m y M son las masas del cuerpo considerado y de la Tierra; r el radio terrestre y G la constante de gravitación universal.

La prospección gravimétrica consiste en medir g (o sus variaciones) para aplicar posteriormente a los valores brutos observados un cierto número de correcciones para eliminar la influencia de otros cuerpos celestes y de la rotación y forma de la Tierra, con objeto de obtener las anomalías que se deban únicamente a variaciones de densidad en el subsuelo.

Rocas	Limites	Media
Limos secos	1.4-1.8	1.6
Limos embebidos en agua	1.8-2.2	2
Arenas y gravas secas	1.4-2.2	1.8
Arenas y gravas saturadas	1.8-2.4	2.1
Arcillas	1.7-2.5	2.1
Sal y yeso masivos	2.1-2.3	2.2
Margas	1.8-2.6	2.2
Arenisca	2-2.6	2.3
Calizas y dolomías	2.2-2.8	2.5
Esquistos	2.4-2.8	2.6
Granito	2.6-2.8	2.7
Gneis	2.6-3	2.8
Lavas	2.8-3	2.9
Anhidrita	2.8-3	2.9

Tabla 3.2. Órdenes de magnitud de la densidad de las rocas más comunes

El proceso de una prospección gravimétrica consiste en medir en el campo una serie de valores de la gravedad mediante el empleo de un gravímetro, que es una balanza extremadamente sensible que acusa las diferencias en el peso de una masa cuando ésta se sitúa en lugares diferentes con materiales distintos en el subsuelo.

Las variaciones medidas, en unidades gravimétricas denominadas miligales, son mínimas de una estación a otra y, para que sean comparables entre sí y analizadas en conjunto deberán estar homogeneizadas, es decir, ser corregidas de efectos ajenos a la

atracción gravitatoria con el fin de que su valor se refiera sólo a variaciones litológicas o texturales bajo la estación de medida del gravímetro.

Las correcciones que hay que hacer a las medidas se refieren a la corrección por latitud, la atracción es mayor en los polos al ser el radio de la Tierra menor, y a las correcciones por altitud, en la que influye la altura respecto al centro de la Tierra (corrección de aire libre o de Fayé), la capa de terreno comprendido entre la altura de la estación y el nivel del mar (corrección de Bouguer) y el efecto gravífico de las masas situadas por encima y por debajo del nivel de la estación (corrección topográfica).

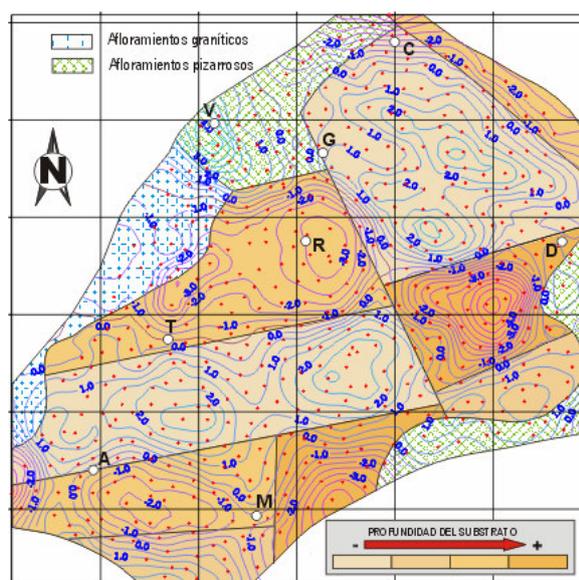


Figura 3.6. Mapa Gravimétrico. Tomado de Aracil, E. (2001). Pp.39.

El resultado que se obtiene con las medidas ya corregidas es el mapa de anomalías de Bouguer, anomalía que consta de dos componentes: una regional (referida a los efectos regionales y, podría decirse, más profundos) y otra residual (referida a los efectos más locales y, podría decirse, menos profundos). Es este último mapa el que se suele emplear para “observar” la distribución de las distintas unidades y la estructura de la cuenca sedimentaria (figura 13).

Una vez distribuidos los valores de cada estación de medida, la distribución de isolíneas en estos mapas condiciona muchas veces la aparición de unas anomalías más o menos intensas y más o menos extensas, de distinto valor: las negativas indican zonas de menor densidad que la correspondiente al sustrato, y las positivas, que indican sectores con mayor valor de densidad.

Si se considera, por ejemplo, la prospección en una cuenca sedimentaria detrítica localizada en una zona granítica, las anomalías positivas se distribuirían por los afloramientos cristalinos que bordean la cuenca y las anomalías negativas indicarían

sectores donde el relleno detrítico es más potente, tanto mayor cuanto más intenso sea el valor de la anomalía.

Aplicando este método a los fines de esta Tesis Doctoral habrá que buscar anomalías negativas para identificar cavidades y galerías ya que la deficiencia de masa va a provocar esas medidas anómalas.

En el caso de una finalidad arqueológica, la prospección microgravimétrica también tiene aplicabilidad ya que, en el caso de búsqueda de muros, las anomalías positivas rectilíneas y con morfologías geométrica suelen ser testimonio de esos elementos bajo superficie. La búsqueda de cámaras, por el contrario, enfocará sus miras a las anomalías negativas por el mismo principio de falta de masa descrito para las cantidades.

La versatilidad y aplicabilidad de este método se contraponen con unos resultados que suelen ser más interpretables desde el punto de vista cualitativo que cuantitativo. Además, desde un enfoque de operatividad, el número de medidas que ha de realizarse debe ser muy elevado para localizar estos objetivos, con el consecuente trabajo que llevaría adicional (topografía precisa de todas las medidas y procesado de toda la información).

3.3.5 LA PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

Utilizan las propiedades magnéticas de ciertos minerales y las variaciones que generan sobre el campo magnético de la Tierra. Se miden los efectos de rocas que contienen dichos minerales sobre la *inclinación* y *declinación* magnéticas, que se manifiestan a modo de desviaciones.

El método magnético es el más antiguo de los métodos de Prospección Geofísica, aunque inicialmente sólo se usaba para la localización de minerales magnéticos.

El método magnético es muy similar al método gravimétrico, tanto en la técnica de campo como en la interpretación y presentación de los resultados. Se basa en el hecho que la mayoría de las rocas contiene pequeñas pero significativas cantidades de minerales ferromagnéticos, tales como magnetita o hematites, en proporciones muy variables según los tipos de rocas. Por tanto, las rocas tienen una débil imanación en parte inducida probablemente por el campo magnético terrestre y en parte permanente. Esta imanación modifica el campo terrestre en una cantidad que puede medirse en superficie con ayuda de instrumentos sensibles.

La intensidad de imanación inducida en una roca por el campo terrestre viene dada por:

$$J = k \cdot F$$

Donde J es la intensidad de imanación en amp/m, k la susceptibilidad y F la intensidad del campo medida en amp/m.

Generalmente la susceptibilidad magnética de los cuerpos permanece constante y es pequeña (cuerpos diamagnéticos y paramagnéticos). Sin embargo algunos cuerpos tienen susceptibilidad magnética que varía con el campo magnético y, al anularse este campo magnético conservan parte de su imanación (imanación remanente). La susceptibilidad de estos cuerpos, llamados ferromagnéticos, es siempre elevada.

La susceptibilidad de las rocas depende, en gran parte, de su contenido en minerales ferromagnéticos y, principalmente, en magnetita e ilmenita. Para la mayoría de las rocas la imanación remanente es despreciable frente a la imanación inducida.

Rocas	$K \cdot 10^6$
Dolomías	0-20
Calizas	0-50
Areniscas	0-100
Arcillas	0-200
Esquistos	0-500
Gneis	0-1000
Granito	100-1500
Lavas	500-10000
Ilmenita	20000-50000
Magnetita	Mínimo 100000

Tabla 3.3. Orden de magnitud de la susceptibilidad magnética k de distintos tipos de rocas.

Se realizan dos tipos de prospección magnética: terrestre o aérea. La prospección magnética en tierra se emplea para estudios de detalle, o si se asocia a la gravimetría permite hacer estudios estructurales. Sin embargo, para el reconocimiento de áreas extensas es preferible emplear el método aeromagnético, por rapidez, economía y además elimina las perturbaciones del campo magnético debidas a causas superficiales y proporciona perfiles continuos.

Los magnetómetros son los aparatos de medida que van a permitir medir bien las variaciones de la componente vertical del campo o el campo total; los magnetómetros que miden la variación de la componente vertical sólo se usan en observaciones en tierra. La prospección magnética en tierra se emplea bien para estudio

Previamente al trazado de un mapa de la componente vertical o del campo total que es el que se va usar para interpretar, es necesario realizar una serie de correcciones a las observaciones:

- Corrección de temperatura

- Corrección de las variaciones diurnas (y cualquier otra variación temporal periódica o no) y de la deriva instrumental.
- Corrección de la variación normal, es decir las variaciones debidas a la latitud y longitud del punto considerado.

La forma de las anomalías magnéticas depende no sólo de la susceptibilidad magnética y de la forma, volumen y profundidad a que yace la causa geológica, sino también depende de la orientación de la causa geológica y de la inclinación del campo geomagnético.

La prospección magnética tiene muchas aplicaciones en el campo de la minería. A escala menor también se emplea para cartografiar estructuras geológicas. En la prospección petrolera en regiones geológicamente inexploradas suministran información muy importante y generalmente se hace desde el aire. También se emplean, aunque muy poco, en el campo de la ingeniería civil, bien en prospecciones previas a la construcción buscando los estratos competentes o bien en estudios hidrogeológicos.

La aplicación a objetivos arqueológicos está poco desarrollada pues se suele limitar a estudios de gran detalle en los que las anomalías deben presentar una morfología longitudinal y una disposición geométrica para que puedan ser atribuidas, con un cierto convencimiento a construcciones enterradas.

3.3.6 MÉTODOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA PROTÓNICA (RMP)

El sistema permite detectar directamente aguas subterráneas por medición de la relajación magnética de los protones de hidrógeno (moléculas de agua) cuando estos han sido excitados por una corriente transmitida en una espira puesta en la superficie del suelo.

La Resonancia Magnética Protónica (RMP) es un método basado en una teoría bien establecida. Es el único método no invasivo que permite estudiar directamente los acuíferos desde la superficie terrestre.

Los átomos de hidrógeno en las moléculas del agua se excitan mediante la inyección de pulsos de corriente alterna en una espira localizada en la superficie del terreno y oscilando a una frecuencia dada (frecuencia de Larmor). Se mide el campo magnético producido por los protones H, para diferentes momentos de pulsos (intensidad x duración).

La interpretación de las mediciones permite hacer una estimación del contenido porcentual de agua a profundidad, así como del valor medio del tamaño de los poros;

parámetros que son de suma importancia en la evaluación de un programa antes de perforar.

Como fácilmente se desprende de la descripción de este método, no es aplicable a objetivos arqueológicos pero sí a identificación de cavidades siempre y cuando éstas cumplan una premisa: que se hayan originado por efecto de fenómenos de karstificación y pertenezcan a un sistema kárstico activo en tanto que deberá circular agua por las galerías para poder ser detectada.

3.4 PROSPECCIÓN EN SONDEOS (Testificación Geofísica)

GENERALIDADES

La información que pueden aportar los sondeos es muy valiosa y variada, tanto en lo que se refiere a la testificación litológica como a la testificación geofísica. Esta técnica consiste en la medición de diferentes parámetros geofísicos de los materiales del subsuelo atravesados por un sondeo mediante el empleo de sondas que se introducen en dicha perforación (Rider, M., 2002). La representación gráfica de cada uno de esos parámetros medidos con respecto a la profundidad constituye el resultado de esta técnica, denominándose estos documentos registros geofísicos, diagráfias o logs (figura 3.7).

Para realizar la testificación geofísica se emplea un equipo de medida, que se sitúa en superficie, unas sondas, que son los elementos que se introducen en el sondeo, y el cable que une ambas partes. La metodología general consiste en la introducción de la sonda, una vez finalizada la perforación del sondeo, y la medición de los diferentes parámetros, bien durante el descenso de la misma o en su ascenso.

Aunque se extraigan muestras en la perforación de los sondeos que informen sobre los materiales atravesados, la testificación geofísica es un tipo de prospección necesaria cuando se persigue localizar cavidades pues la ausencia de masa en las mismas condiciona la falta de muestra extraída y, consecuentemente, no se dispondrá de información resolutive.

No obstante, el carácter continuo de los registros geofísicos y la precisión que alcanzan algunas medidas hacen que esta metodología de trabajo se vaya imponiendo cada vez con mayor frecuencia dentro del mundo de la perforación y la investigación.

Los registros que se van a emplear en cada trabajo van a depender fundamentalmente del objetivo perseguido: según sea el fin que se requiere, el o los registros geofísicos necesarios van a variar. La situación ideal sería la adquisición de un número importante de registros geofísicos, pero no siempre se puede llevar a cabo, principalmente por razones presupuestarias y operativas. A este respecto hay una

gran equivalencia con los métodos prospectivos de superficie: un mayor número de métodos para cubrir un objetivo aportarán mayor seguridad en la interpretación de lo que dará un mayor peso a los resultados (Aracil, E., 2001). En la testificación geofísica, un mayor número de sondas permitirá tener unos resultados contrastados con más parámetros.

Lo ideal, no obstante, es que se obtenga el mayor y más variado número de registros geofísicos ya que siempre son susceptibles de aportar información útil y, además, mediante su combinación, van a permitir discernir entre variables de difícil resolución con uno o pocos parámetros.

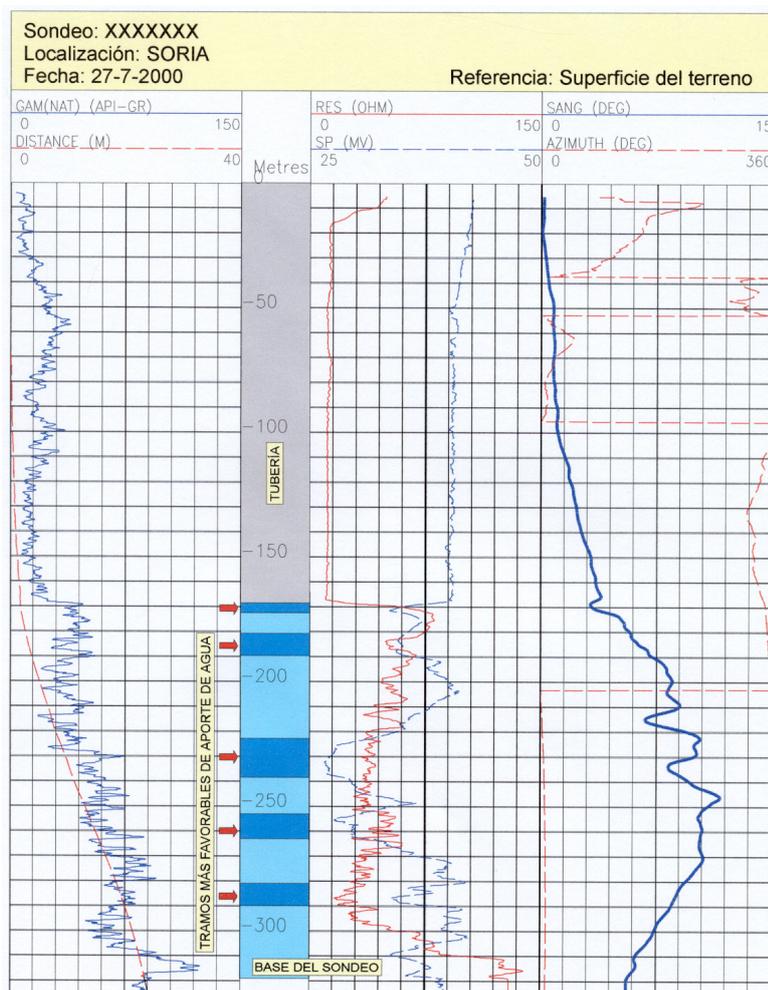


Figura 3.7. Registros geofísicos GAM(NAT): Gamma Natural, RES: Resistividad, SP: Potencial Espontaneo, para una investigación hidrogeológica. Tomado de Aracil, E. (2001). Pp.44.

LOS REGISTROS GEOFÍSICOS

3.4.1 LA RADIATIVIDAD NATURAL

El registro de radiactividad natural refleja el valor de radiación gamma que, de forma natural, emiten las distintas litologías. La sonda está provista de un detector que

recibe la emisión gamma de las unidades litológicas atravesadas por el sondeo. La radiación natural más común en rocas procede principalmente de elementos radiactivos de la familia del torio, el uranio-radio y el isótopo radioactivo ^{40}K (Adams y Weaver, 1958 en Rider, M., 2002). Litologías diferentes emitirán intensidades diferentes de radiación lo que permitirá diferenciar capas de distinta radiactividad natural y, por atribución, capas de distinta litología.

Este registro es el más común y el más relacionado con la litología, razón por la cual prácticamente todas las sondas están provistas de un escintilómetro para registrarlo de forma simultánea a la adquisición del resto de los parámetros que puedan medir. Parece pues lógico pensar que a partir de un registro geofísico de este tipo se va a poder generar una columna litológica, si bien siempre hay que hacerlo con reservas.

La interpretación de estos registros geofísicos debe ir siempre acompañada de datos litológicos y de otros registros que, en unas ocasiones, den peso a las identificaciones realizadas y, en otras ocasiones, permitan discernir entre litologías “radiactivamente” parecidas (figura 3.7).

La aplicación directa a la detección de cavidades es nula pero, indirectamente, a tratarse de un parámetro tan “litológico”, aportará información sobre la litología de las capas y, por lo tanto, se podrán identificar las más susceptibles de presentar cavidades.

3.4.2 EL POTENCIAL ESPONTÁNEO

El registro de potencial espontáneo refleja las medidas de la diferencia de potencial natural entre un electrodo localizado en el sondeo y otro emplazado en superficie. Estas diferencias de potencial se generan a partir del desequilibrio eléctrico creado al poner en contacto, mediante un sondeo, formaciones litológicas que de forma natural están desconectadas.

Para que se produzcan estas diferencias de potencial se hace necesaria la coexistencia de tres factores: presencia de un fluido conductor en el sondeo así como de una capa permeable rodeada por una formación impermeable y una diferencia de salinidad (o presión) entre el fluido del sondeo y el agua de formación. Con todo ello se producen las corrientes potenciales al entrar en contacto los fluidos correspondientes a partir de un medio poroso o de un medio semipermeable.

Las dos aplicaciones más importantes de este registro se encaminan al cálculo de la resistividad del agua de formación y para ver la permeabilidad o impermeabilidad de las capas. En definitiva, conjugando ambos objetivos, este registro permite diferenciar las capas que contienen agua y son permeables de las capas que son impermeables

(o que están cementadas) y, por otro lado, diferenciar las capas permeables con agua dulce de las que contienen agua salinizada.

La localización de cavidades rellenas de agua sería una aplicación de este parámetro siempre y cuando se localicen dentro de unidades litológicas masivas y cementadas ya que van a identificar las cotas en las que hay presencia de agua, que son, precisamente, las cotas entre las que se desarrollen las cavidades

3.4.3 LA RESISTIVIDAD

El registro de resistividad es el que refleja la propiedad intrínseca de cada material para oponerse al flujo de la corriente eléctrica. Este parámetro, opuesto a la conductividad, es muy elevado en los materiales que forman la roca (cuarzo, calcita, dolomita), del orden de 100×10^6 ohm.m, pero el agua de los poros y la capacidad del cambio catiónico de los minerales arcillosos reducen su valor en gran medida.

La resistividad va a ser, por tanto, función de la litología, de su textura (porosidad, fracturación) y del fluido existente en los poros, fracturas y huecos. En términos generales, calizas, dolomías, areniscas y granitos, por ejemplo, van a presentar mayores resistividades debido a la menor porosidad que las mismas rocas en un estado más o menos desarrollado de fracturación y/o alteración, precisamente por la mayor porosidad cuando están presentes estas texturas. También esas rocas compactas van a tener una mayor resistividad que unas arcillas o unas margas debido a la importante porosidad, que no permeabilidad, de esas últimas.

Dada la importante relación entre resistividad y litología, este registro es uno de los más empleados, conjuntamente con el de radiactividad gamma natural, para cuestiones dirigidas a la interpretación litológica y de la textura. Así, una formación calcárea presentará una determinada resistividad alta y los descensos en dicho valor van a indicar tramos de mayor porosidad, relacionados con presencia de fracturas. También una arena con una resistividad determinada y relativamente homogénea va a reflejar con incrementos de este parámetro los tramos cementados, es decir, los tramos con menor porosidad.

La medición de la resistividad en un sondeo es equivalente a la medición de resistividad en un sondeo eléctrico vertical (SEV) o en un perfil de tomografía eléctrica ya que se trata del mismo parámetro físico que está condicionado por los mismos aspectos.

Es por ello por lo que es importante detenerse un poco en la descripción de las características de este parámetro en la testificación geofísica de sondeos.

La resistividad se puede medir con muchos dispositivos electródicos situados en el interior de la sonda. Esto va a condicionar que se puedan obtener numerosos registros diferentes (aunque parecidos) con un punto común: la medición de la resistividad.

Así, hay registros de resistividad lateral, resistividad normal (corta y larga), microrresistividad, inducción, resistividad focalizada, etc. La disposición de los electrodos y la separación entre los mismos será la causa diferenciadora de los registros geofísicos finales.

De entre estos tipos son, tal vez, los denominados resistividad normal corta y resistividad normal larga los que mayores semejanzas tengan con los métodos eléctrico-resistivos de prospección del subsuelo desarrollados en el capítulo 4. Método eléctrico-resistivos de superficie. Esto se debe a que la resistividad normal va a tener mayor resolución de lectura cuando se trata de la corta (espaciado de 16" entre electrodos) que de la larga (espaciado de 64" entre electrodos) pero en detrimento de la profundidad de investigación (mayor en la resistividad normal larga que en la corta).

3.4.4 CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA DEL FLUIDO

El registro de conductividad del fluido refleja el valor de conductividad del agua contenida en el pozo que, en cierta medida, indica la mayor o menor concentración de sales en la misma, es decir, su salinidad dado que los incrementos en la concentración de sales en un fluido van a facilitar la conducción de la corriente eléctrica. Es, por tanto, un registro relacionado con la calidad del agua.

Esta característica que presentan los fluidos puede variar en función de la temperatura. Para una misma concentración, a mayor temperatura, la conductividad va a ser también mayor y, a menor temperatura, la conductividad disminuye. Por esta razón, de forma combinada a la resistividad, se mide la temperatura del fluido con la misma sonda para observar dos aspectos: por un lado, comprobar que las posibles variaciones de conductividad son debidas a variaciones en la concentración de sales y no a variaciones de temperatura y, por otro lado, para corregir en el registro de la conductividad el efecto que produce la temperatura. Es lo que se denomina, normalizar la conductividad del fluido a una temperatura determinada.

3.4.5 SÓNICO

El registro sónico es la medida de la capacidad de la formación de transmitir las ondas sonoras. Esta capacidad va a ser diferente en función de la litología y la textura de ésta. Para una misma litología homogénea, una mayor fracturación, alteración y/o porosidad va a dar una menor capacidad a la roca para transmitir las ondas sonoras que en una misma roca sana y compacta.

El principio de medida se basa en contabilizar el tiempo que un impulso sonoro tarda en recorrer la distancia conocida entre emisor y receptor. Las ondas P viajan desde el emisor al receptor por la formación y, dado que estas ondas compresionales son las más rápidas, son las empleadas en medir la velocidad de la transmisión.

Si bien la velocidad de transmisión de las ondas está estrechamente ligada al grado de compactación de la roca, se trata de un parámetro que se ve influido por numerosos factores: la porosidad, la densidad, la temperatura, el tamaño de grano, etc.

Estableciendo comparaciones entre la prospección geofísica de superficie y la de sondeos, este parámetro sónico guarda gran equivalencia con la sísmica de refracción, ya explicada anteriormente. La emisión de ondas sonoras y su recepción en unos sensores van a dar una interpretación del terreno que va a estar condicionada a la transmisión de la misma. Según sea ésta se podrán identificar, dentro de terrenos compactos, fracturas, tramos alterados e, incluso, cavidades.

3.4.6 VERTICALIDAD Y DESVIACIÓN

La verticalidad de los sondeos es un parámetro muy importante que también puede medirse como registro continuo con una sonda de testificación geofísica a partir de dos inclinómetros que definen los ejes menores de la sonda. Del mismo modo, con una brújula integrada, registra de forma continua la orientación de cada profundidad del pozo con respecto al Norte Geográfico (figura 3.7).

Estos registros, fundamentalmente el de verticalidad, son muy importantes para definir la calidad constructiva del sondeo. En definitiva, se trata de un registro geofísico de calidad de la perforación que debe registrarse con el sondeo desnudo o entubado con PVC ya que la tubería de hierro impide la determinación de la orientación del mismo.

3.4.7 NEUTRÓN-NEUTRÓN

El registro de neutrón-neutrón, tras un procesado en tiempo real, permite estimar la porosidad de la roca. Su medición se basa en la pérdida de velocidad que sufren los neutrones rápidos que emite una fuente radiactiva situada en la sonda cuando colisionan con los núcleos de los átomos que se interponen en su recorrido convirtiéndose en neutrones térmicos, de menor energía. Esta pérdida de energía es proporcional al número de choques con átomos de una masa similar y los únicos átomos libres en el terreno con masa similar son los hidrógenos que se encuentran en el agua. Esto permite deducir una cantidad de agua en función del contenido en

hidrógeno inferido a partir de la pérdida de energía de los neutrones rápidos. Esta cantidad de agua se traduce posteriormente en porcentaje de porosidad y, de esta manera, en tiempo real se obtiene la porosidad en base a la pérdida de energía neutrónica registrada.

Las aplicaciones de este registro son múltiples: cálculo de la porosidad de la formación, reconstrucción litológica de las columnas de los sondeos y para correlaciones entre sondeos.

Igual que se definió en el parámetro de potencial espontáneo, la única aplicabilidad a la localización de cavidades es por deducción tras observar grandes valores de porosidad (de contenido de agua) en una roca poco porosa. Esto requiere, como es lógico, que la cavidad esté rellena de agua.

3.4.8 DENSIDAD

La sonda de densidad registra la densidad del terreno atravesada por el sondeo. Del mismo modo que la sonda de neutrones, ésta dispone de una fuente radiactiva de radiación gamma (generalmente Cesio 137) que provoca una radiación secundaria, característica de la densidad del terreno registrado en el entorno cercano de la sonda. Si el entorno es denso, menor será la cantidad de radiación secundaria recibida en el detector.

Entre las aplicaciones principales de este parámetro destaca la determinación litológica y mineralógica. También es muy importante el empleo de este registro geofísico para la localización de capas de carbón por su baja densidad, para el cálculo de la porosidad y para la localización de fracturas, tramos alterados dentro de la roca sana y cavidades.

Del mismo modo a como se ha realizado en la descripción de otros parámetros, la testificación geofísica de éste es equivalente, en cierto modo, a la gravimetría y, como tal, permitirá tener entre los objetivos la búsqueda de cavidades como tramos con deficiencia de masa, es decir, con densidad muy reducida.

3.4.9 CALIBRE

El registro del calibre indica el perfil continuo del diámetro del sondeo. Las variaciones del diámetro final del pozo con respecto al correspondiente a la perforación se deben a desprendimientos de la roca de las paredes que dan lugar a cavernas más o menos desarrolladas en función del grado de alteración, consistencia, fracturación, etc. que tenga la roca atravesada. Suele diferenciar litologías y, sobre todo, grados de diferente consistencia dentro de una misma roca.

Cuanto más compacta es la roca perforada su diámetro se asemeja más al diámetro de perforación. En terrenos poco consolidados, como por ejemplo, las series areno-arcillosas, las arcillas poco compactadas se desmoronan dando diámetros mayores que el de perforación mientras que las arenas porosas, por el efecto de filtrado, presentan una ligera reducción del diámetro al formarse una costra de lodo en su superficie.

3.5 CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto, el subsuelo se puede investigar a partir del análisis de diversas propiedades de las rocas como la conductividad, la densidad, la porosidad, etc., y los métodos de prospección geofísica están diseñados para hacerlo por cualquiera de ellos. Estos métodos, muchos y de concepción muy diversa, cada uno con una operatividad o una posibilidad más o menos indicada para cubrir un objetivo concreto, a veces presentan la dificultad de la elección del más adecuado por lo que suele ser conveniente la ejecución de la investigación simultaneando más de uno para que los resultados se vean más reforzados.

Es útil, por tanto, conocer la definición y características de cada método prospectivo o, al menos, de los más empleados y cuyo enfoque esté más dirigido a la identificación de cavidades y a la búsqueda de restos arqueológicos.

Los parámetros físicos en los que se basan los distintos métodos geofísicos se “acomodan” de diferente modo a la consecución del objetivo haciendo que unos métodos sean más adecuados que otros.

Es importante constatar con respecto a los métodos de prospección geofísica de superficie que la ventaja que presentan de obtener información acerca del subsuelo de regiones más o menos extensas puede no ser tal si la información obtenida no se contrasta con datos reales del subsuelo procedentes de sondeos. Es decir, que es una información que precisa de su contraste con datos verdaderos que verifiquen las interpretaciones que se estén realizando o que se vayan a obtener. Un perfil geoelectrico o una línea sísmica en sí carecen prácticamente de valor si no vienen acompañados por información del subsuelo procedente de sondeos perforados en la misma zona o en zonas geológica y geográficamente próximas. La razón se debe a que hay que hacer el “calado” del perfil, es decir, la identificación de los distintos, o al menos los más importantes, niveles interpretados para conocer el verdadero perfil geológico del subsuelo.

De la descripción de los parámetros registrables en la testificación geofísica de sondeos se puede deducir que, si bien acotan de manera bastante precisa las

profundidades de las cavidades, sólo lo pueden hacer si el sondeo atraviesa la cavidad. Además, y aún en este caso, no podrá definirse el tamaño de la cavidad.

Todos los métodos geofísicos descritos son más o menos útiles y, sin duda, la combinación de varios de ellos resultará la opción más acertada para la investigación del subsuelo. Sin embargo, de entre todos ellos, es el método prospectivo eléctrico el que se ha desarrollado en esta Tesis Doctoral ya que, en su modalidad actual de la Tomografía Eléctrica, se presenta como un importante sistema de investigación bajo superficie al permitir múltiples configuraciones y obtener representativos resultados de forma relativamente rápida. Lo importante, después, es aprender a interpretar para alcanzar los objetivos.

4. MÉTODOS ELÉCTRICO RESISTIVOS DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO

4. MÉTODOS ELÉCTRICO-RESISTIVOS DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO

4.1 INTRODUCCIÓN

El método de la prospección geofísica basada en la resistividad eléctrica empezó a usarse a partir del año 1920 por los hermanos Schlumberger, aunque inicialmente sólo se aplicaban para obtener información cualitativa del terreno. Es a partir del año 1960 cuando comienzan a aplicarse estudios en los sondeos como método para obtener información cuantitativa del subsuelo.

El propósito de los estudios geoelectrónicos es determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo realizando medidas desde la superficie. Estas medidas se utilizan posteriormente para estimar la resistividad real del subsuelo. La resistividad del terreno está relacionada con varios parámetros geológicos, como son los contenidos de fluidos y minerales, la porosidad y grado de agua de saturación en la roca.

Las prospecciones mediante resistividad eléctrica se han usado durante muchas décadas en estudios hidrogeológicos, minería e investigaciones geotécnicas. Más recientemente están empezando a usarse en estudios relacionados con el medioambiente y, en menor medida, con la arqueología.

4.2 CONCEPTO DE CAMPO ELÉCTRICO

El comportamiento eléctrico de los materiales se pone de manifiesto en las situaciones más cotidianas o mediante sencillos experimentos domésticos, como por ejemplo la atracción electrostática de pequeños pedazos de papel por una barra de plástico previamente frotada con un paño. De esto se desprende que dos cuerpos cargados eléctricamente experimentan fuerzas entre sí y son capaces de atraer o repeler a otros, y del mismo modo se deduce que los cuerpos cargados eléctricamente establecen a su alrededor campos eléctricos que se manifiestan a través de fuerzas.

Si colocamos una carga eléctrica en una región, ésta perturbará las propiedades de esa región en el sentido de que cualquier otra carga situada en sus proximidades va a experimentar una fuerza de atracción o de repulsión según sean sus signos. De este modo se puede estimar que la presencia de una carga eléctrica en un lugar crea a su alrededor un campo eléctrico.

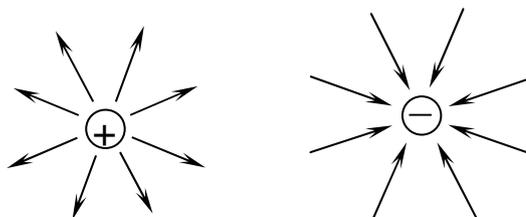
El campo eléctrico se manifiesta por la presencia de fuerzas lo que permite definirlo como un campo vectorial. Para cada punto de ese campo vectorial existirá un vector

con un módulo, una dirección y un sentido que han de coincidir con los de la fuerza generada por la carga eléctrica que lo genera.

Utilizando como referencia una carga eléctrica puntual, unidad y de signo positivo, podrá decirse que el campo eléctrico que se crea en cada punto por una distribución cualquiera de carga viene dado por un vector cuyo módulo es igual al valor de la fuerza ejercida sobre la unidad de carga positiva colocada en dicho punto (Martínez Lorenzo, A. et al., 1989). Las unidades del campo eléctrico son de fuerza por unidad de carga, es decir N/C en el sistema internacional o su equivalente V/m.

La dirección y el sentido del campo en cada punto coinciden con los de la fuerza sobre la carga de prueba colocada en él. Al vector que define esa fuerza se le llama intensidad del campo eléctrico, y se representa por E. $\vec{E} = F / q$

La representación gráfica de un campo eléctrico se recrea mediante líneas de campo, que asignan a cada punto del espacio un vector proporcional a su intensidad y sentido.



Por tanto el campo eléctrico de una región será un campo vectorial donde cada punto de esa región ($P_{x,y,z}$) tiene asignada una función vectorial (módulo, dirección y sentido) que representa una magnitud física de las mismas características. Si la función es uniforme, continua, finita y admite derivadas de primero y segundo orden, el campo se llama regular.

Un campo eléctrico también será un campo escalar porque cada punto del mismo ($P_{x,y,z}$) tiene asignada una función que le da el valor de una determinada magnitud escalar, como es el potencial eléctrico.

Se puede hacer un experimento para determinar la fuerza con la que se atraen o repelen dos cuerpos cargados eléctricamente. Así determinó Coulomb que dicha fuerza es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa: $F = K [(Q \cdot Q') / r^2]$. Es la conocida ley de Coulomb.

Se determinan: Q a la carga eléctrica, E al campo eléctrico, K a la constante de la ley de Coulomb (cuyo valor depende de las unidades de Q).

Un culombio (C) es la carga que, colocada a 1m de otra carga igual, experimenta una fuerza de repulsión de $9 \cdot 10^9$ N, y se obtiene:

$$K = F_r^2 / Q^2 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}^2 / 1 \text{ C}^2 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \text{ para el S.I.}$$

El potencial eléctrico tiene dimensiones de energía por unidad de carga J / C en el S.I. y recibe el nombre de voltio (V), en honor de Alessandro Volta.

Si en un terreno homogéneo de resistividad ρ se introduce, a través de un electrodo puntual A, una corriente continua de intensidad i , ésta fluye radialmente y las superficies equipotenciales son semiesferas concéntricas (Figura 4.1).

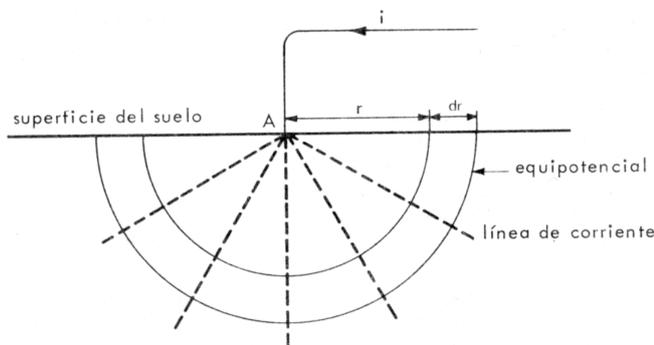


Figura 4.1. Electrodo puntual de emisión de corriente continua.
Tomado de Astier, J.L., 1982

Aplicando la ley de Ohm al espacio comprendido entre dos equipotenciales entre las que existe una diferencia de potencial dV , se tiene:

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} i \quad (4.1)$$

integrando

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (4.2)$$

Si el electrodo B que permite cerrar el circuito está a distancia finita de A, el potencial de un punto M viene dado por:

$$V_M = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4.3)$$

La distribución de las equipotenciales y de las líneas de corriente en la superficie del terreno (y en todos los planos que pasen por AB) aparece representada en la figura 4.2

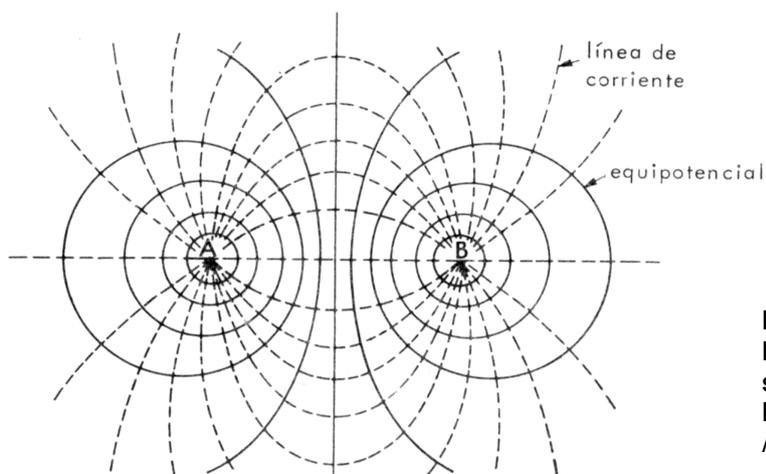


Figura 4.2. Distribución de las líneas de corriente y de las equipotenciales en la superficie de un medio homogéneo. Tomado de Astier, J.L., 1982

Puede verse que la profundidad de penetración de las líneas de corriente tiene su máximo en el centro del segmento AB. También se observa que en la zona próxima al centro de AB las equipotenciales son casi perpendiculares a la línea AB.

Cuando el subsuelo oculta un cuerpo más conductor o resistivo que el medio que lo rodea la distribución de las equipotenciales se ve perturbada ya que las líneas de corriente serán atraídas o repelidas, según el caso, por ese cuerpo (figura 4.3).

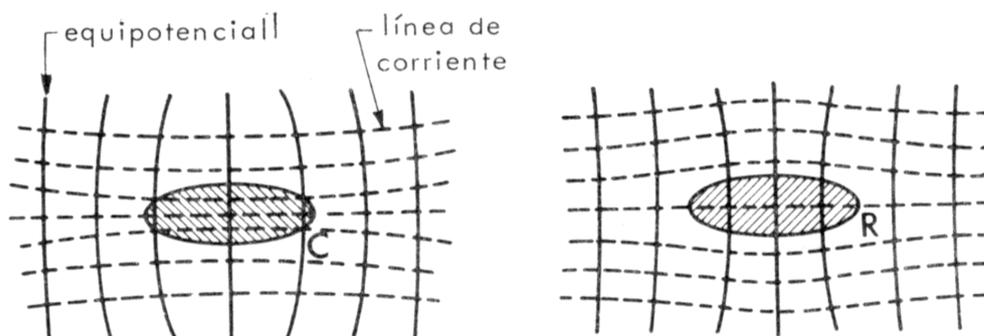


Figura 4.3. Efecto de un cuerpo conductor (C) o resistivo (R) en la distribución de las líneas de corriente y de las equipotenciales. Tomado de Astier, J.L., 1982

4.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE GEOFÍSICA ELÉCTRICA DE RESISTIVIDADES

Cuando se provoca un flujo de corriente eléctrica en el subsuelo mediante la inyección de corriente a través de dos electrodos clavados en la superficie, la distribución del potencial eléctrico generado se ve afectada por las variaciones en la conductividad de las rocas. El dispositivo más usual consiste en clavar dos electrodos en el suelo e introducir por ellos un flujo eléctrico. Sobre otro par de electrodos

intermedios y alineados con los anteriores se mide la diferencia de potencial. Dividiendo el valor de la caída de potencial por el valor de la intensidad de corriente que se inyecta en el terreno se obtiene la resistencia del subsuelo al paso de la corriente eléctrica¹; dicho valor multiplicado por un coeficiente geométrico dependiente de la separación entre los electrodos proporciona la resistividad aparente.

Si el subsuelo fuera homogéneo el valor de resistividad obtenido sería el de la resistividad verdadera, pero como lo normal es que el flujo eléctrico atraviese materiales de distintas características y, por tanto, de conductividad variable, sobre el valor de resistividad obtenido influirán todas las rocas que se atraviesen.

Generalmente se emplea corriente continua y en raras ocasiones corriente alterna de baja frecuencia para mejorar la penetración.

4.3.1 EL FLUJO DE CORRIENTE

Para conocer el comportamiento de un flujo de corriente en el subsuelo y la distribución de su potencial se tendrá que suponer una estructura de suelo. La distribución más sencilla es la de un terreno con resistividad uniforme.

Cuando los electrodos de corriente A y B (separados una distancia AB) inyectan corriente eléctrica en el terreno, la trayectoria de esas líneas de corriente inciden sobre todo el terreno, no sólo bajo el perfil. Durante la inyección, la corriente afecta a todo el terreno en todas las direcciones, pero la máxima densidad de líneas de corriente tiene un recorrido preferente entre los electrodos A y B, cuya trayectoria tiene forma de huso o bulbo bajo la parte superficial del terreno que separa ambos electrodos. Cuando se aumenta la distancia entre los electrodos A y B, también aumenta la profundidad por la que circula la corriente eléctrica, pero disminuyendo su densidad. Entonces puede relacionarse la profundidad de investigación con la separación de electrodos AB.

Las observaciones en superficie provienen del comportamiento eléctrico del subsuelo pero ¿a qué profundidad?. Para Orellana (1982) la mayor densidad de líneas de corriente (el 70,6%) circula por la franja de terreno más superficial que separa los electrodos A y B, y más concretamente a una profundidad siempre inferior a la distancia AB. También apunta que el 50% de la corriente circula a una profundidad inferior a la distancia AB/2. Pero Gasulla (1999) comenta que la profundidad de investigación de una prospección geoelectrica en corriente continua no es sinónimo de profundidad de penetración de la corriente debido a que el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que le atraviesa.

¹ Dicha relación representa la ley de Ohm: $\Delta V / I = R$

Para Roy y Apparao (1971) la profundidad de la investigación viene determinada por la posición de los electrodos inyectoros (A y B) y detectores (M y N), y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Definen así como profundidad de investigación a una pequeña capa de terreno que contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno.

La prueba de que esto es así puede realizarse con una sencilla experiencia, intercambiando la posición de los electrodos de inyección A y B por los electrodos de potencial M y N la distribución de las líneas de corriente cambia, pero la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación no cambian. Para aumentar o disminuir la profundidad de investigación habrá que variar la distancia de separación de esos electrodos. La profundidad de investigación para el dispositivo Schlumberger es el 0,125 de la distancia AB, y para dispositivos Wenner 0,11AB.

La profundidad de investigación es algo mayor para Barker (1989) que propone como profundidades de investigación efectivas para el dispositivo Schlumberger de 0,19 AB, para Wenner 0,17 AB y para dispositivo Dipolo-dipolo 0,25 AB.

Como se ha visto en la figura 4.3, si en la trayectoria de las líneas de corriente a esa profundidad de máxima densidad se interpone un hueco, éstas se ven modificadas al tener que rodearlo, lo que implica una deformación de las líneas de potencial, que son las que se detectan en superficie mediante los electrodos M y N traducido en un incremento de la resistencia. En la figura 4.4 se presenta un esquema ilustrativo.

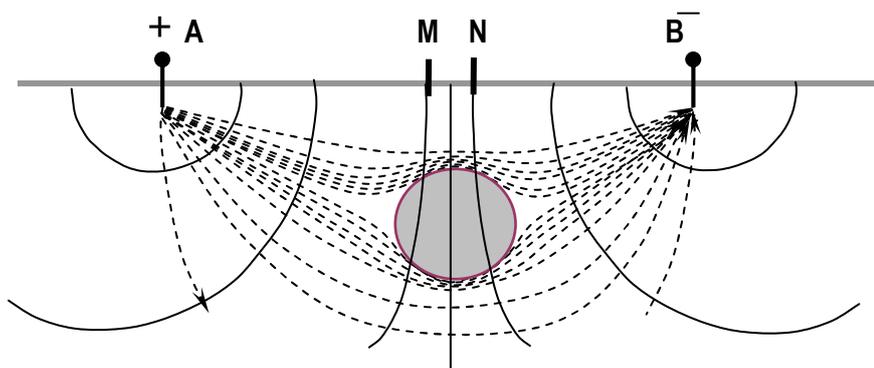


Figura 4.4. Esquema de la trayectoria de líneas de corriente (dibujado en línea discontinua) en una sección de terreno de resistividad homogénea con un cilindro dieléctrico enterrado. Las líneas equipotenciales (dibujado en línea continua) sufren un acercamiento que se detecta en los electrodos M y N.

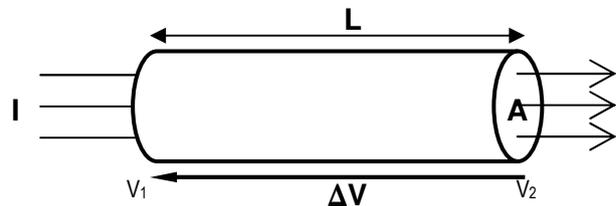
4.3.2 CONCEPTO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La propiedad que tienen los materiales de permitir el paso o “conducir” la corriente eléctrica a su través es el parámetro que se utiliza para distinguir unas rocas de otras, y se denomina conductividad eléctrica (σ). La inversa de la conductividad es la llamada resistividad eléctrica o resistencia específica.

Por lo tanto, se podrá definir como resistividad eléctrica (ρ) de un terreno la dificultad que tiene una corriente eléctrica a pasar por él. Esa resistencia eléctrica depende de la resistividad del material que ocupa el terreno y de su geometría. La resistividad es la resistencia de un cilindro de longitud y sección unidad.

Por lo tanto, la resistividad ρ se define como la resistencia R medida entre dos superficies equipotenciales separadas una distancia L en un conductor lineal de sección A :

$$\rho = R (A / L)$$



siendo: ρ = resistividad; R = resistencia; L =longitud; A =sección
 ΔV = diferencia de potencial entre dos superficies
 I = intensidad de corriente

La unidad de resistividad o resistencia específica, es el ohmio-metro, que corresponde a la de un conductor que, con sección de 1 m^2 y longitud de 1 metro, permite pasar la intensidad de un amperio cuando se aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un voltio.

La conductividad es el inverso de la resistividad: $\sigma = 1 / \rho$; y su unidad es el siemens (S).

La conductividad de las rocas depende de múltiples factores, como la temperatura o presión, pero primordialmente, de las características litológicas de cada roca que determinan la presencia o no de portadores de cargas eléctricas. En función de cuáles sean dichos portadores podemos determinar dos tipos diferentes de conductividad:

Conductividad metálica o electrónica: los electrones son transportados por la misma matriz de la roca, como ocurre con rocas con muy alto contenido en elementos nativos, como estaño, plata, cobre, hierro, oro, etc. o algunos sulfuros poco corrientes, como la ullmanita, sulfuro de Niquel y Antimonio. Los electrones de valencia de los átomos metálicos se pueden mover por la red cristalina del mineral con toda libertad, y al ser abundantes le proporcionan una gran conductividad.

Lógicamente, a mayor contenido en impurezas menor conductividad tendrán estas rocas, y por tanto mayor será su resistividad. Lo mismo ocurre con la temperatura, que es proporcional a la resistividad. Un metal a 25 °C tiene una resistividad de $10^{-8} \Omega \cdot m$, pero ésta aumentará si subimos la temperatura ambiente.

Conductividad electrolítica o iónica: los electrones son transportados por los iones contenidos en el agua que ocupa la porosidad de la roca. Es el tipo de conductividad que presentan la mayor parte de las rocas que, en ausencia de agua, se comportan como aislantes. La conductividad iónica aumenta con el incremento de sales disueltas y por lo tanto con la temperatura. También depende de la naturaleza de esas sales.

El agua de mar tiene una resistividad que varía entre 0,2 y 0,03 ohmios-metro y sin embargo el agua destilada tiene entre 500 y 3000 ohmios-metro, según la exigencia de la destilación.

Entre estos valores se pueden encontrar los de aguas salobres (entre 1 y 100 ohmios-metro), aguas en acuíferos aluviales (entre 10 y 30 ohmios-metro), aguas subterráneas en caliza (entre 20 y 50 ohmios-metro), aguas subterráneas en granito (entre 20 y 100 ohmios-metro) y aguas potables superficiales (entre 20 y 300 ohmios-metro).

Semiconductores: Son muy abundantes los minerales semiconductores, ya que entrarían dentro de este grupo sulfuros, óxidos, telurios y arseniuros. Los más abundantes, los óxidos, son los peores conductores, a excepción del óxido de Hierro 3, llamado magnetita. También abundantes son los sulfuros, como la pirita, la marcasita y la pirrotina (hierro), la galena (plomo), la covellita (cobre), estibina (antimonio), etc., a excepción de la blenda (cinc) y el cinabrio (mercurio), que son malos conductores. Se pueden encontrar otros muy buenos conductores como la krennerita o la calaverita (telurios de oro), o el rejalgal u oropimente (arseniuros de azufre) pero son muy poco abundantes.

Materiales dieléctricos o Aislantes: Aquellos minerales cuyos elementos estén unidos mediante enlace iónico (o heteropolar) o enlace covalente (homopolar) van a tener sus capas electrónicas externas en combinación con otros elementos mediante fuertes atracciones, lo que impedirá que se puedan mover. De este modo se entiende que serán materiales muy resistivos. La gran mayoría de los minerales de la corteza terrestre está compuesta por silicatos, carbonatos y sulfatos, que unen sus elementos mediante estos enlaces.

Ha de quedar claro que la variabilidad mineralógica de una misma roca puede ser amplia y, por lo tanto, el valor de la resistividad para una especie petrológica puede ser amplio y difícilmente se podrá determinar un único valor. Una roca es un sistema compuesto por varias fases minerales, y no afecta únicamente el porcentaje de esos minerales, sino que también influye su textura. Una granodiorita, por ejemplo, repleta de minerales de pirita, si dichos minerales se encuentran aislados entre sí por cuarzo o

feldespato la conductividad será mínima. Por el contrario, el mismo gabra con una textura prolata, con minerales alargados y cuyos sulfuros de hierro se conectan, tendrá una elevada conductividad.

La resistividad de una roca también varía por su estructura. Si hacemos pasar una corriente eléctrica por un conjunto de rocas estratificadas, el valor mínimo de resistividad se alcanza cuando la corriente eléctrica circula paralela a la estratificación y es máximo cuando la corriente circula perpendicular a los estratos.

Podemos concluir por tanto que el terreno, en general, tendrá un comportamiento aislante, con una resistividad muy elevada y que, si se comportara como conductor, dicha conductividad tendría un origen electrolítico o iónico. Los factores principales que incidirán en dicha conductividad serán la porosidad de la roca, la distribución de esta en la roca y la resistividad del agua que rellena los poros, que varía en función del contenido en sales disueltas y por lo tanto de la temperatura.

Si los poros estuvieran acumulados en tubos capilares rectilíneos y paralelos, la resistencia entre las dos caras de un cubo de arista unidad sería:

$$\rho_t = \rho_w / \phi$$

ρ_t = resistividad del terreno
 ρ_w = resistividad del agua
 ϕ = porosidad en tanto por uno

Se comprende que no es posible clasificar los terrenos por la resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua y a su resistividad. Pero sí se puede deducir su porosidad de forma aproximada y, cualitativa y del mismo modo, la calidad del agua que rellena los poros.

Tal y como ha podido verse, una resistividad elevada puede significar dos cosas:
 Escasa porosidad rellena por agua con alto contenido en sales.
 Gran porosidad sin contenido en agua, o con agua sin sales disueltas.

4.3.3 LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS MATERIALES

Si en un terreno se introduce una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que puede asignarse al terreno una resistencia, una capacidad y una inductancia. Si la corriente eléctrica es continua (excluimos los intervalos inicial y final de la apertura y cierre del circuito), la resistencia será un único parámetro.

La variación en la resistividad eléctrica de los distintos materiales que conforman el subsuelo depende de muchos y variados factores, y conviene definir los más influyentes para saber por qué es diferente ese comportamiento geoelectrónico. La naturaleza y composición de las rocas, la textura más o menos alterada o más o menos porosa unida al contenido en fluidos son factores que van a condicionar la existencia de una mayor o menor concentración de iones. Una mayor movilidad de

estos iones tiene como consecuencia una menor resistividad. Por lo tanto, la resistividad de las rocas va a depender, generalmente, de cuatro factores:

De la proporción de volumen de poros frente a volumen total de la roca. A priori, a mayor volumen de poros puede esperarse una menor resistividad, siempre y cuando esos poros no estén vacíos. Si es así (caso de cuevas o galerías), la resistividad debería ser anormalmente alta dado el carácter dieléctrico del aire.

De la disposición geométrica de dichos poros (denominado factor de formación). A mayor conexión de poros, si están rellenos de agua, implica una menor resistividad ya que la movilidad de fluidos y de iones es más fácil. Si están secos, la resistividad es, por el contrario, mayor.

De la proporción de poros rellenos de agua frente a poros secos. A mayor proporción de poros rellenos de agua, la resistividad va a ser mayor pues el agua permite una mayor circulación de la corriente eléctrica que el aire, que es un dieléctrico.

De la resistividad o conductividad de dicha agua. A mayor conductividad del agua, mayor será la de la formación que la contiene.

Los diferentes factores que afectan a la resistividad de una roca se agrupan en la siguiente fórmula de Heiland²:

$$\rho = \frac{F}{v} \cdot \rho_w \quad (4.4)$$

donde,

ρ es la resistividad de la roca impregnada.

ρ_w es la resistividad del agua contenida en la roca.

v es el volumen relativo de huecos (factor de porosidad) que depende de la textura de la roca; Es cero en roca compacta y aumenta con la porosidad.

F factor de formación, que depende de la forma y distribución de los poros.

A esta fórmula habría que añadir un factor de saturación (F_s) que depende de la proporción en que los poros de la roca están rellenos de agua. Esto transformaría la fórmula anterior en la siguiente:

$$\rho = \frac{F}{v} \cdot \rho_w \cdot \frac{1}{F_s} \quad (4.5)$$

² Cantos Figuerola, J., 1989.

En la zona de saturación, por debajo del nivel freático, el F_s es 1 ya que todos los poros están rellenos de agua. En este caso, ambas fórmulas son iguales. Por encima de este nivel, el F_s va a depender de la capacidad de la roca de almacenar agua. Por ejemplo, para las gravas y arenas gruesas es desde 0.01 hasta 0.40 y para rocas capaces de almacenar agua por capilaridad (arcillas), hasta 0.60. El caso extremo es el desierto en una época calurosa, donde F_s vale 0, lo que obliga, en el caso de la prospección eléctrica, a clavar mucho los electrodos en el terreno hasta encontrar un nivel con un grado mínimo de humedad capaz de garantizar el paso de la corriente. Esta actividad se puede complementar con otras actuaciones capaces de mejorar la unión eléctrica con el terreno, como, por ejemplo, el vertido de agua, a ser posible salada, junto a los electrodos, o la colocación de 2 ó 3 electrodos de corriente en cada punto, etc.

Estos aspectos teóricos son los que dan la pauta de comportamiento a los diferentes materiales. La ejecución de una campaña de prospección geoelectrica mediante tomografía permitirá la determinación de diferentes valores de resistividad que, por atribución, permitirá identificar unidades litológicas de distinta naturaleza (arcillas, areniscas, etc.), aspectos estructurales (fallas, contactos) y geomorfológicos (cuevas y rellenos), etc.

En la figura 4.5 puede calcularse la resistividad del agua (ρ_w) en función de su concentración en sales (NaCl) y su temperatura. Como puede verse a mayor cantidad de sales disueltas menor resistividad, y a menor temperatura mayor resistividad. Por ejemplo, si el agua tiene una concentración en NaCl de 1 gr/litro tendrá a 50°C una resistividad de 3 ohm.m, pero a 0°C su resistividad es 9 ohm.m

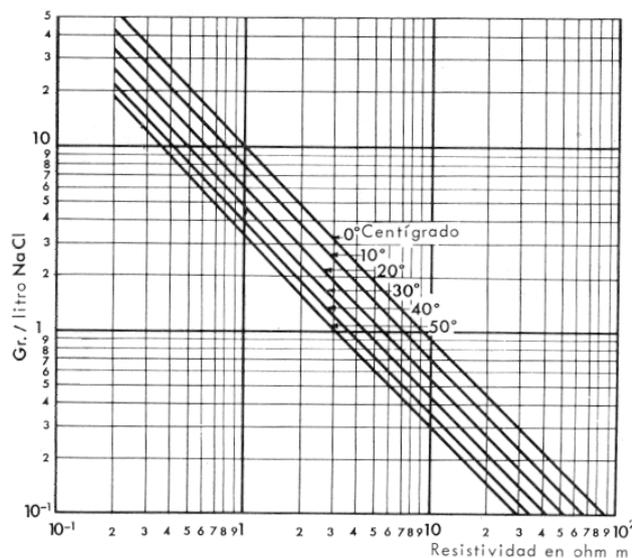


Figura 4.5. Ábaco para determinar la resistividad del agua (en ohm.m) en función de la salinidad (gr/l de NaCl) y su temperatura (grados centígrados). Tomado de Astier, J.L. (1982) pp.60

4.4 RELACIÓN ENTRE LA GEOLOGÍA Y LA RESISTIVIDAD

El resultado de un estudio de las resistividades del terreno va a dar un gráfico con la distribución de la resistividad en el subsuelo; para una correcta interpretación de este gráfico y su interpretación geológica es necesario conocer los valores típicos de los distintos materiales del subsuelo, así como realizar un estudio geológico del área de estudio.

En la primera parte del trabajo, ya se vieron los valores de la resistividad de varios tipos de rocas, sin embargo a continuación se complementa con otra tabla donde se recogen valores de las resistividades de algunas rocas, materiales de suelos y productos químicos.

Material	Resistividad (ohm-m)
Rocas ígneas y metamórficas	
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basalto	$10^3 - 10^6$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$
Rocas sedimentarias	
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
Esquistos	$20 - 2 \times 10^3$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$
Suelos y aguas	
Arcilla	1-100
Aluvión	10-800
Agua dulce	10-100
Agua de mar	0.2
Productos químicos	
Hierro	9.074×10^{-8}
0.01M clorhídrico potásico	0.708
0.01M clorhídrico sódico	0.843
0.01M ácido acético	6.13
Xileno	6.998×10^{16}

Tabla 4.1. Valores de resistividad de algunas rocas, suelos y productos químicos.
Tomado de Loke, M.H. (2000).

Las rocas ígneas y metamórficas, por su elevado grado de compactación, típicamente tienen valores de resistividad elevados. La resistividad de estas rocas es mayor dependiendo del grado de fracturación y del porcentaje de estas fracturas rellenas de agua.

Las rocas sedimentarias, que normalmente son más porosas y tienen mayor contenido de agua, suelen tener valores inferiores de resistividad. Los suelos húmedos y el agua freática dulce tiene valores muy bajos de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen resistividades menores que los suelos arenosos. Sin embargo, hay un rango de valores amplio en los distintos tipos de rocas y suelos. Esto se debe a que la resistividad depende no sólo de la litología sino también de factores como la porosidad, el grado de saturación y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua freática varía de 10 a 100 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ dependiendo de la concentración de sales disueltas. La resistividad del agua del mar es muy baja (0.2 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) gracias a su alto contenido de sal. Por esta razón el método de resistividad es una técnica apropiada para determinar la interfase entre el agua marina y el agua dulce en zonas costeras.

En la tabla se incluyen las resistividades de algunos contaminantes industriales; metales como el hierro con valores muy bajos de resistividad, productos químicos, como el clorhídrico potásico y el clorhídrico sódico, fuerte electrolitos capaces de reducir la resistividad del agua a valores menores de 1 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ incluso para baja concentraciones. El efecto de electrolitos suaves, como el ácido acético, es comparativamente menor. Los hidrocarburos, tales como el xileno, tiene valores muy altos de resistividad.

Los valores de resistividad tienen grandes rangos en comparación con otros parámetros físicos utilizados en otros métodos geofísicos. La resistividad de rocas y suelos en el estudio de un área puede moverse en varios órdenes de magnitud. En comparación, los valores de la densidad usada en el método gravimétrico normalmente varía en factores menores de 2, y la velocidad sísmica usualmente no cambia para factores mayores de 10. Por esta razón, la resistividad y otros métodos eléctricos y electromagnéticos basados en esta propiedad, permiten desarrollar técnicas geofísicas muy versátiles.

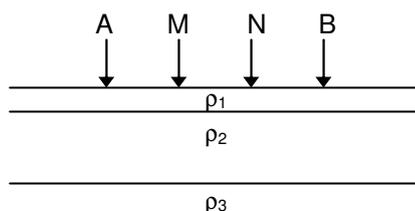
4.5 TIPOS DE PROSPECCIONES GEOELÉCTRICAS

Mediante la prospección geoelectrica lo que se obtiene es una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que, con una correcta interpretación de las mismas, permitirá dar información sobre las estructuras que subyacen en él.

Para interpretar los datos obtenidos durante el trabajo de campo se debe adoptar un modelo de distribución de las resistividades en el subsuelo; los modelos que se puede usar serán:

4.5.1 MODELO 1-D

En este caso se asume que el subsuelo está compuesto por niveles horizontales de extensión ilimitada, por lo que la resistividad sólo cambia con la profundidad pero no en dirección horizontal.



Para realizar los sondeos eléctricos convencionales, el punto central de tetraelectrodo permanece fijo, pero el espaciamiento entre los electrodos se va incrementando para obtener más información sobre las secciones más profundas del subsuelo.

Este método, a pesar de sus limitaciones, ha dado resultados muy valiosos para situaciones geológicas donde el modelo unidimensional es aproximadamente real, como el caso de las superficies freáticas.

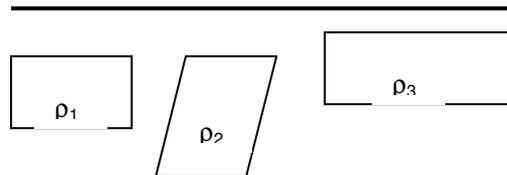
Otra técnica muy usada con este modelo es la calicata, donde el espaciamiento entre electrodos permanece fijo, pero el sistema tetraelectrónico se va moviendo a lo largo de una línea recta. Este procedimiento da información sobre los cambios laterales de resistividad en el terreno, pero no determina los cambios verticales.

La principal limitación de los sondeos eléctricos es que los cambios horizontales o laterales de la resistividad del subsuelo pueden provocar cambios en la resistividad aparente medida, que puede ser interpretada erróneamente como cambios de resistividad con la profundidad. Por esta causa, los sondeo eléctricos no son suficientemente precisos para algunas situaciones, como en muchos estudios

ingenieriles o ambientales, donde la geología del subsuelo es muy compleja y hay grandes contrastes de resistividad en pequeñas distancias.

4.5.2 MODELO 2-D

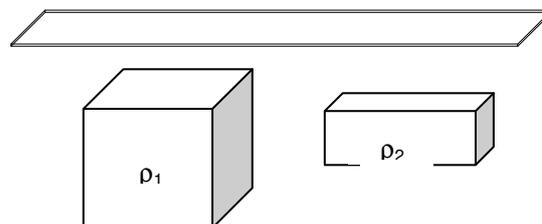
El modelo 1-D, como se ha visto, tiene grandes limitaciones. Un modelo más preciso del subsuelo es el modelo 2-D, donde la resistividad cambia en la dirección vertical y también en la dirección horizontal a lo largo de la línea de estudio.



En este caso, se asume que la resistividad no cambia en dirección perpendicular a la línea de estudio. En muchas situaciones, principalmente para estudios sobre elementos geológicos alargados, esta hipótesis es razonable. En teoría, un estudio y un modelo interpretativo en tres dimensiones es mucho más exacto. Sin embargo, actualmente los estudios en 2-D son los que ofrecen la mejor relación resultados-coste.

4.5.3 MODELO 3-D

Este tipo de modelos ya se están desarrollando ampliamente hoy en día gracias, por un lado, al desarrollo de instrumentos multielectrónicos para realizar los estudios resistivos de campo y, por otro lado, al uso de ordenadores potentes que soporten los programas de inversión para interpretar las mediciones de resistividad aparente (Loke, M.H., 2000).



Ya se han visto los tres modelos que se pueden usar para la toma e interpretación de datos en prospección eléctrica. En base a estos modelos, se han desarrollado distintos métodos de prospección eléctrica, que se dividen generalmente en tres tipos: sondeos eléctricos verticales, calcatas eléctricas y tomografía eléctrica. A continuación se va a hacer un pequeño análisis de cada tipo.

4.6 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES Y CALICATAS ELÉCTRICAS

4.6.1 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

La obtención de resistividades del subsuelo mediante métodos eléctricos "resistivos", en concreto por las técnicas de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) o Calicatas Eléctricas (CE), es una operación ya clásica en la prospección geofísica.

La modalidad de prospección eléctrica mediante Sondeo Eléctrico Vertical consiste en la determinación de un corte vertical geoelectrico, es decir, obtener un corte vertical del terreno formado por puntos de distinta resistividad. Si se representa en una gráfica los valores de resistividad en relación con su profundidad se obtiene una curva de SEV de cuya interpretación se deduce el corte geológico del terreno.

La modalidad de prospección eléctrica mediante Calicatas Eléctricas consiste en la determinación de un corte transversal o lateral del terreno de una serie de puntos situados a la misma profundidad.

Su ejecución consta de los siguientes pasos:

1-Introducción en el terreno, de una corriente continua de Intensidad (I), mediante dos electrodos denominados A y B (electrodos de corriente), conectados a una fuente de energía, Figura 4.6.

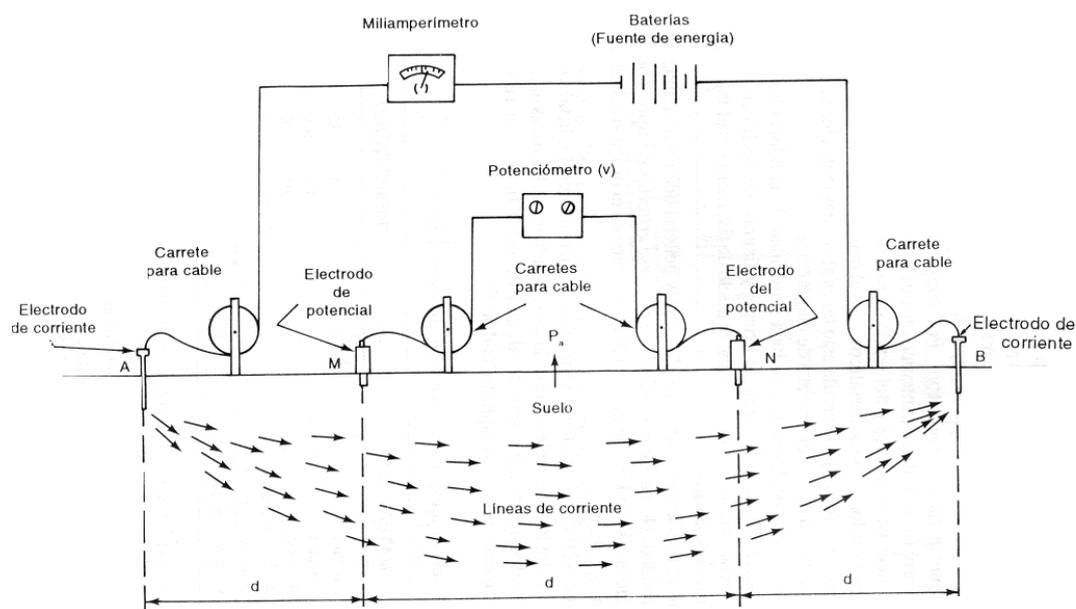


Figura 4.6. Dispositivo para la obtención de resistividades del subsuelo mediante S.E.V y C.E.

Se distinguen en los extremos los electrodos de corriente AB, con su correspondiente amperímetro y carretes de cable, y en el centro los electrodos de potencial MN, conectados al voltímetro (V). Tomado de Ruiz, M.; González, S. (1999). pp. 59

2-Medida de la diferencia de potencial (ΔV), generada por el paso de la corriente, entre dos electrodos denominados M y N (electrodos de potencial).

3-Cálculo de la resistividad del paquete de terreno afectado por el paso de la corriente (resistividad aparente), mediante la siguiente fórmula: $\rho_a = K [V/I]$.

K es una constante de configuración geométrica que depende de las distancias AM, AN, BM, BN.

Entre los muy variados dispositivos que existen para la configuración geométrica de las distancias AM, AN, BM, BN, el más conocido y utilizado es el denominado Dispositivo simétrico Schlumberger (Figura 4.7). En él se distribuyen los cuatro electrodos en línea simétricamente con respecto al punto de medida y, una vez conectados, se emite corriente al terreno y se determina la resistividad.

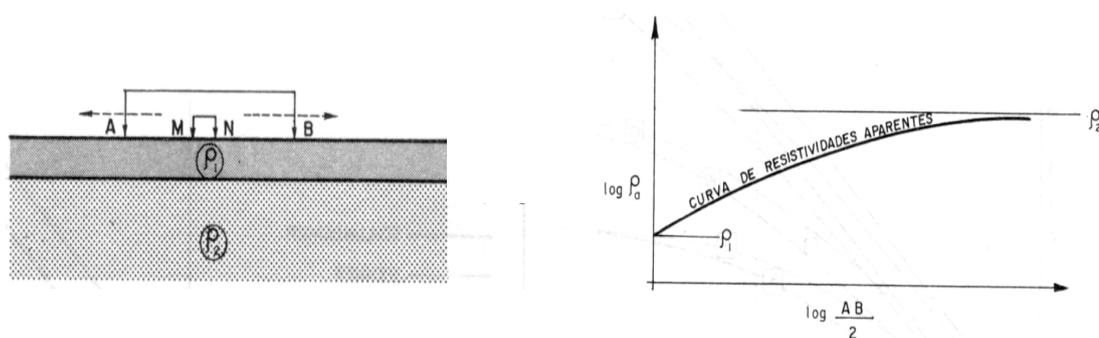


Figura 8. Dispositivo simétrico Schlumberger (izquierda) situado sobre un perfil de terreno de dos capas (y por lo tanto dos resistividades ρ_1 y ρ_2); y representación de la curva de resistividad correspondiente a ese perfil (derecha). Tomado de Custodio, E; Llamas, M.R. (1983). pp.1399

Si sucesivamente se van separando los electrodos de corriente A y B, la corriente afectará cada vez a un conjunto más potente de terreno por debajo de la superficie, y la resistividad aparente calculada será, lógicamente, de conjuntos cada vez más potentes y cuya representación en un gráfico bilogarítmico generará la curva de resistividades cuya morfología va a depender del número de capas en el subsuelo, sus espesores y sus valores de resistividad, en definitiva, de su naturaleza.

Un SEV genera una curva de resistividades que, una vez procesada, constituye una columna de capas del subsuelo caracterizadas por unos espesores y unas resistividades. Las características del objetivo buscado condicionarán la distribución de los SEV en el terreno, bien en perfiles, con una determinada dirección y separación, bien en malla, con una determinada densidad de puntos de medida por superficie. La representación de la resistividad aparente como función de la apertura de alas $AB/2$ (directamente relacionada con la penetración), se hace como se muestra en la figura

4.8 y la forma de la curva, indica cómo varía la resistividad a medida que se profundiza en el terreno.

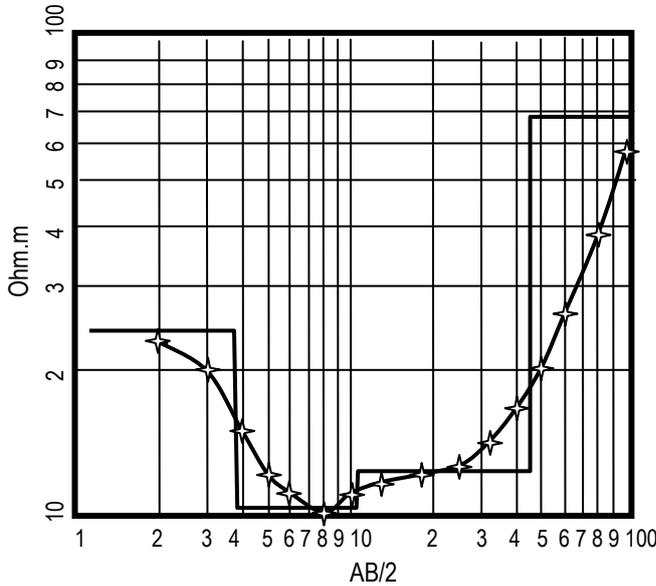


Figura 4.8. Curva de Resistividades.
 Representación de la resistividad aparente ρ_a (ordenadas: ohmios*metro) en relación con la separación de los electrodos A y B (abscisas: AB/2), separación que es proporcional a la profundidad. Cada una de las cruces gruesas representa una medida de resistividad para una profundidad determinada.
 Mediante la interpretación de dichas medidas se deducen cuatro niveles que se corresponden con cuatro capas en el terreno de diferente resistividad:
 Capa 1: de 24 ohmios.metro
 Capa 2: de 10 ohmios.metro
 Capa 3: de 13 ohmios.metro
 Capa 4: de 68 ohmios.metro
 (Tomado de Garbó, A. 1998)

Los múltiples sistemas de interpretación conocidos calculan las resistividades y espesores de cada uno de los niveles individuales que conjuntamente y apilados, producen las resistividades aparentes obtenidas. En la figura 9 se dibujan en línea continua los niveles de distinta resistividad deducidos en la curva de sondeo, indicando el espesor y la profundidad.

	ρ_a (ohmios-m)	AB/2 (m)	Espesor (m)	Profundidad (m)
Capa 1	24	0-3,9	1,95	0-1,95
Capa 2	10	3,9-11	3,55	1,95-5,5
Capa 3	13	11-45	17	5,5-17
Capa 4	68	45-sigue	¿?	17-¿?

*(La profundidad de cada medida de resistividad, es proporcional a la separación de los electrodos AB. En general, la profundidad es $\frac{1}{5}$ ó $\frac{1}{4}$ parte de la separación AB, es decir, aproximadamente la mitad de AB/2).

Si en lugar de separar los electrodos AB, se desplaza lateralmente todo el dispositivo (manteniendo fija esa distancia AB) y se calcula en cada punto la resistividad aparente, se obtendrá la curva de variación de las resistividades, aproximadamente, para un nivel. Esta técnica genera **CALICATAS ELÉCTRICAS**, cuya interpretación es generalmente cualitativa

El procedimiento de medida de la resistividad del suelo consiste en inyectar una corriente I entre el par de electrodos A y B y se mide la tensión ΔV entre el par de electrodos M y N. Si el medio es homogéneo, de resistividad ρ , la diferencia de tensión es (Orellana, 1982):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4.6)$$

donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

donde

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (4.8)$$

K es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos.

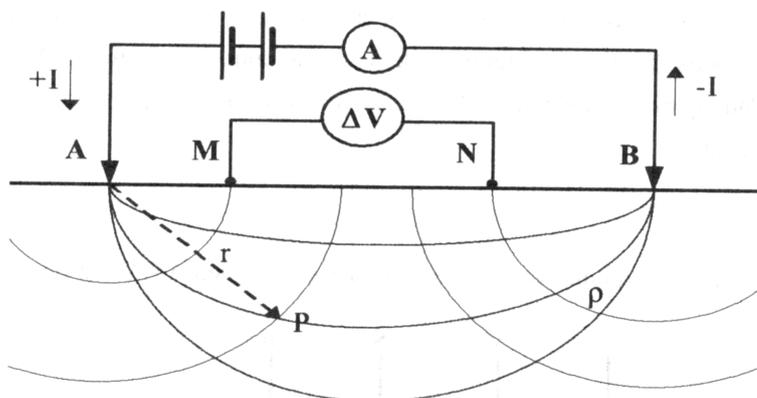


Figura 4.9. Dispositivos tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo. Tomado de Gasulla, M. (1999) pag. 2-5

La resistencia medida ρ es independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección en el caso de que se intercambien. Si se sitúan dos dispositivos tetraelectrónicos lineales (los cuatro electrodos en línea), en los que se intercambian los electrodos de inyección y detección, los factores geométricos correspondientes serán:

$$K_1 = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (4.9)$$

$$K_2 = 2\pi \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \quad (4.10)$$

como las distancias $AM=MA$, $AN=NA$, etc., se obtiene que $K_1=K_2$, y por consiguiente para un medio homogéneo y una misma corriente de inyección, las diferencias de potencial medidas $\Delta V_1= \Delta V_2$ serán iguales, y por tanto la resistividad será la misma. Esta propiedad se conoce como principio de reciprocidad, y se cumple también para medios heterogéneos (Orellana,1982). En la práctica no conviene colocar los electrodos M y N tan separados como suelen estar los A y B, pues al separarlos mucho la medida se puede ver afectada por las corrientes telúricas, parásitos industriales, etc., cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia MN.

Hasta ahora se ha considerado en todos los cálculos que el suelo es homogéneo e isótropo, pero en el caso de que no fuera homogéneo, lo que se obtiene es la resistividad aparente ρ_a , cuyo valor depende además del factor geométrico K, de las resistividades de los diferentes materiales atravesados por la corriente. A partir de la interpretación de las resistividades aparentes medidas en un terreno se podrán extraer conclusiones sobre la composición estructural del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad real del terreno es bastante compleja, y para determinar los valores reales de la resistividad, se realiza una inversión de los valores aparentes a través de un programa informático.

Mediante la formulación que se ha visto hasta ahora se podría calcular la resistividad aparente para cualquier dispositivo tetraeléctrico que se disponga, siempre que se conozca el factor geométrico K, la corriente eléctrica inyectada I entre los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N. A priori se conocen todos los valores, pues el valor de I será el que se considere oportuno introducir en el aparato, la diferencia de potencial se obtiene como resultado de la medida realizada y el factor geométrico sólo es función de la disposición de los electrodos.

Como ya se comentó en el apartado 3.2.1, en el caso de que se invirtiera el dispositivo introduciendo corriente eléctrica continua por los electrodos MN y se midiera la diferencia de potencial entre los electrodos AB, $\Delta V = V_A - V_B$, el valor de la resistividad ρ no variará porque se cumple el principio de reciprocidad (Orellana, E. 1982).

4.6.2 CONCEPTO DE RESISTIVIDAD APARENTE

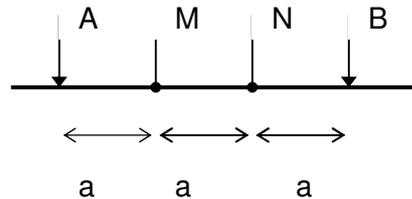
El parámetro ρ definido anteriormente es la resistividad real del subsuelo en el hipotético caso de que fuera homogéneo e isótropo, pero lo habitual es encontrar un terreno estratificado repleto de accidentes geológicos o con variaciones litológicas. Al tomar una medida de resistividad a una determinada profundidad se provoca que la corriente eléctrica que se introduce en el terreno atraviese previamente materiales de zonas más superficiales con otra resistividad diferente. Esto incide en que los valores de ΔV e I varíen y, por lo tanto, el valor de resistividad ρ será un valor aparente, producto de la resistividad media de todas las capas atravesadas. Recibe el nombre de resistividad aparente ρ_a .

4.6.3 DISPOSITIVOS TETRAELECTRÓDICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A continuación se van a analizar los dispositivos tetraelectródicos más utilizados tanto en la prospección mediante SEV como con tomografía eléctrica. (Gasulla, M. 1999).

DISPOSITIVO WENNER

Los dispositivos se sitúan equidistantes sobre una línea en el orden AMNB.

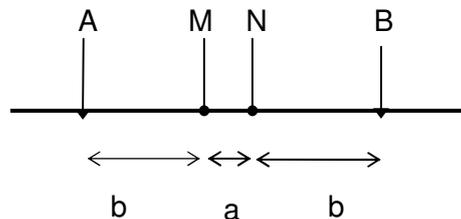


El factor geométrico del dispositivo se deduce con la fórmula (4.8) y es:

$$K = 2\pi a \quad (4.11)$$

DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

Se disponen simétricamente los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia MN es mucho menor que la distancia de los inyectores AB. Generalmente $AB > 5 \cdot MN$.



El coeficiente de forma de esta disposición es:

$$K = \pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (4.12)$$

si se define el valor $L=b+a/2$, el factor queda:

$$K = \pi \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad (4.13)$$

Si la distancia a que separa los dos electrodos M y N tiende a cero, el factor geométrico queda:

$$K = \pi \frac{L^2}{a} \quad (4.14)$$

que tiende a infinito. Sin embargo la resistividad aparente es finita puesto que ΔV decrece al tiempo que decrece “ a ”. Por tanto se tiene:

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \pi \frac{L^2}{a} \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{L^2}{a} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{L^2}{a} E \quad (4.15)$$

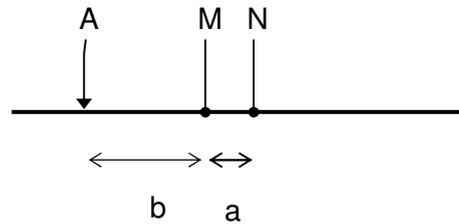
donde E es el campo eléctrico.

La idea de este dispositivo es utilizar una distancia MN muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que se mide realmente es el campo E , el cual en la práctica se toma igual a $\Delta V/a$. El inconveniente de trabajar con el campo eléctrico es que el incremento de tensión disminuye linealmente con la separación “ a ” y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia L . Gasulla (1999) también comenta que la precisión de las mediciones geoelectricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico).

En algunos casos el electrodo B se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de ΔV observado. Este dispositivo se denomina Schlumberger asimétrico o semi-Schlumberger.

DISPOSITIVO POLO-DIPOLO

En este caso el electrodo B de medida se lleva a una distancia muy alejada de los otros tres (en teoría, el infinito).



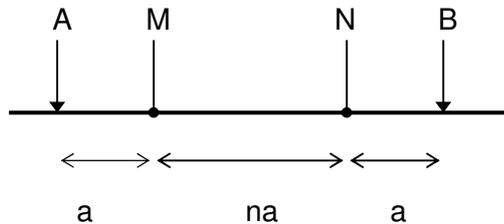
El factor geométrico de este dispositivo es:

$$K = 2\pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (4.16)$$

Si $a \ll b$ este dispositivo es equivalente al semi-Schlumberger. Una variación del dispositivo polo-dipolo se obtiene moviendo uno de los electrodos de medida de potencial a un punto lejano (teóricamente, el infinito). En este caso el factor geométrico es $K = 2\pi b$, que coincide con la expresión del dispositivo Wenner, por lo cual también se denomina half-Wenner.

DISPOSITIVO DOBLE DIPOLO O DIPOLO-DIPOLO

Los electrodos se disponen en el orden ABMN formando un doble dipolo.



El factor geométrico del dispositivo es en este caso:

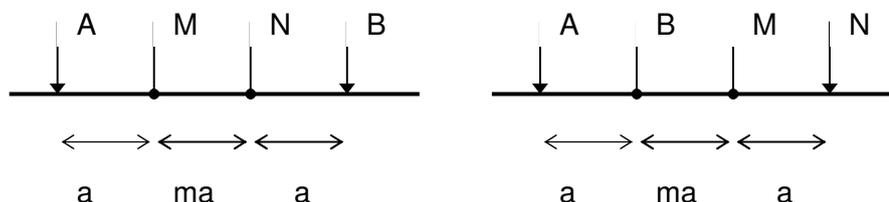
$$K = -\pi n(n+1)(n+2)a \quad (4.17)$$

Este dispositivo se usa generalmente con valores de $n \gg 1$, por tanto AB y MN actúan como un dipolo de corriente y de tensión respectivamente. Se deben usar en este caso detectores más sensibles que en los otros dispositivos, pues el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión. El factor geométrico se puede expresar como:

$$K = -\pi n^3 a \quad (4.18)$$

DISPOSITIVO WENNER α y β

En las figuras siguientes se puede apreciar la disposición de los electrodos en los dispositivos Wenner α y β , respectivamente:



m es un número real positivo.

El dispositivo Wenner y Schlumberger son un caso particular del dispositivos α -Wenner, con $m=1$ y $m \ll 1$ respectivamente. El dispositivo doble dipolo es un caso particular de β -Wenner cuando $m \gg 1$.

DISPOSITIVO SCHLUMBERGER-WENNER

Este es un nuevo dispositivo híbrido entre los dispositivos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha, 1996). Se trata de un dispositivo que utiliza distancias de espaciado entre electrodos mixtas combinando medidas para obtener mejores resultados que los de esos dispositivos por separado. Se basa en la configuración Schlumberger modificada para mejorar su sensibilidad de cara a detectar estructuras horizontales y verticales, donde Wenner presenta buenos resultados, con la ventaja que tiene Schlumberger de alcanzar mayor profundidad de investigación.

4.7 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

4.7.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

La prospección geofísica de resistividades clásica exige un cambio manual de los electrodos (tanto inyectores A y B, como de potencial M y N) en cada medida, y si se desea hacer una investigación 2D con gran detalle el proceso se vuelve muy lento y costoso, ya que su tratamiento sería el de multitud de SEV o CE (subcapítulo 4.6) a lo largo de una misma línea.

La tomografía eléctrica combina un gran número de electrodos con separación equidistante a través de los cuales realiza una adquisición automática de datos de resistividad (Griffiths D.H.; Turnbull J.; Olayinka A.I.,1990)

En su sentido más amplio la Tomografía es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde sondeos.

La Tomografía eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos sondeos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua.

A continuación se presenta la utilidad de esta técnica sobre perfiles desde la superficie del terreno por tratarse de la metodología adecuada para el desarrollo de las líneas de investigación aquí presentadas.

Un factor clave de esta técnica es el número y distribución de las medidas de campo ya que de él depende tanto su resolución como la profundidad de investigación. Como regla general un estudio mediante Tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un pequeño espaciado entre medidas para conseguir la necesaria resolución lateral y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad.

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos.

En este sentido conviene aclarar que la tomografía eléctrica no es comparable a las Calicatas Eléctricas convencionales ya que éstas únicamente proporcionan información cualitativa acerca de la resistividad aparente en unas pocas medidas, mientras que la tomografía eléctrica permite realizar un gran número de medidas de forma rápida que posteriormente son procesadas con algoritmos mediante herramientas informáticas que tras un proceso de iteraciones aproximan la sección medida a un modelo teórico real (Loke, M.H., 1994).

Las medidas de resistividad aparente del terreno para un estudio mediante Tomografía eléctrica se efectúan mediante técnicas de corriente continua con posibilidad de empleo de una gran variedad de dispositivos en lo que a la distribución de los electrodos se refiere.

Combinando adecuadamente resolución lateral y profundidad de investigación la Tomografía eléctrica es sin duda un de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo en un rango muy variable de profundidades.

LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA POR TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Es un método de prospección geoelectrica que se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de un perfil longitudinal, con una separación determinada. Todos estos electrodos se conectan simultáneamente al equipo de medida y, mediante un programa secuencial específico para cada trabajo, el aparato “ordena” cuáles deben ser los conjuntos de cuatro electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición.

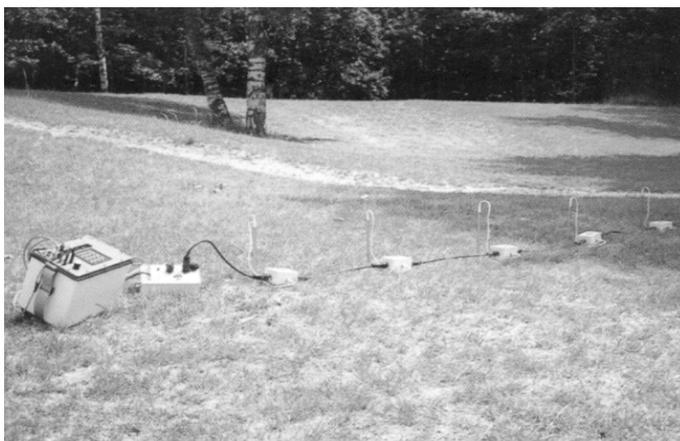


Figura 4.10. Sistema de multi-electrodos conectados a un resistivímetro para la realización de una Tomografía Eléctrica. Fotografía de IRIS Instruments

Se podría decir, con muchas salvedades, que la tomografía eléctrica es una variante actualizada de las **calicatas eléctricas** que, gracias al desarrollo digital de estos aparatos de prospección geofísica, permiten trabajar con todos los electrodos en el terreno, simultáneamente conectados y registrar automáticamente, sin necesidad de hacerlo manualmente (Figura 4.10).

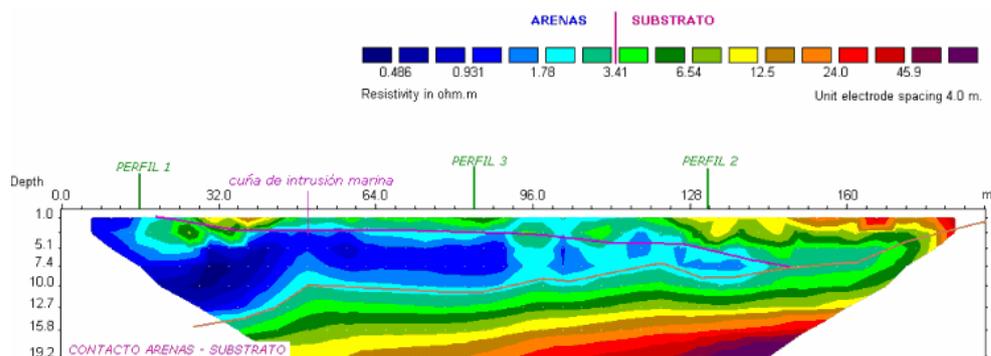


Figura 4.11. Perfil de tomografía eléctrica para la detección de una cuña de intrusión marina en un acuífero costero. Imagen cortesía de Stone Work

Como resultado se obtiene una sección geoelectrica muy expresiva ya que muestra los valores de resistividad de manera continua mediante colores y refleja los cambios de este parámetro con cambios de color más bruscos o más graduales cuanto más neta o más transicional, respectivamente, sea la discontinuidad que manifiestan, lo cual permite una observación bastante clara de los diferentes aspectos del subsuelo: litología, contactos, fracturas, cavidades, calidades de agua, etc. (figura 4.11).

La profundidad de investigación es, como en el caso de los SEV, muy variable: desde menos de un metro hasta varios centenares, lógicamente en éste caso, con el riesgo de mayores influencias laterales de materiales y/o discontinuidades y, consecuentemente, con una, a priori, menor precisión.

4.7.2 ÁMBITOS DE APLICACIÓN

Por su capacidad resolutive al investigar hasta profundidades que pueden llegar a centenares de metros, la Tomografía Eléctrica es aplicable a cualquier estudio del subsuelo donde interese identificar todo tipo de accidentes o discontinuidades que representen un contraste suficiente en la distribución de resistividad del medio rocoso. Entre los objetivos más habituales a resolver mediante esta técnica cabe mencionar los siguientes:

- Detección y caracterización de fallas determinando su zona de influencia, rumbo, buzamiento y extensión en profundidad.
- Detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza, determinando la morfología y localización precisa de tales discontinuidades.
- Determinación de la naturaleza de las diferentes litologías del subsuelo a raíz de su comportamiento resistivo ante el paso de la corriente eléctrica.
- Detección y caracterización de accidentes kársticos tales como cavidades, rellenos arcillosos, etc.

Mediante los ejemplos que se presentan en el anexo I se pretende ofrecer una visión general de la capacidad resolutive y de las enormes posibilidades de aplicación de la Tomografía eléctrica en diversos medios geológicos y con diversa problemática muy común en el ámbito de la Geotecnia, de la Hidrogeología o de la prospección geológica.

4.7.3 ANTECEDENTES. ALGUNOS TRABAJOS PRÁCTICOS

4.7.3.1 INTRODUCCIÓN

La tomografía eléctrica es, probablemente, el método de prospección geofísica más versátil a la hora de realizar análisis del subsuelo dado que permite trabajar en profundidades muy variables y abordar múltiples objetivos como, entre otros, localizar fracturas, diferenciar rocas sanas de alteradas, así como identificar canalizaciones, galerías y cavidades bajo superficie.

Mediante una serie de ejemplos que se exponen a continuación se podrá tener, a nivel de introducción a la herramienta, una visión general de la capacidad resolutoria y de las posibilidades de aplicación de la tomografía eléctrica en diversos medios geológicos y con diversa problemática muy común en el ámbito de la Geotecnia, la Hidrogeología o la Arqueología.

El empleo de la tomografía, al igual que otros métodos de prospección geofísica, puede ser muy efectiva o puede resultar inútil dependiendo de varios factores. Es fundamental la correcta planificación del estudio, basándose en una buena definición del problema a resolver. También es necesario el empleo de la instrumentación adecuada para obtener y procesar de forma económica el gran volumen de datos que las campañas de tomografía requieren. Por último la ejecución de los estudios por parte de personal experto, tanto en las medidas de campo como en su posterior procesamiento e interpretación. El riesgo de los procesos semiautomáticos en la aplicación de los métodos geofísicos es que pueden llevar a resultados erróneos desde el punto de vista geológico aunque sean correctos matemáticamente.

Son tres los casos prácticos que se van a analizar. En todos ellos se utiliza la tomografía eléctrica resistiva como una herramienta de trabajo para la investigación, pero no como única herramienta como se va a ver, pues se complementa con la utilización de otros métodos geofísicos o la realización de prospecciones mecánicas, como sondeos, catas, penetrómetros o la información obtenida por otros estudios o procedimientos. Se han seleccionado estos ejemplos porque en ellos se incluyen aspectos muy relacionados tanto con la utilización práctica de la tomografía eléctrica como con la aplicación arqueológica de esta tesis. Si bien no tratan el problema directo de la detección de huecos sí inciden de forma especial en la localización de contactos, tipos de relleno o diversos comportamientos geoeléctricos del subsuelo. Los trabajos que se incluyen son: 1- Aplicación de la tomografía eléctrica para identificar discontinuidades en el terreno. 2- Los deslizamientos de tierras. Investigación de la contaminación de aguas subterráneas en zonas de vertederos usando métodos eléctricos y electromagnéticos. 3- Imágenes geofísicas dentro de estructuras de sillería.

4.7.3.2 APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA IDENTIFICAR DISCONTINUIDADES EN EL TERRENO. LOS DESLIZAMIENTOS DE TIERRAS

En este estudio se analiza la aplicación de los métodos de tomografía eléctrica resistiva para la investigación de discontinuidades en el subsuelo. Las discontinuidades que pueden detectarse son aquéllas que marcan una ruptura en la homogeneidad (o cierta homogeneidad) del subsuelo. Por lo tanto, fracturas, cavidades, galerías, etc podrían considerarse discontinuidades pues es la anomalía que marcan la que permite identificar su presencia e, incluso, interpretar su origen.

En este caso se recoge el estudio realizado por Bataneh y Al-Diabat (2002) del Natural Resources Authority de Amman, con respecto a un deslizamiento que se produjo en una autovía de Jordania, entre Amán y el Mar Muerto, donde se movilizaron unos 1000 m³ de roca que provocaron el cierre de la carretera. El deslizamiento se produjo a lo largo de dos planos principales de falla, después de un periodo de lluvias intensas, donde la roca estaba formada por una sucesión de niveles de pizarras, margas y calizas margosas, que se encontraban plegados, inclinados y fracturados.

Se realizaron tres perfiles de tomografía eléctrica a lo largo del eje de la ladera para determinar los riesgos de deslizamiento, así como áreas potencialmente inestables. Los resultados que se obtuvieron se basaron en la inversión 2-D de los datos de campo, con los cuales se pudo definir la zona de las pizarras y su profundidad, caracterizadas por un valor bajo de la resistividad. Se ha demostrado que la ruptura se inició en el contacto entre la masa pizarrosa y la caliza masiva.

Introducción

La autovía donde se produjo el desprendimiento fue construida hace unos 10 años. Su trazado discurre a través de las tierras montañosas del oeste de Jordania (Figura 4.12). Está enmarcada dentro de una importante ruta de transporte nacional, porque une la ciudad de Amán con el Mar Muerto, y se dirige a la frontera con Palestina. Debido a lo accidentado que es el terreno por esta zona del puerto de Al Adaseih, las excavaciones para encajar el trazado fueron numerosas y variadas.

Durante los meses de invierno se produjo una rotura de rocas y que afectó a la carretera, cerca de Al Adaseih. El fenómeno ocurrió repentinamente después de un periodo de abundante lluvias intensas; afortunadamente el hecho sólo causó daños materiales. La carretera se cerró por el posible riesgo de más desprendimientos que pudiera afectar al tránsito de vehículos.

En Al Adaseih, el corte de la ladera era de unos 120 m de alto y una inclinación de unos 22°. Al principio, la zona activa del deslizamiento se encontraba en la zona de la

carretera que iba en dirección NNW-SSE. Observaciones de campo mostraban claramente que el deslizamiento es profundo y se inició en el contacto entre la caliza masiva y la pizarra negra. La masa deslizada llegó a espesores máximos de unos 20 m. Todos los edificios y granjas que había al pie de la masa deslizada y en el lado oeste, estaban amenazados por la repetición de nuevos deslizamientos, por lo cual se debía fijar y localizar este riesgo.

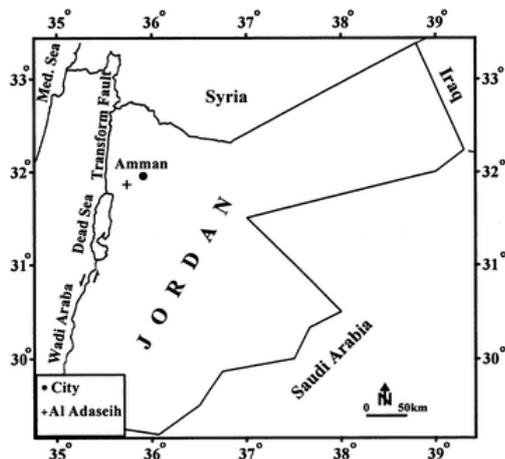


Figura 4.12. Localización del deslizamiento de Al Adaseih en Jordania. Tomado de Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

Disposición geológica de la zona

La masa de roca estudiada estaba formada por una sucesión de niveles de pizarras, margas y calizas margosas de la edad del Cenomaniense e inclinada ligeramente (25° - 35°) al NE. Esto es equivalente, en la secuencia superior, a las formaciones Fuheis/Hummar/Shueib del Grupo Ajlun (Figura 4.13). Estas son consideradas unidades de alto riesgo de deslizamiento en Jordania. La formación superior del Wadi Es Sir del Grupo de Turoniense y Belqa del manto subyacente aflora en las colinas cercanas, pero no está expuestas a las excavaciones de la carretera.

En el centro de Jordania y localmente en el área de estudio, las formaciones Fuheis/Hummar/Shueib tienen unos 75 m de espesor y muestran amplios cambios laterales y verticales en litología y espesor, debido a los cambios de facies. Estas secuencias forman un quiebro en la morfología de la ladera entre el horizonte masivo, que forma la parte superior de la formación Na'ur, y la formación Wadi Es Sir del nivel superior. Estas formaciones están cortadas por dos fallas principales dirigidas en dirección E-W. El deslizamiento ocurre a lo largo de estas dos fallas, buzando hacia la cara de la ladera y orientado 22° con respecto de la dirección de la ladera. La masa rocosa estaba cortada principalmente por un conjunto de fracturas muy inclinadas y cerradas; estas fracturas abren juntas que debilitan la masa rocosa, formando bloques y permitiendo la entrada de agua, particularmente después de las intensas lluvias, que reduce mucho la fricción a lo largo de las discontinuidades.

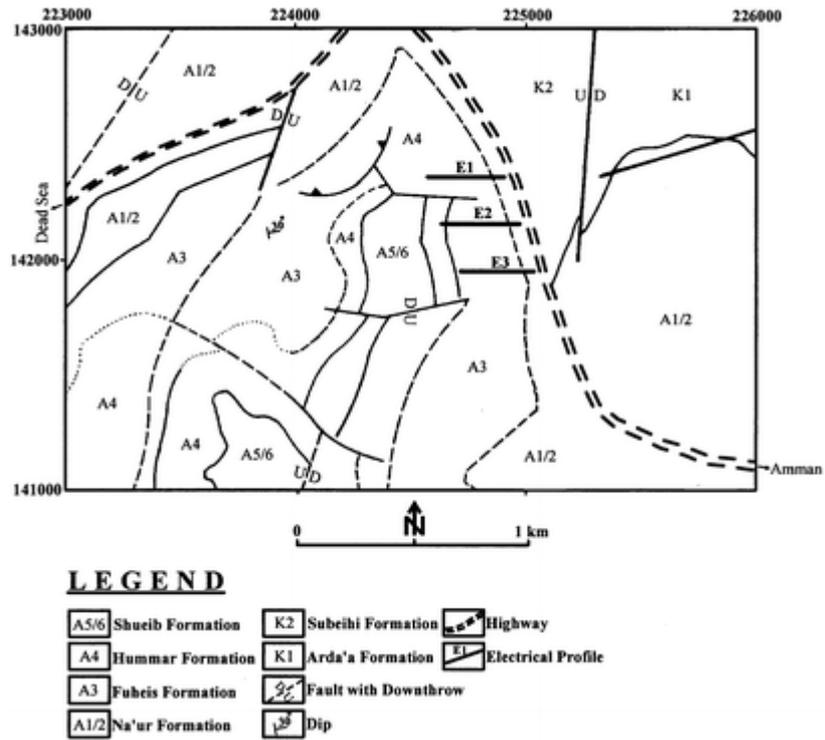


Figura 4.13. Mapa geológico de la zona de estudio. Según McDonald 1965 en Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

La figura 4.14 muestra una sección en dirección E-W de la topografía a través del deslizamiento de Al Adaseih. La sección fue realizada para comparar la topografía inicial, deducida del mapa topográfico, y la topografía después del deslizamiento y de los trabajos de excavación.

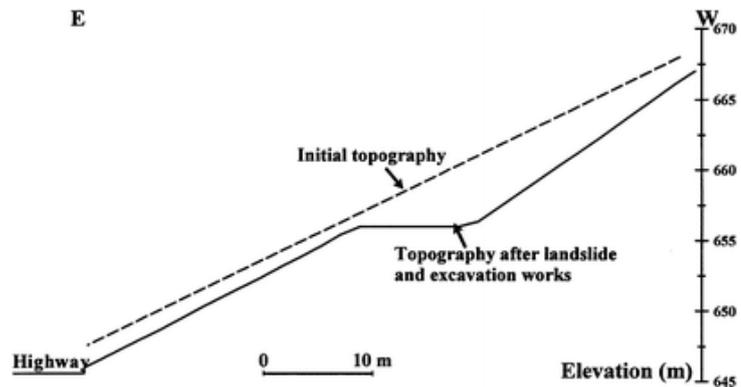


Figura 4.14. Sección topográfica a través del deslizamiento después de producirse y de los trabajos de excavación. Tomado de Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

Prospección eléctrica

Dahlin y Loke han demostrado cómo las técnicas de inversión en dos dimensiones están incrementando su uso para, de forma más común y frecuente, valorar la

resolución obtenida y determinar las limitaciones de los datos obtenidos. Se realizaron tres perfiles eléctricos (E1, E2 y E3) espaciados 200 m (ver figura 4.13), midiendo a lo largo del eje del deslizamiento. Se usó el equipo de tomografía eléctrica resistiva SYSCAL-R2 (IRIS Instruments, Francia) con una configuración Wenner y con 32 electrodos espaciados 2 m.

La imagen que resulta del perfil eléctrico E1 (figura 4.15), con una profundidad de penetración de unos 11 metros, muestra que la resistividad cambia con la profundidad entre 3 y 40 ohm·m, que son valores típicos de los sedimentos pizarrosos. Estudios eléctricos han permitido distinguir tres niveles en el talud. El primero, el nivel superior (20-40 ohm·m) está compuesto por depósitos relativamente secos correspondientes al cuerpo deslizado. El segundo nivel, la parte principal de la masa deslizada, está caracterizado por un incremento del contenido de humedad y, consecuentemente, por una resistividad reducida de 3-10 ohm·m. El terreno del nivel inferior (15-30 ohm·m) corresponde a la roca esquistosa intacta que supone la base del deslizamiento. Se han medido una zona de altas resistividades (en torno a 300 ohm·m) cerca de la superficie, localizado superficialmente entre 48-60 metros, donde se observó la presencia de calizas masivas. Estos resultados muestran que la resistividad también puede ser usada para localizar zonas de calizas masivas. Además, una mancha de alta resistividad (de 150 a 250 ohm·m) se puede observar al pie de la ladera, lo cual se debe a la presencia de cantos rodados calizos, como ya evidenciaba el estudio geológico.

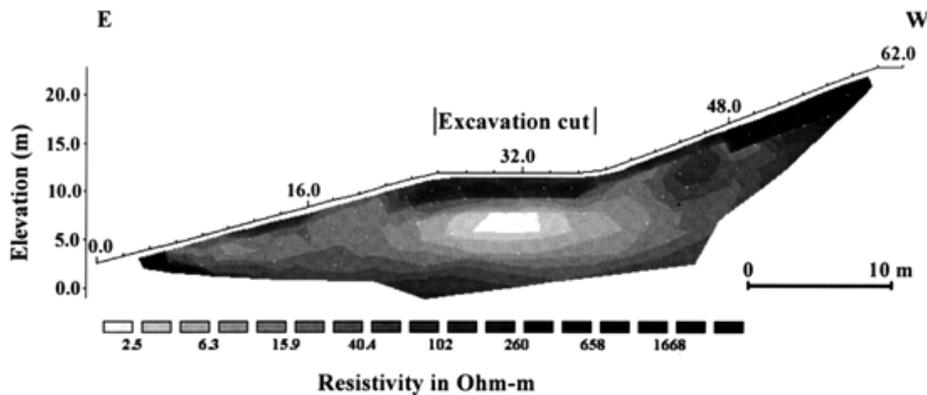


Figura 4.15. Sección del perfil de tomografía eléctrica E1. Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

El modelo de resistividad muestra que el porcentaje de incertidumbre ρ incrementa con la profundidad; desde menos de 5% en los primeros metros a 45% a la profundidad de 11 m. Estos valores son bajos en comparación con los resultados de variación de la resistividad de las pizarras y las calizas duras.

El modelo de la sección del perfil eléctrico E2 (figura 4.16) muestra valores bajos de resistividad (de 4 a 40 ohm·m) caracterizado por esquistos negros localizados sobre

los 24-60 m en superficie. Se pueden diferenciar 3 capas en la sección: la capa superior (20-40 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) correspondiente al cuerpo deslizado, la capa intermedia (4-10 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) correspondientes a la zona deslizada, y el nivel inferior (20-30 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) correspondientes a la pizarra imperturbada, que es la base del deslizamiento. Se observa una zona de alta resistividad (250-500 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) al pie de la ladera con un espesor de 8 m, y se debe a la existencia de zonas profundas con calizas masivas. Estos resultados sugieren que el deslizamiento es activo en el lado este y, por tanto, la carretera al pie de la ladera este tiene gran riesgo de producirse deslizamientos en el futuro.

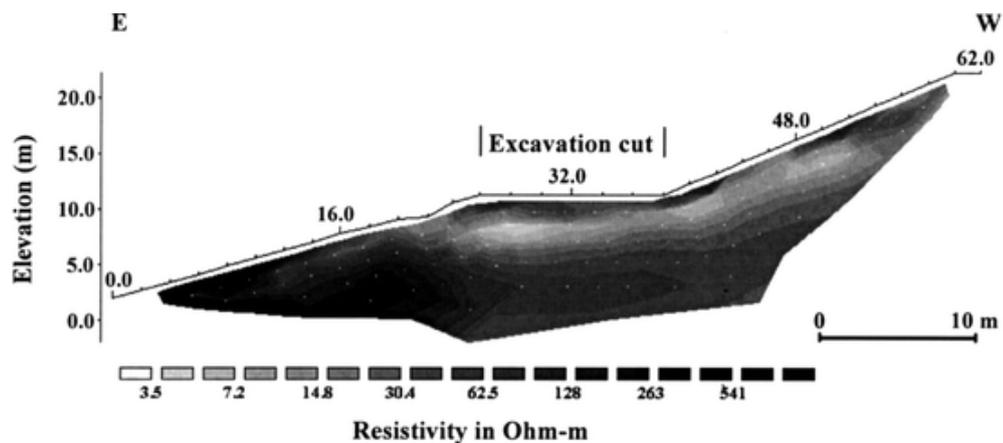


Figura 4.16. Sección del perfil de tomografía eléctrica E2. Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

La figura 4.17 muestra el modelo de sección para el perfil eléctrico E3. Las anomalías obtenidas muestran zonas de baja resistividad (4-40 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) en la mayor parte de la pseudosección, que pueden caracterizar los esquistos negros sedimentados. El modelo de sección del perfil E3 muestra un resultado similar al obtenido en los perfiles E1 y E2, donde se diferenciaban tres niveles con distintas propiedades. La capa superior está compuesta de depósitos del deslizamiento relativamente secos (20-40 $\text{ohm}\cdot\text{m}$), correspondientes al cuerpo del deslizamiento. El segundo nivel, que supone la parte principal de la masa deslizada, caracterizada por un incremento del contenido de humedad y por consiguiente una resistividad reducida 3-10 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. El nivel inferior (15-30 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) correspondiente a rocas esquistosas intactas, que son la base del deslizamiento. Se localiza un punto de alta resistividad, más de 200 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, entre los 20-27 m en superficie, que se debe a la presencia de cantos rodados de caliza.

Conclusiones

El caso presentado aquí ilustra que la tomografía eléctrica puede ser de gran utilidad para el estudio de deslizamientos y determinación de riesgos. En Al Adaseih la tomografía eléctrica permitió obtener imágenes 2-D que mostraban la distribución de resistividades hasta los 11 m de profundidad a lo largo de la zona deslizada. Las

imágenes geoelectricas han mostrado que los sedimentos pizarrosos a lo largo de esta cara del desmonte tienen espesores superiores a los 11 m. Además, la resistividad es un buen parámetro físico para distinguir entre la pizarra negra y los materiales intactos, lo cual permite localizar zonas de riesgo de potencial de deslizamientos. Combinando las imágenes resistivas con datos estructurales, se obtienen potentes herramientas para delimitar el volumen potencialmente inestable y definir las medidas para estabilizar las laderas.

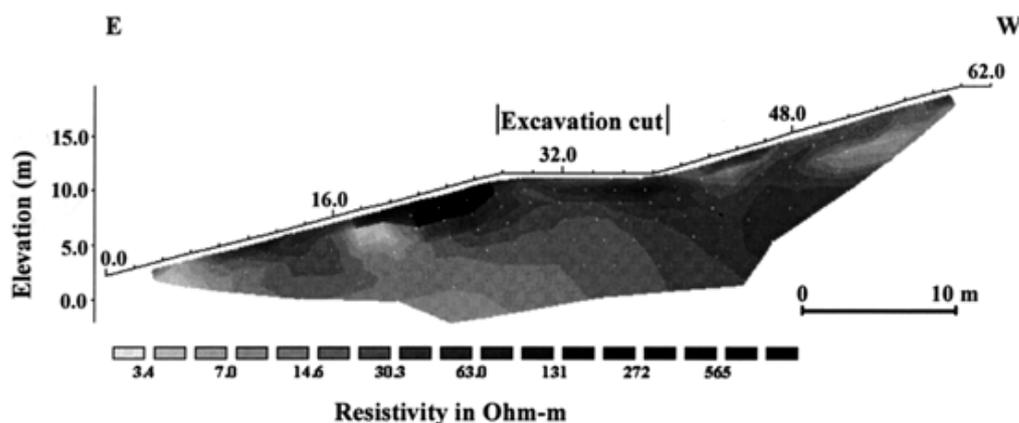


Figura 4.17. Sección del perfil de tomografía eléctrica E3. Batayneh, A.T.; Al-Diabal, A.A., 2002.

Este estudio demuestra la aplicabilidad y buenos resultados que pueden obtenerse mediante la tomografía eléctrica para identificar discontinuidades en el subsuelo. Aquí, la discontinuidad la forma el plano inclinado pero con cierta extensión y a una profundidad relativamente escasa. Estas razones han permitido que, aunque con una separación de 2 m entre electrodos, se puede identificar y localizar el objeto.

4.7.3.3. INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE VERTEDEROS USANDO MÉTODOS ELÉCTRICOS Y ELECTROMAGNÉTICOS

Los métodos geofísicos, cuando se complementan con métodos químicos e hidrogeológicos, pueden usarse en la investigación de la contaminación de aguas subterráneas. Se describe aquí el estudio de un vertedero en la ciudad de Esparta (Turquía) realizado por Karlik y Kaya (2001). Se realizaron sondeos geoelectricos resistivos en corriente continua y datos electromagnéticos de muy baja frecuencia (VLM-EM). En este caso el nivel freático estaba a poca profundidad en el aluvial, y era muy posible que se produjera una peligrosa contaminación del agua subterránea por debajo y alrededor del vertedero, en el cual se depositaban residuos urbanos e industriales de manera incontrolada.

El estudio consiguió definir la extensión de la contaminación dentro de las aguas subterráneas usando el método electromagnético (VLM-EM), que obtenía un gran volumen de datos de manera rápida y económica. Este método completó la información dada por los sondeos geoelectrónicos (Karlik, G.; Kaya, M.A., 2001). Había buena correlación entre los resultados de los dos métodos empleados en la investigación, donde estudios químicos e hidrogeológicos del suelo previamente realizados ya indicaban altos niveles de concentraciones químicas.

Introducción

Esparta se considera una de las principales áreas de almacenamiento de aguas subterráneas en Turquía, por ello ya se han venido realizando estudios geológicos e hidrogeológicos en esta zona, los cuales han aportado resultados sobre la extensión de la contaminación en las aguas subterráneas.

Se ha estimado que aproximadamente dos tercios de los acuíferos de aluvial de la región están ya contaminados en cierta extensión, y las zonas más críticas se encuentran alrededor de Esparta y el aluvial al Este de la ciudad. En estas áreas, la fuente de contaminación más peligrosa son los sistemas de aguas sucias de la ciudad y el vertedero, donde residuos urbanos e industriales son vertidos incontroladamente. El vertedero está situado sobre un aluvial muy permeable, y no tiene sistemas de revestimiento ni de filtrado. Análisis realizados a esa agua demuestran que algunos componentes superan los valores admisibles para el agua de consumo según los niveles permisibles dados por la Organización Nacional de la Salud.

El principal objetivo de este estudio fue definir la extensión de la contaminación inducida por el vertedero y en consecuencia, seleccionar zonas donde disponer futuras barreras para contener la contaminación. Se utilizaron los métodos de resistividad eléctrica por corriente continua y métodos electromagnéticos para completar los estudios geológicos y hidrogeológicos antes mencionados. Además se realizó una investigación química del suelo, tomando muestras de suelo a varias profundidades (0-0.24 m) en 11 fosos en la esquina norte del vertedero para obtener información adicional sobre los contaminantes en la zona no saturada. Los métodos eléctricos y electromagnéticos fueron ampliamente usados para investigar los problemas de contaminación del agua subterránea, porque el contenido de sólido disuelto es directamente proporcional a la conductividad eléctrica y resistiva.

Descripción de la zona de estudio

El vertedero está situado sobre depósitos aluviales del Cuaternario de unos 100 m de espesor, compuesto por gravas, arenas y arcillas. Estos depósitos son la principal unidad acuífera de la región. Además del aluvial, hay otros dos acuíferos en la zona, uno en arcillas y otro en unas tobas volcánicas. En la figura 4.18 se puede ver el mapa geológico de la zona y el mapa de isohipsas del agua subterránea, que se ha podido

obtener mediante la toma de medidas en numerosos pozos de la zona (los pozos se marcan en el mapa). La figura 4.18 también muestra una sección con los niveles geológicos bajo el vertedero.

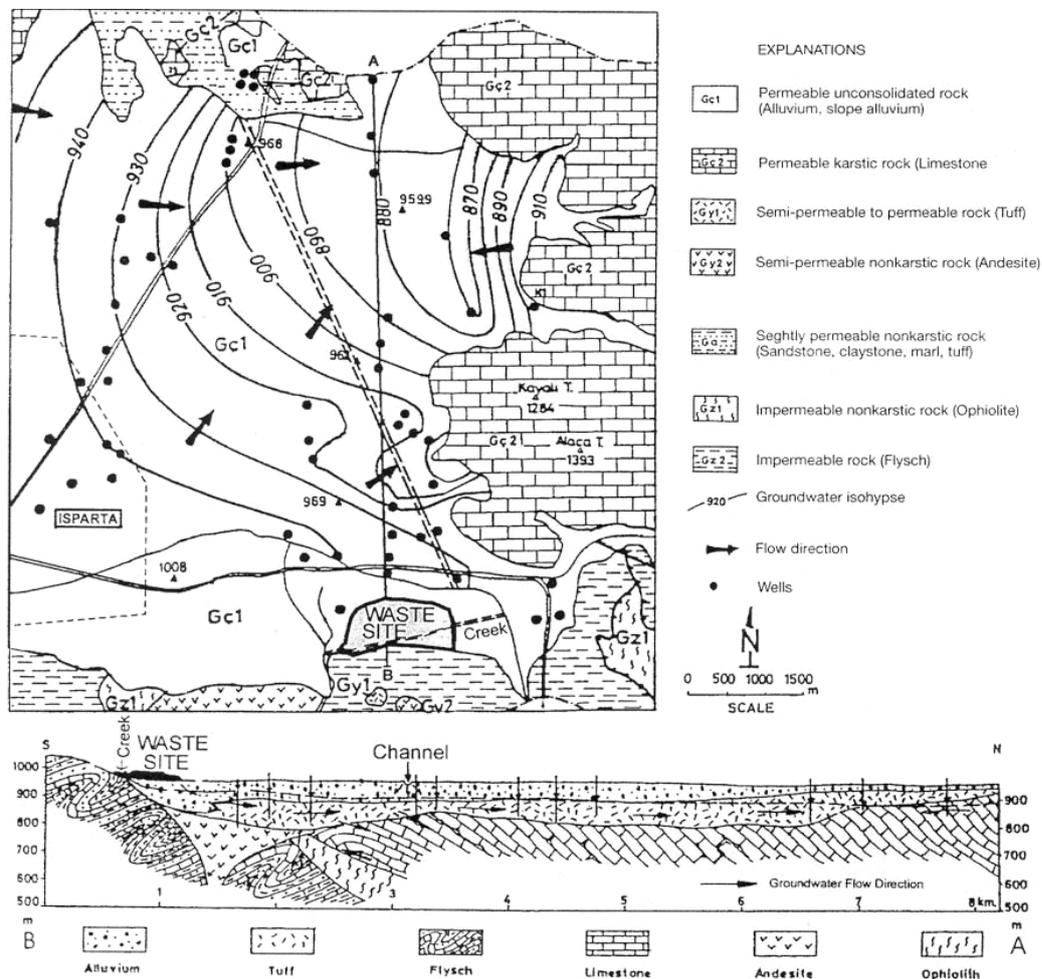


Figura 4.18. Mapa geológico y sección transversal de la zona investigada. Tomado de Karlik y Kaya (2001)

El vertedero es un lugar abierto al sureste de la ciudad de Esparta (figura 4.18), y se está expandiendo continuamente hacia los alrededores y en altura. Un arroyo que se utiliza para regadío, atraviesa el vertedero, y está en contacto directo con la basura, por ello este arroyo está siendo fuertemente contaminado, y en consecuencia el acuífero que él también recarga. A pesar de la intensa contaminación a la que es sometido el acuífero, tanto por este arroyo como por otros cauces próximos y por canales de aguas sucias, no se está tomando ninguna medida para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas ni en los alrededores ni en el propio vertedero.

Investigaciones geofísicas

Los estudios geofísicos se realizaron a lo largo de 11 perfiles atravesando el área con una separación de 40 m entre cada perfil, como se puede ver en la figura 4.19. Los perfiles de resistividad eléctrica se realizaron usando una disposición Schlumberger con una separación media que variaba de 0.5 a 30 m; se llegó a una profundidad de unos 25 m.

Para la adquisición de las medidas electromagnéticas se utilizó un equipo Scintrex ENVI; se pudo observar como utilizando una frecuencia de 16 kHz se alcanzaron profundidades de unos 20 m para entornos conductores (30 ohm·m), y hasta 50 m para una base de 150 ohm·m. Se realizaron tres campañas de mediciones con este equipo, cada conjunto de medidas se realizó con una separación de la estación de 5 metros, y en cubriendo los mismos perfiles. Además, tras repetir las medidas, se pudo comprobar que la instrumentación electromagnética es muy precisa y fiable.

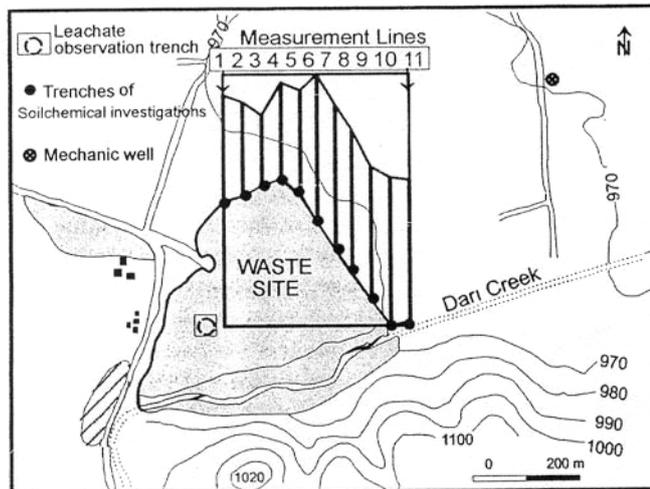


Figura 4.19. Localización de los perfiles geofísicos realizados en el vertedero. Tomado de Karlik y Kaya (2001)

Inicialmente había expectación sobre la buena correlación de los resultados obtenidos con el método electromagnético y los resultados del método eléctrico, ya que en ambos la pluma de contaminación como una zona de baja resistividad.

Resultados de los sondeos geoelectricos

En la figura 4.20 se muestran los mapas de superficie de resistividad aparente obtenidos de los sondeos geoelectricos verticales de resistividad en corriente continua para diferentes espaciamentos de electrodo. El mapa de superficie superior, para un espaciado de 0.5 m se caracteriza por altos valores de resistividad, los cuales se considera que han debido ser causados por un nivel de gravas gruesas y probablemente por un material de origen hidrocarbonatado visible en superficie.

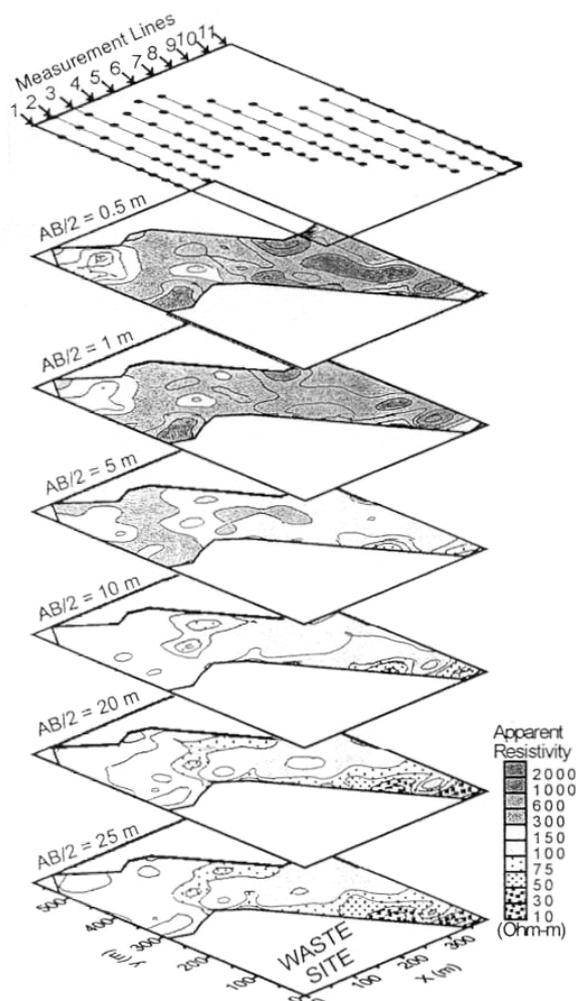


Figura 4.20. Línea de medida realizadas en el vertedero y mapas superficiales de la resistividad aparente para separación de electrodos de 0.5,1,5,10,20 y 25 m. Tomado de Karlik y Kaya (2001)

En las primeras estaciones de las líneas 4 ,8 ,9 ,10 y 11 se muestran valores relativamente bajos de resistividad, resultados acordes con los obtenidos en la investigación química del suelo. La investigación química de suelo no analiza completamente la contaminación en la zona no saturada, que es más compleja y será objeto de futuras investigaciones.

Los mapas de resistividad aparente para espaciamentos de 1 a 5 m no son muy diferentes del mapa para espaciamento de 0.5 m, que muestra las pequeñas variaciones laterales de resistividad en la zona no saturada, tal como se esperaba. En el mapa con espaciamentos de 10 a 25 m, la zona de baja resistividad, observada en el norte y esquina noreste del vertedero, corresponde a la contaminación de las aguas subterráneas debido a la basura. Además, el arco de contaminación visible en la superficie, se refleja claramente al este de la línea 4 (zona media) como una zona de

baja resistividad dónde el arco efecto parece continuar en profundidad y siguiendo la dirección de la circulación de las aguas subterráneas.

En la figura 4.21 se muestra una sección esquemática que atraviesa de sur a norte la zona de estudio. El área sombreada representa la filtración de fondo del vertedero y la pseudosección de la resistividad aparente observada a lo largo de la línea 9 (arriba) está en la esquina norte del vertedero. Los valores de resistividad observados son inferiores a 30 ohm·m, especialmente en los perfiles de la esquina noreste del vertedero. Se produce un descenso drástico de los valores de resistividad de 1000 ohm·m en la superficie a 30 ohm·m a cierta profundidad, que sólo puede ser explicado por la contaminación de las aguas subterráneas, que ya se sabía que ocurría, gracias a los estudios previos hidrogeológicos de la zona.

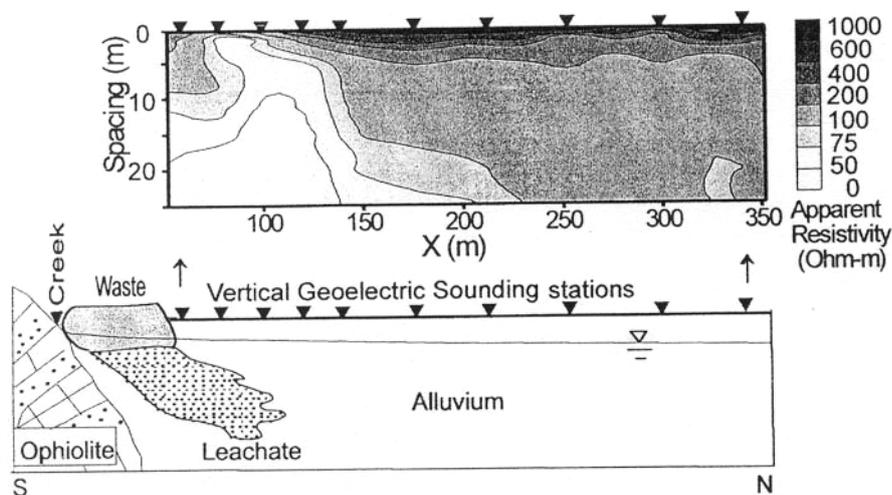


Figura 4.21. Pseudosección de la resistividad aparente observada en la línea 9 y sección transversal esquemática. Tomado de Karlik y Kaya (2001)

Resultados electromagnéticos

Hay buena correlación entre los resultados obtenidos por los estudios geoelectrónicos y los métodos electromagnéticos, sobre todo en las zonas donde la contaminación venía reflejada por valores bajos de la resistividad y valores negativos de las componentes de los campos electromagnéticos.

El modelo electromagnético utilizado, representa la pluma de contaminación como una zona de baja resistencia, y se extiende hasta una profundidad aproximada de unos 25 metros, su anchura es de unos 10 m para la línea 9, y está más o menos centrada con respecto al origen. El modelo propuesto es sencillo porque la respuesta del método VLF está controlada principalmente para la parte más superficial del cuerpo conductor que se ha estudiado; un modelo más realista debería permitir que la

pluma de contaminación se extendiera hacia abajo y en la dirección de circulación de las aguas subterráneas como un cuerpo de baja resistencia.

Todos los métodos usados en el estudio están basados en diferentes propiedades físicas, todos ellos podían identificar la pluma de contaminación por una zona de baja resistividad en la dirección de circulación de las aguas subterráneas. Estas observaciones han sido suficientes para determinar la extensión de la contaminación, que se espera siga la dirección del flujo de las aguas de la zona. La consistencia de las medidas electromagnéticas realizadas en tres épocas distintas muestra la reproductibilidad de los resultados y por tanto la fiabilidad de las medidas del VLM. Además, se podría concluir que la repetición de las medidas pudo usarse para controlar la extensión de la contaminación, ya que los datos fueron tomados entre largos periodos de tiempo.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la resistividad en corriente continua y el método electromagnético VLM-EM son dos herramientas viables para definir la zona contaminada de las aguas subterráneas, ya que la conductividad eléctrica está directamente relacionada con el contenido de soluto disuelto en el agua. En particular, el método electromagnético ha demostrado ser rápido, efectivo y barato. Los estudios realizados para este caso del vertedero de Esparta, han mostrado que las zonas de contaminación coincidían con las zonas con valores bajos de resistividad. La existencia de un arroyo que cruzaba el vertedero, jugaba un importante papel de cara a la contaminación del acuífero y de la superficie.

La repetición de las medidas ha demostrado que los datos son precisos y reproducibles; el método electromagnético podría ser usado en el futuro para el control de la contaminación de las aguas subterráneas.

Todos los resultados obtenidos están totalmente de acuerdo con los estudios previos realizados en la zona, y son suficiente para mostrar la existencia y aumento de la contaminación de los acuíferos. Los hallazgos de este estudio pueden contribuir al esfuerzo de la protección de las aguas subterráneas, incluso podrían usarse para la valoración de la ubicación de barreras de control.

4.7.3.4. IMÁGENES GEOFÍSICAS DENTRO DE ESTRUCTURAS DE SILLERÍA

Las técnicas geofísicas ofrecen la capacidad de realizar investigaciones no destructivas en estructuras ingenieriles. El uso combinado de diferentes métodos geofísicos permite identificar ciertos objetivos marcados, de hecho, está demostrado la buena respuesta de la sísmica, el radar y la tomografía eléctrica para su utilización en la investigación del estado interno de estructuras en sillería, mampostería o fabrica de

ladrillo. A continuación se va a recoger el estudio llevado a cabo en una estructura de este tipo, el viaducto de Ribblehead, comprobando la respuesta de los tres métodos: acústico, eléctrico y radar para determinar las condiciones de la estructura de albañilería, así como la reducción de las resistencias y la entrada de agua en el interior de la misma.

Introducción

Muchas estructuras han usado en otras épocas la piedra como material de construcción y muchos viaductos y puentes construidos en los inicios del desarrollo del ferrocarril, en torno al año 1820, todavía permanecen en uso hoy en día. En los primeros diseños se desconocían los efectos de las variaciones de tensiones y las vibraciones producidas por el paso del tren sobre la estructura, sin embargo el ingenio y la capacidad de los ingenieros de esa época han quedado patentes al perdurar esas estructuras hasta nuestros días.

La tomografía también se puede aplicar a la obtención de imágenes del interior de estructuras de sillería, mampostería o de fábrica de ladrillo. Como ejemplo se va a usar el viaducto de un ferrocarril en Inglaterra, es el viaducto de Ribblehead.

Los métodos geofísicos que se emplearon para realizar este análisis fueron: radar, sísmica (acústica) y resistividad eléctrica. Sin embargo este estudio se va a centrar en los métodos eléctricos resistivos utilizados y los resultados obtenidos, sin olvidar el importante e imprescindible apoyo que supone el empleo de otras técnicas.

Métodos eléctricos resistivos

Las medidas se hacen usando electrodos colocados alrededor de la región de interés, típicamente desde la superficie del terreno y desde sondeos o directamente emplazados en la estructura de albañilería.

Las medidas son ordenadas para incrementar la profundidad de investigación, de tal modo que todo el conjunto de medición sea más sensible a la región de medida. Según se aprecia en la figura 1, las tomas de medidas se realiza de forma que todos los posibles dipolos entren en juego (se mide la diferencia de potencial entre electrodos adyacentes) para una posición fija de la fuente de corriente eléctrica. El proceso se repite con la fuente de corriente conectada a diferentes electrodos.

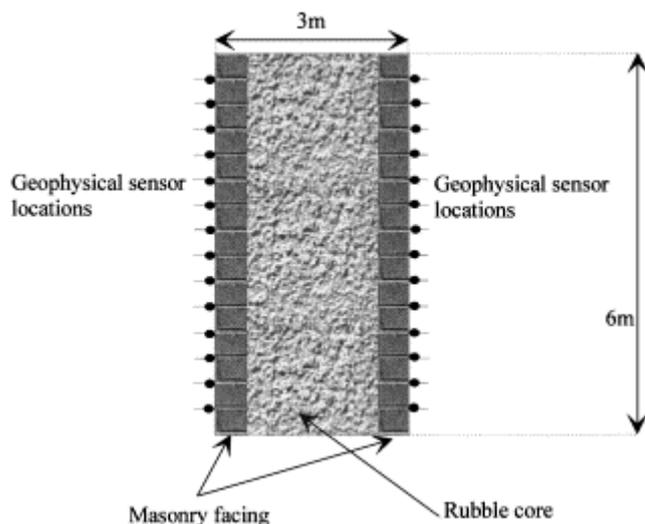


Fig. 1. Diagrama esquemático de la localización de los sensores en una pila intermedia del viaducto.

Estudio del viaducto de Ribblehead

El viaducto de Ribblehead es una estructura de piedra de 24 vanos y de aproximadamente 400 m. de largo (figura 2), dentro de la línea Settle-Carlisle. Fue construido entre 1870-1875 por la Compañía de Ferrocarriles Midland, como parte de su ambicioso plan de tener una ruta independiente desde Londres a Escocia. El paso de trenes por esta estructura fue sentenciado a cerrar en los años 80, pero se suspendió el cierre y actualmente está soportando un servicio regular de pasajeros e incluso ha incrementado el paso de cargas pesadas.



Fig. 2. Viaducto de Ribblehead.

El viaducto está dividido en 4 secciones que, a su vez, están divididas por una pilas principales, que tienen más del doble de espesor que las pilas intermedias pero de construcción hueca. El objeto del estudio era una de estas pilas intermedias, que tiene aproximadamente 3 m de espesor sobre el nivel del arco y se amplía hacia la base. El

interior de estas pilar está relleno de una grava suelta poco compactada. La figura 3 muestra una sección longitudinal de la línea central del viaducto.

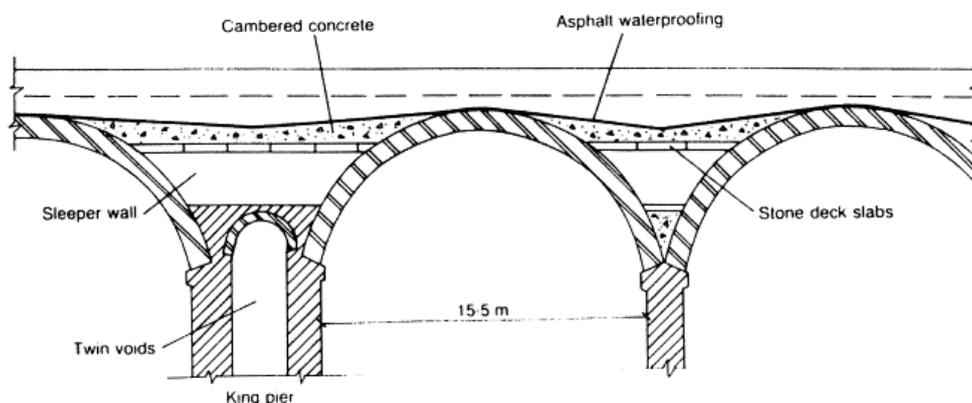


Fig. 3. Sección longitudinal del viaducto, donde se muestran las pilas intermedias y las pilas principales.

Las condiciones de la estructura y el coste de la reparación eran algunos de los principales factores que instigaban la propuesta de cerrar la línea. Se notó que iban apareciendo grietas en algunos pilares y que algunos de los bloques de piedra estaban desencajándose de su posición en la estructura. Además, el relleno de grava de las pilas intermedias estaba consolidado hacia el revestimiento de la obra de mampostería, llevando la mayor parte de la carga. Las primeras medidas correctoras para estabilizar la estructura usaron pernos que punzaba la membrana impermeable y permitía que el agua entrara dentro de la pila.

Resultados de tomografía eléctrica

Para el desarrollo de este estudio se utilizó el modelo de inversión de mínimos cuadrados, tomando un tamaño de celda de 0.75 m el objetivo de la simulación era evaluar la aplicación general del método para cambios en las propiedades de las pilas, que es lo que probablemente ocurre en largos períodos de tiempo.

Los resultados de la tomografía eléctrica muestran una gran resolución tanto de la extensión como de los valores de las anomalías interiores. La figura 4 muestra los cinco modelos usados para analizar el comportamiento de la estructura y los resultados de los tomogramas obtenidos.

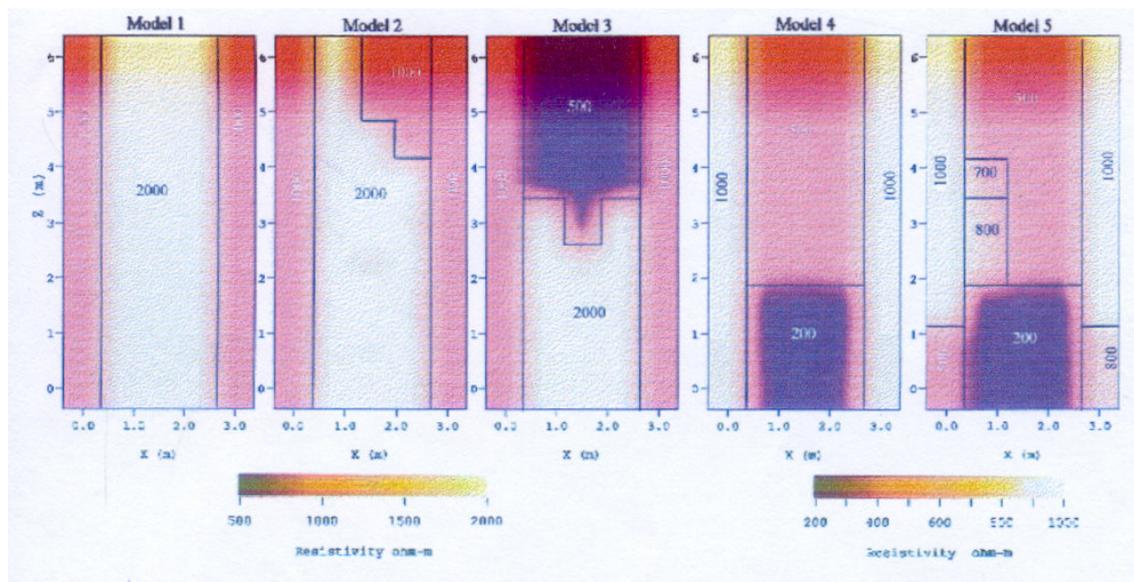


Fig. 4. Cinco modelos y sus tomogramas de resistividades .

El modelo 1 está basado en el caso que el agua no penetre dentro del núcleo de la grava. El modelo 2 muestra una incursión desde la zona superior derecha que satura parcialmente el núcleo. El modelo 3 muestra el nivel de saturación y el incremento de el agua que se ha ingresado. El modelo 4 muestra que el agua ha alcanzado el fondo del núcleo de la grava y que el área de la base está acercándose a la completa saturación. El modelo 5 recoge el caso de un fluido que se filtra a través de la albañilería hasta el borde inferior izquierdo, disminuyendo su resistividad y causando un nivel de saturación según el canal sobre el que desciende. En todos los casos, las imágenes de los valores de resistividad son acordes a los valores del modelo y la extensión espacial de la anomalía está en total acuerdo con el modelo.

Conclusiones

Las técnicas desarrolladas mediante el uso de imágenes geofísicas para evaluar las condiciones del terreno, pueden ser fácilmente aplicables a la investigación no destructiva de estructuras de sillería, mampostería o albañilería en general. Las técnicas de radar, sísmica y eléctrica tienen aplicación en este tema, que deberán ser seleccionados en función de la resolución que se quiera obtener en los resultados, así como del coste y la facilidad para tomar las medidas.

En este caso se ha centrado el estudio en el ingreso de agua dentro de la estructura, pero también se pueden estudiar otros problemas estructurales. Por ejemplo, las tres técnicas podrían utilizarse para detectar la presencia de huecos detrás del muro.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este estudio son:

Los métodos resistivos son altamente sensibles a cambios en el contenido de humedad interna y es una técnica ideal para el control a largo plazo del ingreso de agua dentro de una estructura de mampostería. El control requiere el emplazamiento permanente de una distribución de electrodos dentro de la fábrica del viaducto.

La flexión del rayo dentro de la estructura es un gran problema tanto en sismica como en las técnicas de radar, pero afecta menos a las medidas con radar porque el contraste de las propiedades con éste es menor que en las propiedades sísmicas.

Ejecutar análisis con rayo inclinado no mejora significativamente los resultados del radar o de la sismica. El desconocimiento del contraste de propiedades en el centro de la estructura provoca caminos de rayos inclinados tan imprecisos como la aproximación de rayos rectos. El análisis de rayo inclinado también puede ser muy sensible a la posición y la condición de la interfase interior entre la fábrica y el núcleo de grava.

La técnica de radar es ideal para un reconocimiento inicial de una zona donde se sospeche que haya problemas estructurales. La técnica no requiere ningún trabajo para acoplar los sensores a la estructura (a diferencia de la sismica o la resistividad) y es rápido de operar. Áreas identificadas por los estudios iniciales con radar se suelen someter a una mayor investigación por el método resistivo.

4.7.4 FIABILIDAD DEL MÉTODO. ESTADO ACTUAL

El problema directo al que se enfrenta el investigador cada vez que lleva a cabo alguna de las caracterizaciones geológico-geotécnicas anteriormente mencionadas radica en la existencia de anomalías derivadas del terreno y del nivel de “ruido” presente en las medidas. Por ello hay que desarrollar configuraciones multielectrónicas nuevas basadas en las configuraciones electrónicas ya clásicas para comparar las ventajas o inconvenientes de una frente a la otra e intentar, de este modo, minimizar el efecto eléctrico-resistivo que no es debido al objeto que se quiere detectar (hueco, plano de deslizamiento o sustancia contaminante), y que puede ser producido por la inexactitud de la posición de los electrodos, la topografía del terreno, la presencia de capas y paredes verticales, rellenos, corrientes telúricas, etc.

Previamente al desarrollo de una obra de ingeniería civil es necesario llevar a cabo una serie de prospecciones geológico-geotécnicas con el fin de conocer la naturaleza del terreno donde se va a actuar de cara a identificar y localizar posibles anomalías. La efectividad de los métodos geofísicos para realizar estas campañas de reconocimiento previas está totalmente demostrado, lo cual optimiza considerablemente las actuaciones que se lleven a cabo en el terreno.

Se ha visto cómo también son muy útiles los métodos geofísicos para su utilización a posteriori, es decir, en zonas donde se ha producido algún tipo de patología o problemática que afecte al suelo y sus propiedades, o a la calidad del agua, en el caso de los acuíferos.

Son muchos los elementos que se pueden encontrar en el subsuelo, desde factores geológicos, como rocas con diferente grado de alteración, fracturas de orientación y desarrollo variables o cavidades kársticas, hasta elementos antrópicos, como tuberías, túneles o restos arqueológicos. También permite analizar el estado interno de estructuras ingenieriles, como presas, puentes, muros, etc.

Igualmente son muchos los métodos que se pueden emplear para la investigación de los terrenos y de las diversas estructuras ingenieriles. En este trabajo se han visto varios métodos: sísmico, eléctrico, electromagnético, gravimétrico, etc.; la elección de un método u otro vendrá condicionado por el objetivo perseguido y por las condiciones del terreno o de los elementos a estudiar.

El trabajo se ha centrado en la tomografía eléctrica, por considerarse un método muy efectivo e inmediato. Es un método que día a día sigue evolucionando y ya se ha aplicado en trabajos de diversa índole, y aún le quedan muchos campos por cubrir e investigar. En este documento se han expuesto cinco casos prácticos, en los que se

ha analizado su utilidad y sus resultados. En todos ellos ha sido una herramienta muy útil y práctica, a la vez que determinante.

Sin embargo, es preciso señalar que actualmente la tomografía, como cualquier otro método geofísico, debe completarse con la realización de otros tipos de prospecciones, como puedan ser sondeos o catas o, como en los ejemplos presentados, la realización de algún otro método geofísico, que permitan contrastar y completar los resultados, valorar las posibles soluciones y determinar la precisión de los datos.

Por todo ello, se puede afirmar que la prospección geofísica del subsuelo o de elementos de la ingeniería por diversos métodos, y más concretamente, mediante perfiles continuos a partir de la tomografía eléctrica, permite obtener una visión de las características de los mismos, de una manera rápida, económica y no destructiva.

5. ENSAYOS DE RESPUESTA ELÉCTRICA

5. ENSAYOS DE RESPUESTA ELÉCTRICA

5.1 EL DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS

Ya se ha visto en el apartado 4.3.3 referente a la resistividad eléctrica de los materiales que los factores de los que depende la resistividad de una roca son múltiples y diversos. El grado de saturación en agua de la roca, en contenido en sales disueltas del agua, la temperatura, la compactación, etc.

En su aplicación al estudio del subsuelo, lo que interesa es detectar límites de capas de diferente composición y la situación de sus planos de discontinuidad (planos de estratificación, fallas, diaclasas) y, por supuesto, imperfecciones o heterogeneidades en la roca tales como oquedades o zonas de alteración. Muchas veces, un conjunto de estratos de diferente composición tiene un comportamiento eléctrico similar al de una capa homogénea. Entonces, ¿cómo diferenciar dichos límites y su orientación espacial?

El problema principal que aparece durante la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica es que existen múltiples soluciones para distribución de resistividades, pero el programa informático que procesa los datos de resistividad aparente medidos en campo utiliza una técnica de inversión de los mínimos cuadrados (o diferencias finitas) para producir una única sección modelo 2D de lo que se encuentra en el subsuelo. Una manera de optimizar el proceso consistiría en que el programa informático resolviera como posibles varios perfiles entre los cuales el técnico encargado de su interpretación escogiera el que mejor se ajustara a las condiciones geológicas locales.

En la interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales éste fenómeno se denomina *principio de equivalencia*. Dicho principio enuncia que resulta imposible conocer con exactitud y al mismo tiempo el valor de la resistividad y espesor de una capa. Un estrato de pequeño espesor y alta resistividad puede dar la misma respuesta eléctrica que un estrato muy grueso de baja resistividad. Esto ocurre para cualquier caso de integración de volumen.

Para un modelo de tres capas como el de la figura 5.1, de 1000 ohm.m, 20 ohm.m y 5000 ohm.m respectivamente, se obtendría una curva como la que le acompaña en la figura. En tal caso, para la segunda capa (2) se tienen dos datos imposibles de determinar: la resistividad y el espesor. Sin embargo la conductividad ($S = \text{espesor} / \text{resistividad}$) sí que podría ser bien determinada.

Ejemplo:

30 m/ 20 ohm.m =1.5 Siemens

15 m/ 10 ohm.m =1.5 Siemens

A estas soluciones (resistividad-espesor) que pueden obtenerse a partir de una misma curva de resistividad se les denomina *equivalentes* (Orellana, E.,1982).

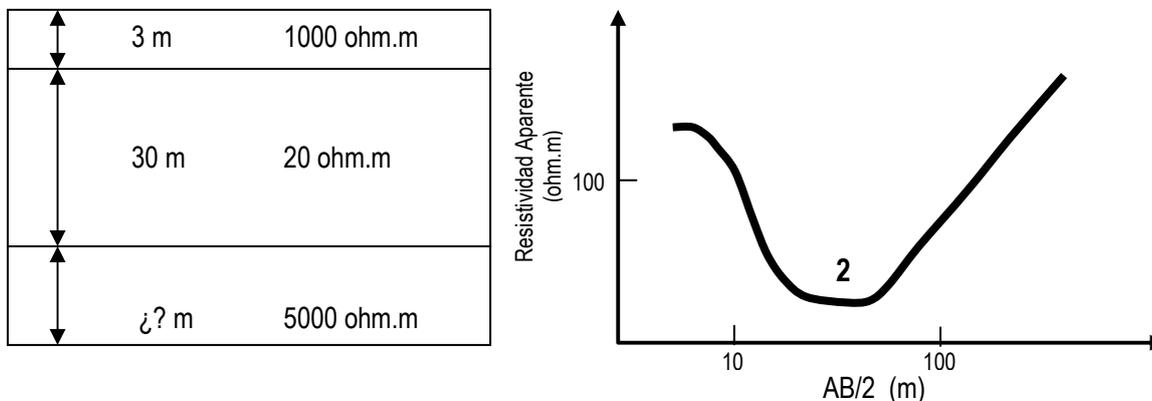


Figura 5.1. Modelo de tres capas y curva de resistividades correspondiente

Este mismo problema de equivalencia se presenta en la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica donde son seleccionados centenares de cuadripolos, de entre los cuales se podrían extraer varios SEV con curvas de resistividad de soluciones equivalentes, es decir, con al menos dos soluciones de resistividad-espesor. Se puede decir, por tanto, que en tomografía eléctrica existen varias soluciones equivalentes, más cuanto mayor sea el número de datos obtenido. Para un perfil con 1200 medidas podrían presentarse en torno a 20 soluciones equivalentes, de entre las cuales tan sólo unas pocas representarían fielmente la realidad.

Los programas informáticos no tienen en cuenta el principio de equivalencia y ofrecen una solución única en forma de perfil de distribución de resistividades. Aquí entra en juego la experiencia y la pericia del técnico responsable de la interpretación para deducir lo que significa esa respuesta eléctrica del terreno.

Uno de los objetivos de esta investigación es profundizar en el significado de esa respuesta geoelectrica para facilitar una interpretación cualitativa basada en resultados experimentales. Para ello se han diseñado varios experimentos de diversa índole que permitirán conocer a fondo el comportamiento de un terreno ante el paso de un flujo eléctrico.

Estos experimentos se han diseñado con la intención de que sean totalmente representativos: objetivos variados, con diferentes rellenos, con diferente orientación y diferente tamaño. También se ha variado la profundidad de esos objetivos. En definitiva, se trata de resolver casos variables que reflejen situaciones variables.

Inicialmente se realizaron mediciones de resistividad sobre muestras de laboratorio mediante un resistímetro del fabricante PASI, modelo 16-GL, propiedad de la

Universidad de Burgos. Se estudió la incidencia de los factores litología, humedad y compactación.

Posteriormente se realizaron ensayos de resistividad sobre modelos reducidos en condiciones controladas utilizando un equipo de tomografía eléctrica del fabricante IRIS Instruments, modelo SYSCAL KID Switch 24, propiedad de la Universidad de Burgos. Se efectuaron mediciones sobre objetivos conocidos, principalmente huecos con diferentes rellenos (aire, agua o arcilla).

Finalmente se realizaron mediciones sobre objetivos reales para evidenciar la fiabilidad del método en circunstancias ordinarias. Los objetivos fueron conducciones o estructuras enterradas cuya posición real pudiera ser posteriormente conocida.

Seguidamente se explica el desarrollo de las tareas descritas, ordenadas según los siguientes apartados:

Subcapítulo 5.2: MEDICIONES DE RESISTIVIDAD SOBRE MUESTRAS DE LABORATORIO

Subcapítulo 5.3: EXPERIMENTACIÓN SOBRE MODELOS REDUCIDOS

Subcapítulo 5.4: EXPERIMENTACIÓN SOBRE TRABAJOS A ESCALA REAL

5.2 MEDICIONES DE RESISTIVIDAD SOBRE MUESTRAS DE LABORATORIO

A continuación se describen una serie de ensayos de laboratorio sobre muestras de terreno en las que se aplicó un flujo eléctrico lineal y con los que se pretende iniciar una base inicial respecto al tipo de respuesta eléctrica que presentan las muestras en condiciones distintas de humedad, compactación, etc.

5.2.1 ANTECEDENTES

Ángel García Yagüe, en la obra de Custodio, E. (1983) señala como valores representativos de resistividad para diferentes materiales los siguientes valores (en ohm.m):

Aguas subterráneas en granito.....	20-100
Aguas subterráneas en caliza	20-50
Aguas salobres	1-10
Aguas potables superficiales	20-300
Agua del mar.....	menor de 0,2
Agua destilada	mayor de 500
Arcillas y margas.....	10-100
Calizas y areniscas	50-3.000
Pizarras	50-300
Rocas metamórficas.....	100-10.000
Gravas	100-10.000
Arenas.....	130-1.000
Limos	30-500

Asimismo, García Yagüe señala que las dispersiones que se observan en la tabla anterior son incluso inferiores a las que pueden encontrarse en la realidad. Señala como ejemplo que una arcilla desecada naturalmente puede presentar valores muy superiores a los 100 ohmios-metro, que unas gravas con resistividad de 10-20 ohmios-metro se encuentran con seguridad bajo el nivel freático y el agua es salobre. Un granito con resistividad de 100 ohmios-metro indica que está alterado si se encuentra sobre el nivel freático, y con una gran fracturación si se encuentra debajo y el agua no es muy salobre o marina. García Yagüe afirma que la práctica permite deducir bastante aceptablemente el estado de la roca y la calidad de agua, siempre que por hipótesis geológicas se conozca la naturaleza de la roca del subsuelo. También es fácil concluir que no puede deducirse la naturaleza de la roca realizando mediciones en los afloramientos próximos y comparando las resistividades con las obtenidas en el sondeo eléctrico, ya que en el afloramiento existe una alteración y humedad diferentes de las que se encuentran en profundidad.

Visto esto, se puede comprobar que una misma roca puede tener comportamientos eléctricos muy dispares en función principalmente de dos parámetros fundamentales: la porosidad y la cantidad y calidad del agua.

5.2.2 MEDIDAS DE LABORATORIO

Con estos ensayos de laboratorio se pretende obtener una experiencia directa acerca de la influencia de esos dos factores elementales. La idea inicial planteaba dos tipos de ensayos bien diferenciados. Por una parte se realizarían mediciones de resistividad eléctrica sobre muestras de suelos en las que se harían variar tres factores: litología, porosidad y humedad. En segundo lugar se realizarían mediciones sobre sustancias que habitualmente se pueden encontrar rellenando cavidades, como el aire con distintos grados de humedad relativa, agua con diferente salinidad, arcilla con variaciones de humedad, etc. Finalmente los ensayos de laboratorio se centraron en las mediciones del primer tipo, sobre muestras de tres arenas distintas que se ensayaron con diferentes variaciones de compactación y humedad. A continuación se describen los experimentos llevados a cabo.



Figura 5.2. Material utilizado para las mediciones de resistividad sobre muestras de laboratorio.

Equipo utilizado: Resistivímetro PASI, modelo 16-GL

Material de ensayos:

Litología 1: ARENA LAVADA DE MINA (Cretácico inferior)

Litología 2: ARENA NATURAL. FACIES UTRILLAS (Cretácico inferior)

Litología 3: ARENA DE PLAYA (Actual)

Se calculará la resistividad para cada una de estas litologías cada una de las siguientes situaciones:

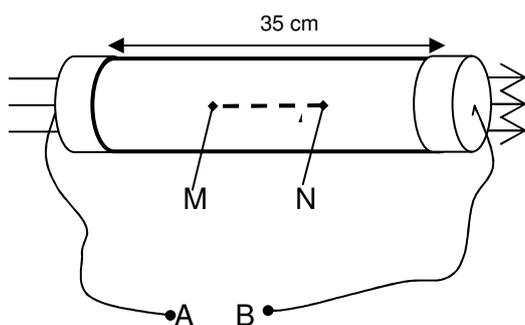
- Ensayo A; % de agua: Humedad natural (la que tiene en el terreno)
Grado de compactación: sin compactar
- Ensayo B; % de agua: Humedad natural (la que tiene en el terreno)
Grado de compactación: Proctor normal
- Ensayo C; % de agua: Seca en estufa 0%
Grado de compactación: Comp. máxima en mesa vibración



Figura 5.3. Muestras de arena de tres litologías distintas con su correspondiente probeta preparada. De izquierda a derecha: arena de playa, arena de río lavada y arena de facies Utrillas.

Cada una de estos ensayos se realizará con inyección de corriente de diferentes voltajes: 9 voltios, 24 voltios y 36 voltios, y para muestras con 0% de agua (secas en estufa) se aumentará a 90 y hasta 180 voltios.

Preparación de probetas para ensayos: Se preparan las muestras rellenando con



las distintas litologías el interior de tubos de PVC de 35 cm de longitud por 7 cm de diámetro. Una vez preparada, se hará pasar a través de la probeta un flujo de líneas paralelas de corriente. Esto se consigue conectando a sus extremos las salidas AB del resistímetro PASI. En dos puntos intermedios se colocan unas varillas de cobre que conectadas a las salidas MN del resistímetro. El resistímetro proporciona R

(resistencia entre las superficies MN) por el cociente $\Delta V / I$. Se obtiene la resistividad multiplicando R por la sección transversal del cilindro conductor y dividiendo por la distancia MN.

5.2.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En el Anexo I se adjuntan los datos de las mediciones efectuadas en los ensayos de laboratorio. A continuación se describen las observaciones más destacables:

Aparecen en multitud de ocasiones medidas donde la Intensidad es de 190,4 nA. Se ha observado que cuando el resistivímetro PASI proporciona dicho dato, la medición resulta errónea. Esto se debe al problema de saturación de corriente en muestras pequeñas. La inyección de corriente en este equipo PASI 16-GL se realiza mediante corriente continua por conexión de unas baterías externas al equipo. El mínimo voltaje que admite el dispositivo son 9V que generan una Intensidad excesiva para el pequeño tamaño de la muestra. La dificultad de trabajar con muestras pequeñas estriba en la dificultad de transmitir una corriente de muy baja intensidad.

Una relación adecuada entre superficie del conductor e intensidad con garantía de que éste no se vea saturado por la corriente es la de $1 \mu\text{A}$ por cada cm^2 . Para nuestra muestra de 7 cm de diámetro, es decir 38 cm^2 la intensidad óptima no debería superar los $38 \mu\text{A}$. De este modo se observa que las mediciones válidas inyectan una intensidad que se mide en μA .

En las mediciones correctas, donde no aparece el dato $I=190,4 \text{ nA}$, se observa una falta de linealidad cuando se realizan sucesivas medidas. Puede apreciarse cómo la Resistencia va disminuyendo tras sucesivas medidas aunque no se modifique nada del dispositivo. Esto se debe al fenómeno de Polarización Inducida por los efectos electroquímicos en el contacto mineral-agua, y que se superponen a la linealidad. Su explicación se entiende en términos de cargabilidad del mineral. El mineral almacena energía y la devuelve posteriormente.

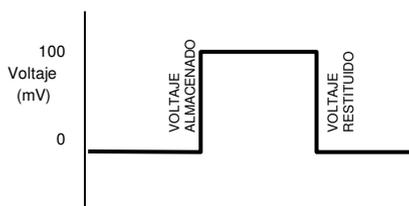


Figura 5.4. Gráfico $\Delta V /$ tiempo para un mineral sin efectos de Polarización Inducida que se somete a 100 mV.

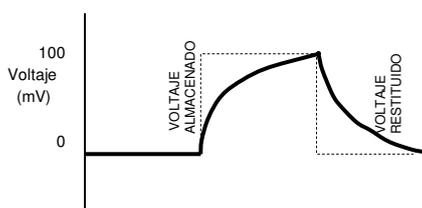


Figura 5.5. Gráfico $\Delta V /$ tiempo para un mineral con efectos de Polarización Inducida que se somete a 100 mV.

Otro problema es la Inducción electromagnética que se solucionaría si se utilizara corriente alterna a 50-60 MHz en lugar de corriente continua (Gasulla, M.,1999). Para trabajar con objetos pequeños es preferible utilizar frecuencias altas para que la inducción electromagnética sea baja. En trabajos de campo es preferible utilizar frecuencias bajas. La inducción electromagnética genera una alteración de la medida que se quiere hacer y es un efecto físico que se produce al inyectar y cortar corriente (en un interruptor, por ejemplo, se manifiesta en forma de chispazo).

Para comprobar la influencia de la porosidad en la resistividad de las muestras se prepararon probetas con diferente grado de compactación de la misma arena con la misma humedad. Se pudo comprobar que al aumentar la compactación disminuye la resistividad. Utilizando una inyección de corriente de 24V y las muestras de arena a humedad natural, se ve cómo la resistividad en arena lavada algo compactada (la del llenado manual de la probeta) alcanza valores de 2.800 ohm.m. Sin embargo, si esa misma arena se rellena en varias tongadas y se compacta con energía Proctor el valor de la resistividad baja hasta valores de 1.400 ohm.m. Los resultados en arena de Utrillas son incluso más espectaculares, ya que la resistividad de las probetas no compactadas (sin ningún tipo de compactación durante su llenado) dan valores de 10.000 ohm.m, mientras que las probetas con compactación Proctor dan valores de 350 ohm.m.

Respecto a la humedad los resultados fueron acordes a lo esperado, presentando valores altos aquellas muestras con poca humedad y valores bajos las muestras con mayor porcentaje en agua.

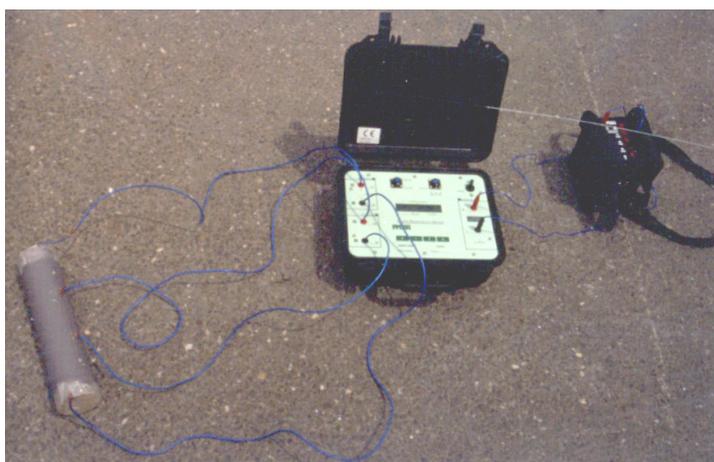


Figura 5.6. Resistímetro PASI y conexiones para la adquisición de medidas sobre una probeta de arena de facies Utrillas.

5.3 EXPERIMENTACIÓN SOBRE MODELOS REDUCIDOS

5.3.1 DETERMINACIÓN Y OBJETIVOS DEL MODELO

La construcción de modelos reducidos que simulen las condiciones naturales del terreno controlando las variables físicas de los problemas geotécnicos que se pretenden caracterizar se torna como algo complejo, fundamentalmente por la incidencia del factor escala. La mayoría de los equipos comerciales están pensados para grandes trabajos reales, no para pequeños perfiles a escala reducida. Por este motivo no se puede emplear cualquier equipo de adquisición automática. Para realizar estos experimentos se empleará el novedoso sistema SYSCAL KID Switch24, diseñado específicamente para trabajos de detalle con enfoque arqueológico y geotécnico.

En primer lugar hemos de definir lo siguiente: ¿Qué representa la maqueta?

El principal objetivo de este apartado de la investigación es la obtención de imágenes en perfiles de resistividad sobre objetos que simulen huecos en el terreno. Además se realizarán ensayos de medición de resistividad sobre dichos huecos rellenos de sustancias o materiales que habitualmente ocupan un hueco en el terreno. Por lo tanto, con estos ensayos se medirá la resistividad real de una pequeña porción de terreno que presenta huecos en circunstancias controladas de ubicación, tamaño, profundidad y rellenos (arcilla, agua, aire).

Queda así respondida la pregunta antes formulada: La maqueta es un modelo reducido que representa un terreno natural con oquedades perfectamente delimitadas. Al medir la resistividad aparente de ese terreno y se obtendrán imágenes de distribución de la resistividad real de su subsuelo, así como de las sustancias que puedan ocupar dichos huecos en el conjunto geoelectrico encajante-hueco.

Estos ensayos son extrapolables a circunstancias reales, como así demostró Gasulla (1999) en sus trabajos de aplicación a la detección de objetos locales, donde empleó como modelo de laboratorio una cubeta de plástico (40 cm x 35 cm x 20 cm) donde se sumergieron pequeños objetos esféricos y cilíndricos (de entre 2 y 3 cm) tanto aislantes como conductores, con la única diferencia de que Gasulla empleó corriente alterna en lugar de corriente continua.

La segunda pregunta será: ¿qué dispositivo se utilizará para medir la resistividad eléctrica?

Esta resulta ser una cuestión fundamental porque, aun utilizando configuraciones electrónicas cuyo desarrollo sea correcto desde el punto de vista teórico, en la práctica

ofrecen resultados dispares. Para contrastar resultados se emplearán las dos configuraciones electrónicas más usuales: el dispositivo lineal Wenner y el dispositivo Dipolo-dipolo (también llamado Doble Dipolo).

El equipo que se utilizará para estas mediciones sobre modelos reducidos será el resistivímetro SYSCAL KID Switch 24, del fabricante IRIS Instruments, con unas características de 25 W de potencia mínima, 500 mA de intensidad de corriente mínima y 200 V de salida.

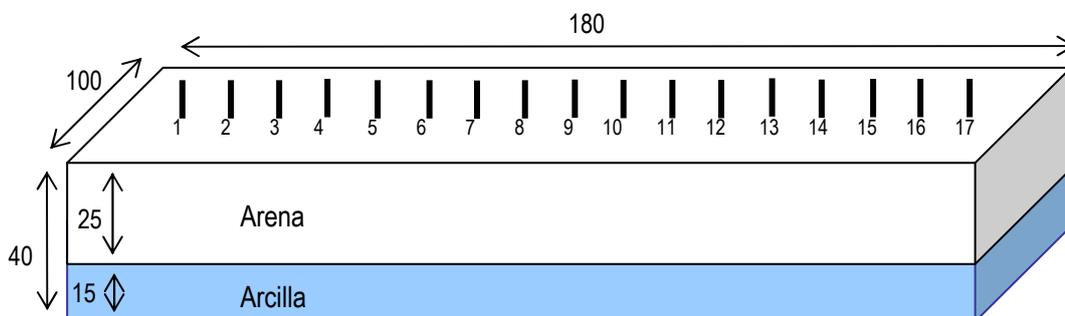
Dimensiones de la maqueta de modelos reducidos

La maqueta simula un modelo de dos capas, una superior muy resistiva y una inferior muy conductora. La capa superior estará compuesta por arena de río lavada, mientras que la capa inferior será arcilla con alto % de humedad. Las dimensiones de la cubeta que contenga la arena serán lo suficientemente grandes como para que sus paredes no incidan en la trayectoria y densidad de las líneas de corriente eléctrica o evitar problemas de saturación de corriente y, a su vez, lo suficientemente pequeñas como para que sea operativo desde el punto de vista experimental.

Se diseño finalmente un banco de pruebas con las siguientes dimensiones: 1,80 m de longitud, 1 m de anchura. La capa de arena tendrá 25 cm de espesor. Esta capa de arena yace sobre un lecho de arcilla de espesor 15 cm que forma el terreno natural. Los datos más profundos que puedan ser obtenidos durante los experimentos no superarán los 30 cm.

El dispositivo eléctrico trabajará con 17 electrodos con separación de 10 cm y clavados en el terreno hasta una profundidad comprendida entre 5 y 7 cm.

A continuación se sintetiza en un dibujo el modelo desarrollado (medidas en cm).



VARIABLES

En el estrato de arena se enterrarán diferentes objetos que simulen huecos. Las variables que se podrán controlar son:

1.- El **diámetro del hueco**, y más concretamente la relación existente entre la separación interelectródica y el diámetro del hueco, es decir el ratio D_{el}/D_h , siendo D_{el} la distancia de separación entre electrodos y D_h el diámetro del hueco. En los diferentes experimentos serán enterrados múltiples cuerpos de diferente diámetro para así determinar el diámetro mínimo detectable para una distancia de espaciado de electrodos concreta.

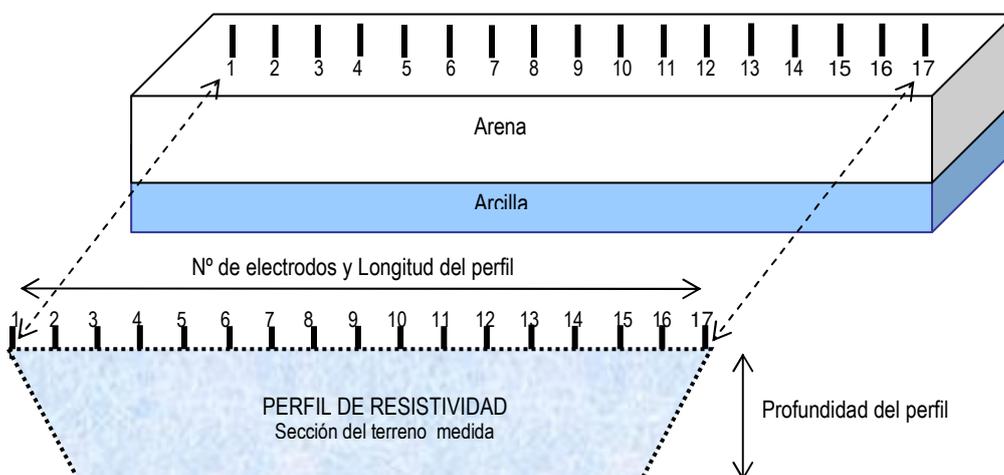
2.- **Profundidad del hueco**: se comprobará la incidencia de la profundidad del hueco en la variación de la calidad de resolución de las imágenes de resistividad obtenidas. Se tomarán objetos que simulen huecos y se harán varios perfiles enterrándolos a distintas profundidades.

3.- **Relleno**: se simulará la existencia de cavidades con cuatro tipos de relleno, aire, agua, arcilla y sal común (halita). También se enterrarán cuerpos aislantes (PVC) y cuerpos conductores (hierro).

PROCESO DE ADQUISICIÓN E INVERSIÓN DE LOS DATOS EN EL MODELO

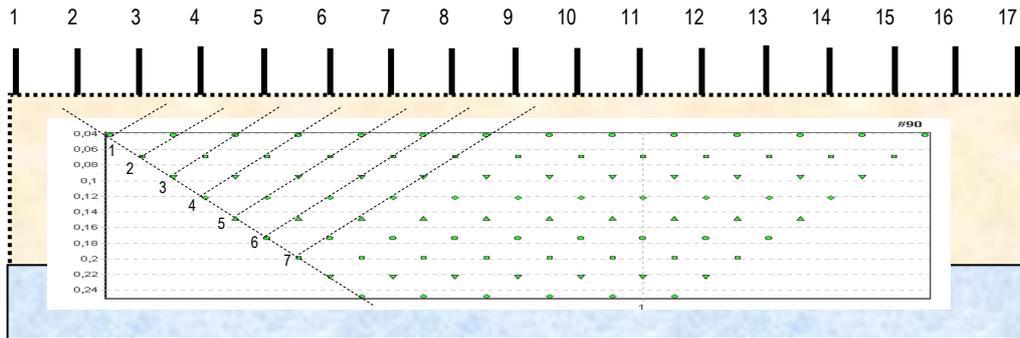
Se resume a continuación el proceso de adquisición y procesado de datos hasta la obtención del perfil de resistividad real.

En primer lugar se origina una discontinuidad en el estrato homogéneo de arena enterrando un cuerpo que simule una cavidad. A continuación se colocarán los electrodos de corriente en superficie, se seleccionan los parámetros de medición y se procede a la adquisición de medidas en el resistímetro SYSCAL KID Switch24.



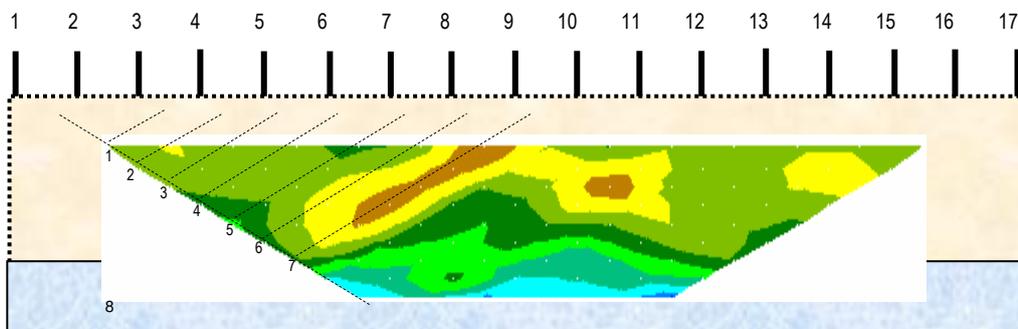
Una vez finalizada la adquisición de medidas se vuelcan los datos al PC mediante el software PROSYS, donde se filtran los datos erróneos. Desde ahí se exportan a un fichero de extensión .dat, para ser procesados por inversión de mínimos cuadrados con el programa RES2DINV.

En la figura adjunta se esquematiza la distribución de los puntos de medida conforme a la secuencia de registro diseñada mediante el programa ELECTRE II.

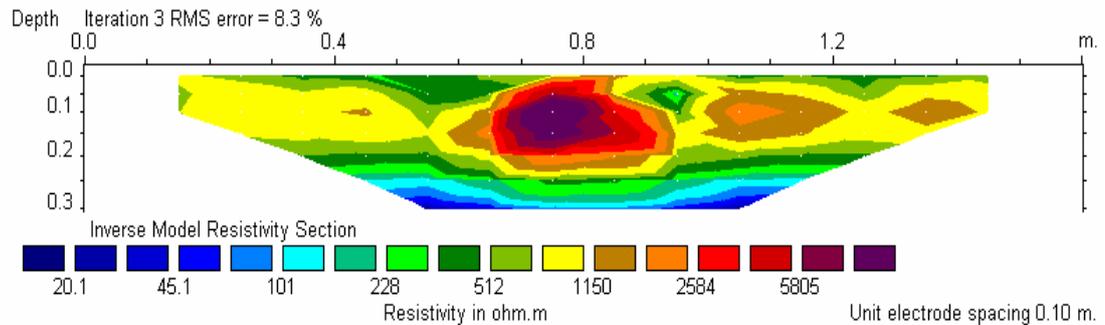


Los datos de resistividad son procesados con el algoritmo de inversión RES2DINV, versiones 3.47a y 3.49 propuesto por Loke y Barker (1996) para obtener una sección de resistividades. La rutina de inversión usada por este programa se basa en el algoritmo de inversión de los mínimos cuadrados. El modelo 2-D usado en este programa divide el subsuelo en un número de bloques rectangulares (Loke, M.H.; Barker, R.D., 1996) y la resistividad de los bloques se ajusta de forma iterativa hasta minimizar la diferencia entre los valores medido y los valores calculados de resistividad aparente. Los valores de resistividad aparente se calculan mediante el método de diferencias finitas. La diferencia entre los datos de resistividad aparente medida en campo y los datos de resistividad calculada a partir del modelo generado dará el porcentaje de error del modelo teórico propuesto.

La figura adjunta refleja un perfil de resistividad aparente construido a partir de las medidas adquiridas en campo.



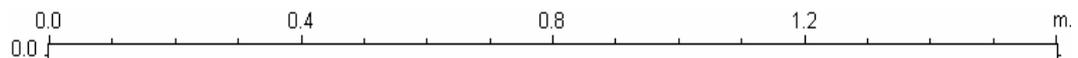
Finalmente se obtiene el perfil de resistividad real previo procesado de datos de resistividad aparente con el programa RES2DINV, como se representa en la figura adjunta. Obviamente, el perfil obtenido es una solución 2D a un problema 3D, por cuanto hemos de interpretarlos con mucha cautela.



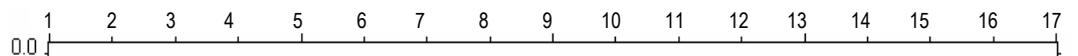
CONSIDERACIONES PREVIAS A LA INTERPRETACIÓN DE PERFILES

1.- **Coordenada horizontal:** la referencia a un punto de los perfiles de tomografía en el eje horizontal, se podrá hacer de dos formas:

a.- Por la distancia en metros desde el electrodo nº1 hasta la posición del punto. El electrodo nº1 se sitúa en 0.0 m, el nº5 en 0.4 m, el nº9 en 0.8 y el electrodo nº17 en 1.6 m

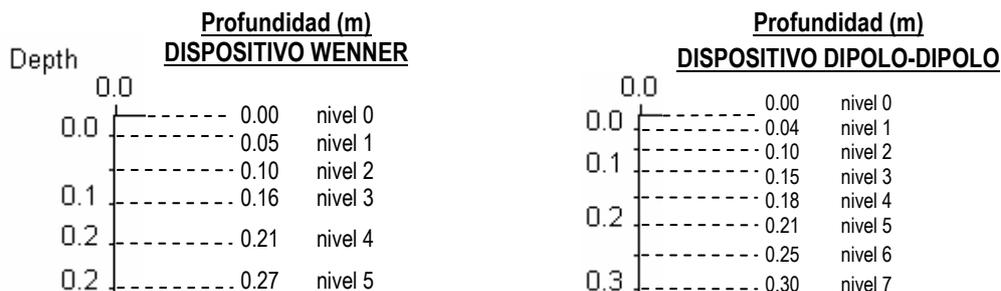


b.- Indicando el número de electrodo bajo el que se encuentra dicho punto. Todos los perfiles se han ejecutado situando el electrodo nº1 a la izquierda.

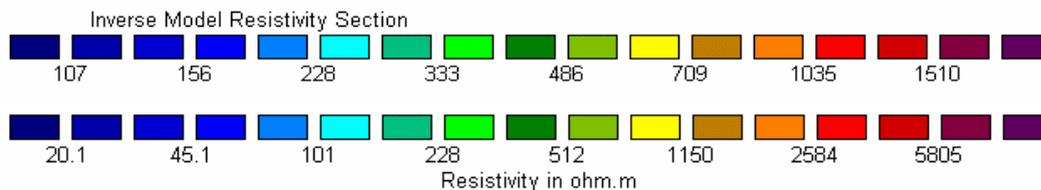


2.- **Coordenada vertical:** a la posición en vertical se hará referencia siempre como dato de profundidad, desde la superficie del estrato superior de arena. Para el caso de nuestros modelos experimentales en el banco de arena el valor numérico de profundidad en metros llevará dos decimales, pero el programa RES2DINV proporciona perfiles con un solo decimal.

A continuación se representa en escala gráfica el valor de profundidad con dos decimales para los perfiles Wenner y perfiles Dipolo de nuestros experimentos, realizados con 17 electrodos separados 10 centímetros.



3.- **Valores de Resistividad Real:** Bajo cada perfil figura una escala graduada de colores. El programa asigna a cada color un valor de resistividad real, cuyo valor se intercala en la escala de colores. Cada perfil tiene su propio código. El programa reparte la escala de colores entre los valores de resistividad máximo y mínimo calculados. De este modo, el significado de cada color es distinto para cada perfil. En el ejemplo de abajo se han escogido dos escalas, para las que el color amarillo representa valores de 700 ohm.m en el primer caso y 1.100 ohm.m en el segundo.



4.- **Espaciado entre electrodos:** La distancia de espaciado interelectródico viene expresada junto a cada perfil, bajo la leyenda de la resistividad de escala graduada, como a continuación se expresa:

Unit electrode spacing 0.10 m.

DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS

Se han seleccionado diversos objetos de forma y tamaño variables que simulen huecos naturales. Se presenta a continuación un listado de los mismos:

- | | |
|-----------------|--|
| Apartado 5.3.2 | Experiencia 0: Estrato de arena (sin objetos enterrados) |
| Apartado 5.3.3 | Experiencia 1: Bloque hueco de hormigón |
| Apartado 5.3.4 | Experiencia 2: Bloque hueco de cerámica |
| Apartado 5.3.5 | Experiencia 3: Bovedilla vertical |
| Apartado 5.3.6 | Experiencia 4: Tubo de PVC |
| Apartado 5.3.7 | Experiencia 5: Tubo metálico |
| Apartado 5.3.8 | Experiencia 6: Bloque de sal común (halita -NaCl-) |
| Apartado 5.3.9 | Experiencia 7: Cilindro de arcilla húmeda |
| Apartado 5.3.10 | Experiencia 8: Bloque arcilla seca |
| Apartado 5.3.11 | Experiencia 9: Losa vertical |
| Apartado 5.3.12 | Experiencia 10: Cilindro hueco vertical |
| Apartado 5.3.13 | Experiencia 11: Dos cilindros huecos verticales |
| Apartado 5.3.14 | Experiencia 12: Tubo metálico vertical |

5.3.2 EXPERIENCIA 0: ESTRATO DE ARENA (sin objetos enterrados)

En esta primera experiencia se explica un ensayo realizado sobre el estrato de arena sin la presencia de objetos enterrados que simulen huecos. Se ha empleado un dispositivo Dipolo-dipolo.

Modelo

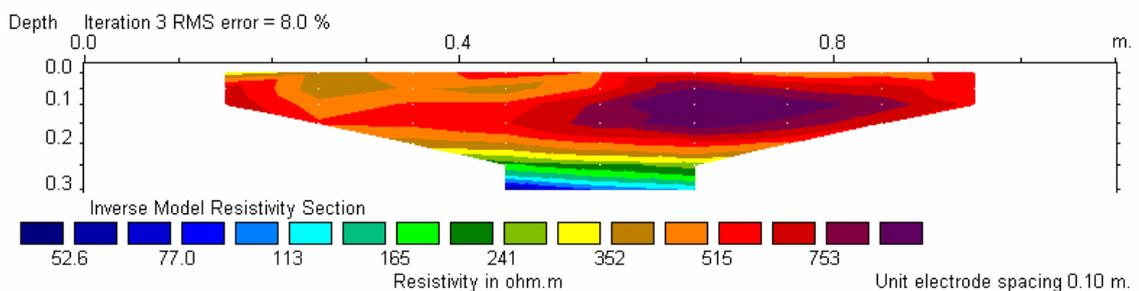
Este experimento representa un modelo de terreno de dos capas. La capa superior está compuesta por un nivel de arena con resistividad alta, y la capa inferior es un nivel de arcilla con resistividad baja. Ambas capas son homogéneas y horizontales, con un espesor de 25 cm en la capa de arena y un sustrato arcilloso de al menos 15 cm.



Se pretende determinar si el dispositivo es capaz de localizar y diferenciar el contacto entre esas dos formaciones y utilizar esta imagen para compararla con las de experiencias posteriores para identificar anomalías de resistividad que reflejen la presencia de objetos enterrados.

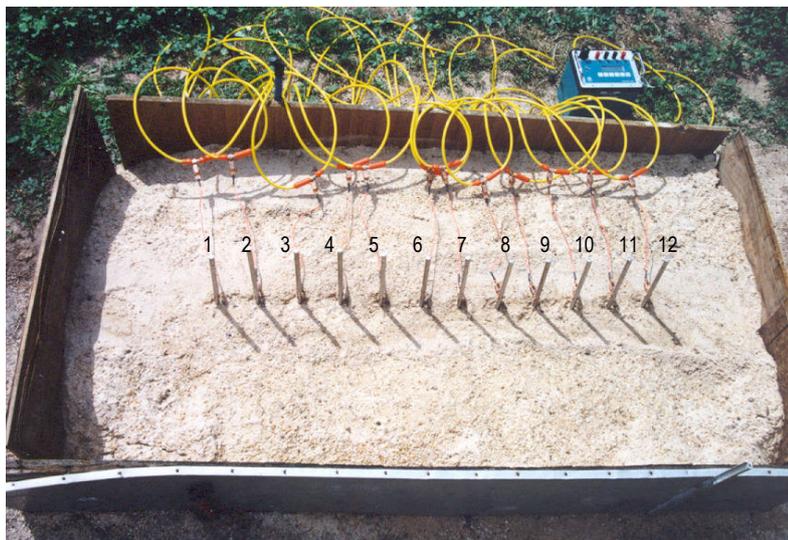
Mediciones

El dispositivo utilizado para este ensayo inicial es Dipolo-dipolo, combinando 12 electrodos con una separación de 10 cm.



Resultados

El perfil obtenido presenta una franja horizontal de colores naranja a pardo que se corresponden con valores de resistividad superiores a 500 ohm.m. Esta franja tiene un reparto uniforme de resistividades sin mostrar ninguna anomalía de formas concretas. Únicamente se comprueba que en el tramo de 0,5 a 0,6 m, a 15 cm de profundidad tenemos una zona de forma lenticular que concentra los valores máximos, con más de 750 ohm.m.



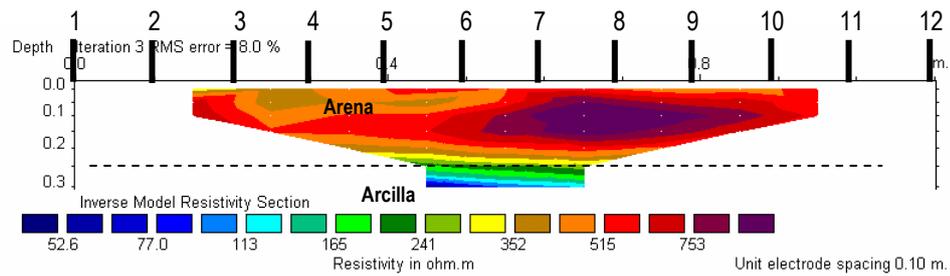
La explicación que se le da a la presencia de esa anomalía positiva es el desigual reparto en la humedad dentro del estrato de arena. Supuestamente esa zona de resistividad alta se corresponde con la zona de mínima humedad en el estrato arenoso. Tras el ensayo se han tomado muestras de arena para el cálculo de la humedad, obteniendo un máximo de $w=9,1\%$ a 10 cm de profundidad bajo el electrodo nº4, y un mínimo de $w=5,3\%$ a 15 cm bajo el electrodo nº8.

En la base se diferencia un nivel con resistividad menor de 70 ohm.m, que se corresponde con la arcilla húmeda del sustrato. Su ensayo de humedad dio un resultado de $w=22,4\%$.

El contacto entre la formación de arena y la de arcilla se marca en la inflexión de resistividad, a profundidad 0,25 m. Es un contacto horizontal y queda delimitado por el nivel de 200 ohm.m

Conclusiones

1.- El método localiza y sitúa correctamente el contacto entre la formación de arena y la formación de arcilla, situando el límite de ambas formaciones en la franja de transición de resistividades, una línea horizontal a resistividad 200 ohm.m



2.- El estrato de arena se representa como una mancha uniforme de valores de alta resistividad, siempre mayores a 350 ohm.m. No tiene anomalías con formas concretas y definidas. La zona de máximos de resistividad se interpreta como la zona mínima humedad de la arena en esa zona.

3.- Hay una relación directa entre el porcentaje de humedad y el valor de la resistividad. A mayor humedad menor resistividad. El mayor contraste en el perfil se observa en el contacto arena-arcilla, bajo el electrodo nº7, donde se observa un brusco tránsito vertical de valores de 60 ohm.m a 30 cm de profundidad hasta 800 ohm.m a apenas 15 cm.

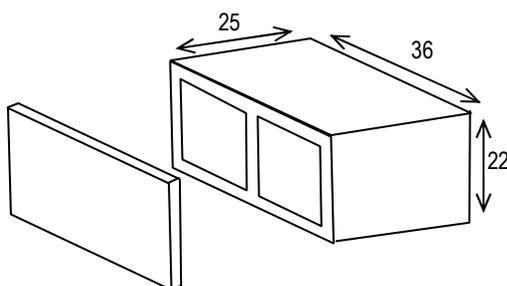
5.3.3 EXPERIENCIA 1: BLOQUE HUECO DE HORMIGÓN

En esta primera experiencia se explica un ensayo realizado sobre el estrato de arena sin la presencia de objetos enterrados que simulen huecos. Se ha empleado el dispositivo Dipolo-dipolo.

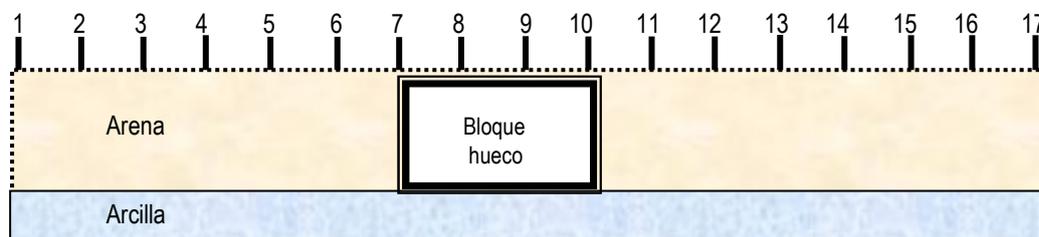
Modelo

El modelo simula un gran hueco en el terreno que abarca todo el estrato compuesto por arenas, con su base en el contacto arena-arcilla. Para esta primera experiencia se ha seleccionado un hueco de grandes dimensiones, en concreto la dimensión de la cavidad será 3 veces la separación interelectródica. El hueco se simulará con un bloque construido en microhormigón.

La separación entre electrodos es de 10 cm, y las dimensiones del bloque son las dimensiones que a continuación se detallan (mediciones en cm):



Para evitar que entrara arena al interior del bloque y, por consiguiente, pierda las características de hueco dieléctrico, se colocaron dos losas laterales de 36 cm x 22 cm x 3 cm. Estas losas incrementan el ancho del bloque hasta 31 cm (25+3+3). El bloque se colocó centrado bajo los electrodos nº8 y nº9. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. Finalmente el hueco será simulado por un bloque con dimensiones exteriores 31 cm de ancho por 22 cm de alto.



La profundidad es prácticamente nula, 3 cm, que es la parte de arena donde se hincan los electrodos. La relación entre la profundidad (P) y el diámetro del hueco (D_h) es de 0,1: $P=3$ cm, $D_h=30$ cm; $3/30=0,1$; $P = 0,1 D_h$.

Mediciones

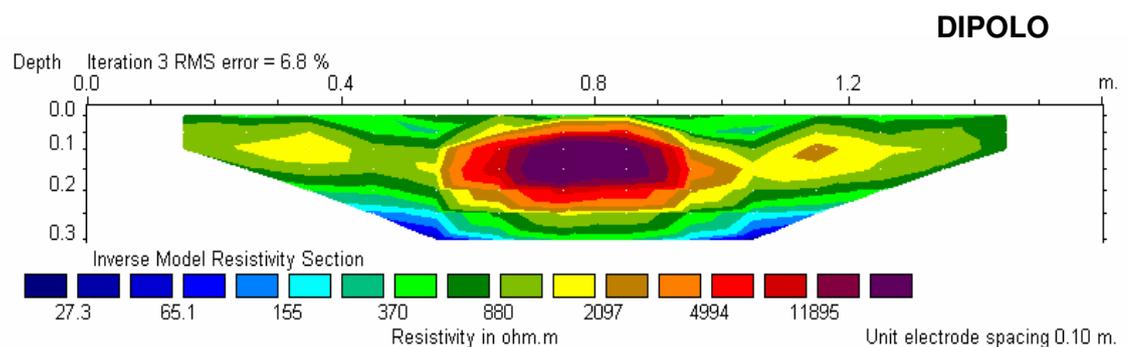
Se ha realizado un solo perfil mediante dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm.

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores excepcionalmente altos de resistividad (> de 11.800 ohm.m), debido al carácter dieléctrico del aire que ocupa el interior del hueco. Destaca con sorprendente claridad la gran resolución con que se define la forma rectangular del hueco. En la imagen se ha superpuesto la posición real del bloque de hormigón, centrado bajo los electrodos nº8 y nº9, y se puede comprobar cómo el encaje de la anomalía es perfecto, también centrada bajo dichos electrodos.



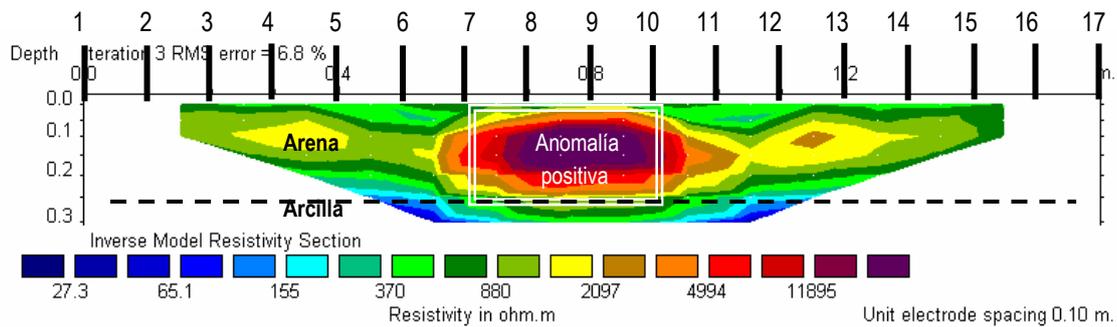
Las dimensiones de la anomalía coinciden en gran medida con el volumen interior del bloque de hormigón. Se admite, por tanto, que las paredes de hormigón se comportan como materiales con valores muy altos de resistividad, en torno a 2000 ohm.m, ya que el perímetro de la imagen resistiva (colores amarillo y pardo) representan esos valores.



Conclusiones

1.- El ratio 1/3 (en la relación espacial Distancia entre electrodos / Diámetro del hueco) se muestra como muy óptimo para la localización de huecos. En próximas experiencias se irá disminuyendo el diámetro del hueco hasta definir el ratio D_{el}/D_h en que se pierde la resolución.

2.- Los huecos situados en posiciones próximas a la superficie se localizan de una manera muy eficiente.



5.3.4 EXPERIENCIA 2: BLOQUE HUECO DE CERÁMICA

Este apartado incluye dos ensayos realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

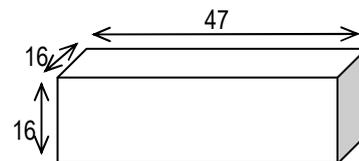
5.3.4.1 BLOQUE HUECO DE CERÁMICA -Dispositivo Wenner-

5.3.4.2 BLOQUE HUECO DE CERÁMICA -Dispositivo Dipolo-dipolo-

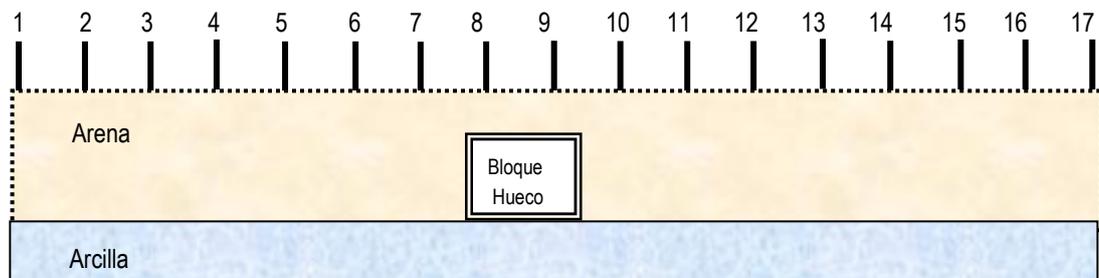
Modelo

El modelo simula un hueco de menores dimensiones al ensayado en la experiencia 1. Si en el caso anterior se ensayó con un hueco que abarcaba todo el espesor del estrato compuesto por arenas, con su base en el contacto arena-arcilla, en este caso se simula un hueco cuya altura ocupe el 60% de la franja de arena. Como el estrato de arena tiene un espesor de 25 cm, se ha determinado enterrar un objeto cuyo diámetro de hueco sea 15 cm. En esta ocasión el ratio D_{el}/D_h será 1/1,5, es decir, el diámetro del hueco es 1,5 veces la separación interelectródica. El hueco se simulará con un bloque construido en cerámica.

La separación entre electrodos es de 10 cm, y tomaremos un bloque con las dimensiones que a continuación se detalla (mediciones en cm):



Para evitar que entrara arena al interior del bloque se colocaron dos baldosas de espesor despreciable en ambos extremos. El bloque se colocó centrado bajo los electrodos nº8 y nº9. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. El hueco simulado tendrá forma cuadrada y dimensiones 16 cm de ancho por 16 cm de alto, y tiene un espesor de recubrimiento de 10 cm de arena. La profundidad $P=10$ cm, $D_h=15$ cm; $10/15=0,6$; $P = 0,6 D_h$.



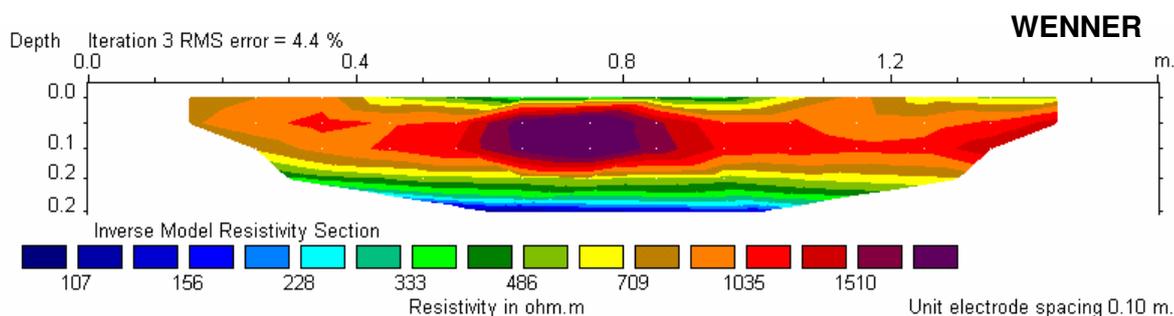
Mediciones

Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm

5.3.4.1 BLOQUE HUECO DE CERÁMICA -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.500 ohm.m) debido al carácter dieléctrico del aire que ocupa el interior del hueco. La sección de forma cuadrada que en realidad tiene el hueco queda representada como una imagen rectangular. El eje horizontal de dicha anomalía aparece exagerado con respecto a la realidad, pasando de los 16 cm que tiene la dimensión real a 24 cm en la imagen. Por el contrario, la dimensión vertical de la anomalía es aproximadamente la mitad del real.



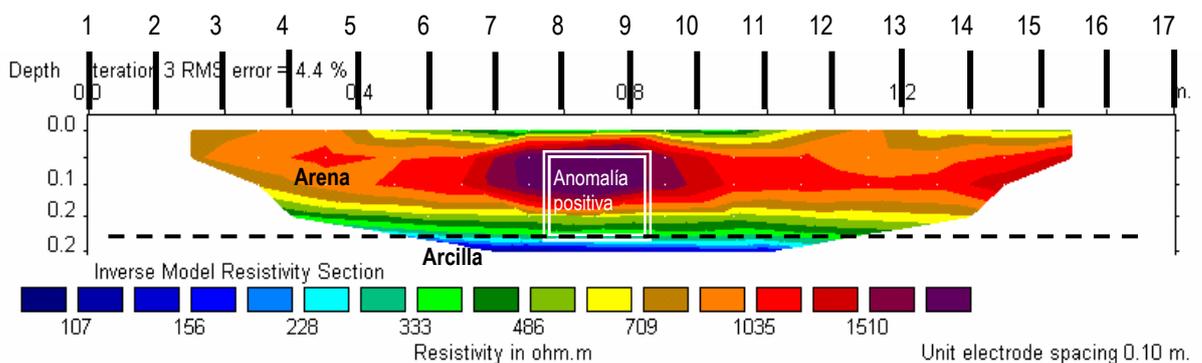
También cabe destacar el desplazamiento hacia la superficie del centro de la anomalía resistiva con respecto al centro real de la cavidad. En la imagen se ha superpuesto la posición real del bloque de hormigón, centrado bajo los electrodos nº8 y nº9, y se puede comprobar cómo el encaje de la anomalía está correctamente localizado bajo dichos electrodos, pero es incorrecto con respecto a la profundidad. La imagen del perfil de tomografía se ha desplazado hacia la superficie una distancia proporcional a la mitad del diámetro del hueco (8 cm).



Conclusiones

1.- El ratio $D_{el}/D_h = 1/1,5$ en dispositivo Wenner se muestra como óptimo para la localización de huecos, pero con ciertas reservas respecto a su tamaño exacto y posición. Se comprueba que un diámetro del hueco (D_h) similar a la distancia de espaciado entre electrodos (D_{el}) genera una imagen de tomografía eléctrica adecuada. La posición horizontal del hueco no sufre variaciones, y se localiza con extraordinaria eficacia perfectamente coincidente con la posición real del hueco del modelo (bajo electrodos nº8 y nº9).

2.- La profundidad de la anomalía representada en el perfil no se corresponde con la profundidad real del hueco. Se puede concluir, a la espera de nuevas experiencias, que el centro geométrico de la anomalía de resistividad que figura en el perfil de tomografía ha sufrido una traslación de 8 cm hacia la superficie, con respecto a la posición del centro geométrico verdadero del hueco que ha originado esa anomalía. Dicha traslación es aproximadamente 1/2 del valor del diámetro del hueco (en este caso 16 cm).



3.- Los valores de resistividad de la anomalía han disminuido bruscamente con respecto a los medidos en la experiencia 1. De más de 11.800 ohm.m se han observado aquí más de 1.500 ohm.m. Se puede relacionar este resultado con dos variables:

Por un lado, un menor diámetro del hueco, que se traduce en una menor deformación de las líneas de corriente eléctrica y por lo tanto un menor incremento en la resistencia del terreno. El recorrido de las líneas de corriente es, en este caso, más parecido a la trayectoria natural que hubieran seguido dichas líneas en un terreno homogéneo que hubiera estado carente de obstáculos.

Por otra parte, la mayor profundidad del hueco, y en consecuencia una mayor cobertura de recubrimiento del hueco, que hace que las líneas de corriente eléctrica puedan tomar ese camino alternativo al de la zona ocupada por la oquedad.

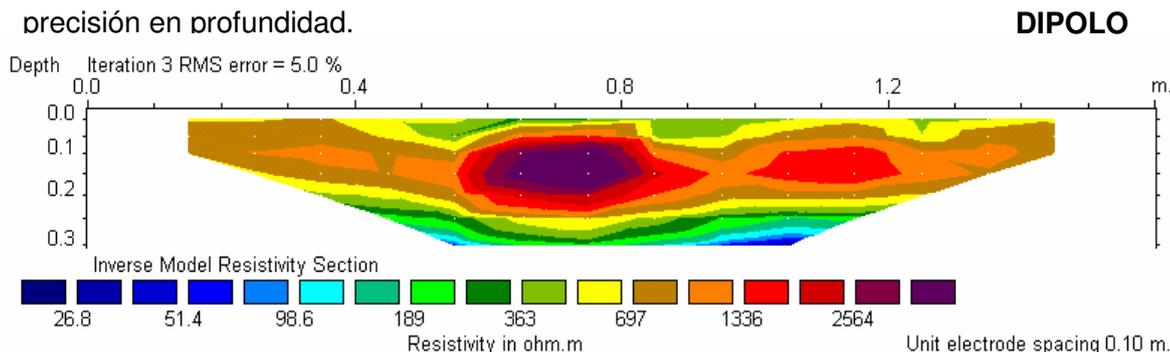
También podría influir que un hueco con menor diámetro representa un menor volumen de material de alta resistividad (el aire) por lo que su influencia en la resistividad del resto del perfil es menor.

5.3.4.2 BLOQUE HUECO DE CERÁMICA -Dispositivo Dipolo-dipolo

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 2.500 ohm.m) bajo los electrodos situados a 0,6 m y 0,8 m del perfil. La sección de forma cuadrada que en realidad tiene el hueco queda representada como una imagen rectangular. El eje horizontal de dicha anomalía se exagera ligeramente unos 6 cm con respecto a la dimensión real. Sin embargo, la dimensión vertical de la anomalía se ajusta bien al valor real.

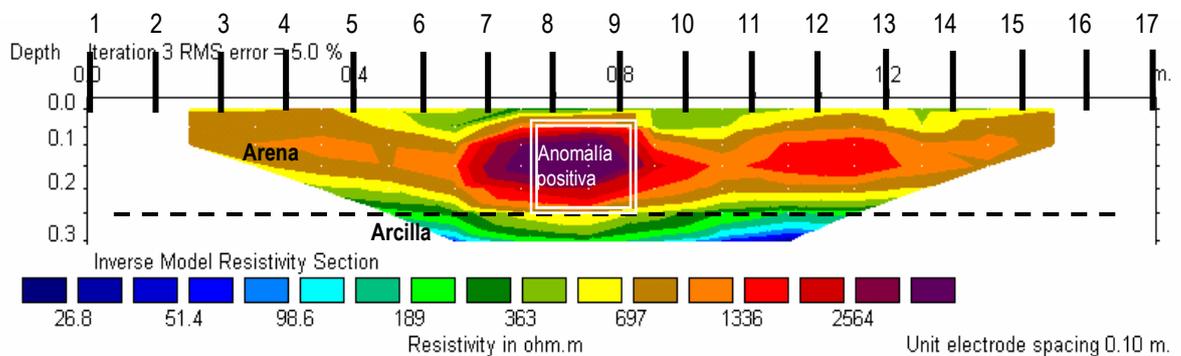
En este caso y a diferencia de lo que ocurre con el dispositivo Wenner, la anomalía de resistividad representada en el perfil se ajusta bien a la posición del hueco real. Únicamente se observa un ligero desplazamiento hacia el electrodo nº8 de apenas 4 cm, error más que aceptable. En la imagen se ha superpuesto la posición real del bloque de hormigón, centrado bajo los electrodos nº8 y nº9, y se puede comprobar cómo la anomalía está perfectamente dibujada bajo dichos electrodos, con gran precisión en profundidad.



Conclusiones

1.- El ratio $D_{el}/D_h = 1/1,5$ en dispositivo Dipolo-dipolo se muestra como óptimo para la localización de huecos, proporcionando un buen ajuste en cuanto al tamaño y posición de los huecos. En comparación con el caso anterior, se comprueba que el dispositivo Wenner con el mismo espaciado entre electrodos presenta una mayor inexactitud en cuanto a la profundidad del centro del hueco. La posición horizontal del hueco sufre un ligero desplazamiento hacia la izquierda que puede encajarse dentro de los márgenes de error admisibles.

2.- La profundidad de la capa de arcillas se localiza en ambos casos correctamente y con gran precisión.



3.- Los valores de resistividad de la anomalía han aumentado con respecto a los medidos en la experiencia Wenner. De más de 1500 ohm.m en el caso anterior se ha pasado a más de 2.500 ohm.m en éste. Se puede relacionar este resultado con la misma naturaleza del dispositivo. En el dispositivo Wenner las afectadas por la presencia de la cavidad son las líneas de corriente eléctrica inyectada. En este dispositivo Dipolo-dipolo son las superficies de equipotencial las que alteran su trayectoria por la presencia del hueco. Además, el dispositivo doble dipolo adquiere 90 medidas de resistividad repartidas en 9 niveles, mientras que el dispositivo Wenner tan sólo toma 40 en 5 niveles. La mayor densidad de datos en el dispositivo Dipolo-dipolo redonda en una mayor precisión de sus perfiles para este tipo de objetivos.

5.3.5 EXPERIENCIA 3: BOVEDILLA VERTICAL

Este apartado incluye los ensayos de la experiencia 3 realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

- 5.3.5.1. Bovedilla vertical relleno aire
- 5.3.5.2. Bovedilla vertical relleno agua -inmediato-
- 5.3.5.3. Bovedilla vertical relleno agua -tras 24 horas-
- 5.3.5.4. Bovedilla vertical relleno aire -vaciado inmediato-

Modelo

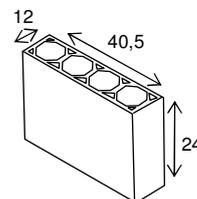
Esta experiencia pretende estudiar la variación de la respuesta eléctrica en perfiles de tomografía realizados sobre huecos que unas veces están vacíos (reellenos de aire) y en otras ocasiones se encuentran inundados (reellenos de agua). Esta situación es frecuente en acuíferos kársticos, cuyas galerías y cavidades pueden estar o no inundadas de agua en función de las variaciones del nivel piezométrico. Por lo tanto, el modelo representa una cavidad en el terreno que sufre un ciclo de llenado y vaciado de agua.

Teóricamente, si la cavidad está rellena de aire el perfil presentará una anomalía de alta resistividad y cuando está rellena de agua se tendrá una anomalía de baja resistividad. Este modelo en concreto representa una cavidad en el estrato de arena, con forma de franja vertical. La experiencia pretende determinar la respuesta eléctrica del terreno en tres situaciones distintas: 1º cuando la cavidad está ocupada por aire, 2º cuando la cavidad está rellena de agua y 3º con la cavidad ocupada por aire tras un vaciado inmediato.

Para realizar esta experiencia se ha de emplear un bloque cuyas paredes permitan el paso de la corriente eléctrica una vez esté relleno de agua. Finalmente se utilizó una bovedilla de cerámica, compuesta por minerales silicatados, similares a los silicatos del estrato de arena, aunque ciertamente con mucha menor porosidad.

La bovedilla se colocó en posición vertical para simular el hueco. Como ambos laterales son abiertos se hincó sobre el estrato de arcilla el lateral que queda en posición inferior. De este modo se consigue cerrar el fondo de la bovedilla con suficiente estanqueidad para la parte del ensayo en que su interior se rellena de agua.

La separación entre electrodos es de 10 cm, y las dimensiones de la bovedilla son 40,5 x 25 x 12 (mediciones en cm):



El espesor de las paredes de cerámica es de 1 cm, por cuanto la anchura del hueco interior es 10 cm. La bovedilla quedará recubierta por 4 cm de arena que se apoya sobre unas losas para que no entre en los huecos. La bovedilla se colocó centrada bajo los electrodos nº8 y nº9.

El hueco final será simulado por un bloque con dimensiones interiores 10 cm de ancho por 20 cm de alto (4 cm menos de altura que son los que se hincan en el sustrato arcilloso). El diámetro interno medio será $D_m = (10+20) / 2 = 15$ cm, por cuanto en esta ocasión se tendrá un ratio $D_e/D_h = 1/1,5$, como en la experiencia 2 (apartado 5.3.4). La profundidad a considerar será la del techo del diámetro medio, que se calculará manteniendo el centro geométrico del hueco, es decir: $10 - 7,5 = 2,5$ cm. Por lo tanto $P = 2,5$ cm, $D_h = 15$ cm; $2,5/15 = 0,16$; $P = 0,16 D_h$.

La bovedilla tiene unos nervios internos que ponen en contacto ambas caras, lo que aporta una mayor similitud con las condiciones reales del terreno kárstico, donde las cavidades suelen alternar con matriz rocosa continua. Ha de preverse que el material del que está hecha la bovedilla tiene su propio valor de conductividad, y que una parte de la corriente eléctrica será conducida de un lado a otro a través de los nervios internos. Esto implica que la anomalía esperada es menor de la que podría originar una franja hueca continua.

Mediciones

La experiencia 3 consta de cuatro ensayos, completando un total de ocho perfiles, cuatro mediante dispositivo Wenner y cuatro mediante dispositivo Dipolo-dipolo. Cada perfil Wenner contiene 40 medidas repartidas en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm. Los perfiles Dipolo-dipolo realizan 90 medidas en 9 niveles que alcanzan una profundidad de investigación de 30 cm.

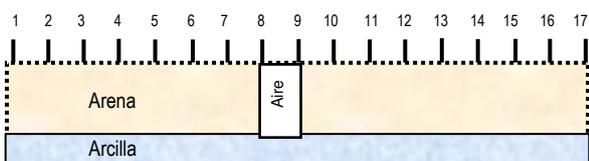
El primer ensayo, denominado 3 -a-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco de 12 cm relleno de aire y comparar esta imagen con la obtenida en la experiencia 2 ya que se trata de dos huecos similares en tamaño pero con diferente forma. En este caso se tiene un ratio $D_e/D_h = 1$.

El segundo ensayo, denominado 3 -b-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco de 12 cm relleno de agua y comparar esta imagen con la obtenida en el ensayo 3 -a-. De este modo se podrá ver la diferencia que hay entre la respuesta eléctrica de un mismo hueco relleno de aire y agua.

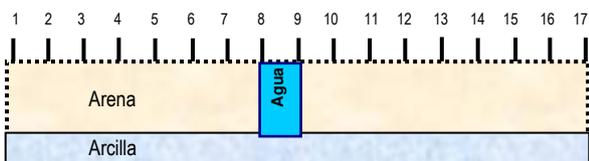
El tercer ensayo, 3 -c-, es idéntico al 3 -b- pero realizado 24 horas después. Se pretende comparar esta imagen con las anteriores para determinar si pudieran detectarse filtraciones de agua hacia la arena o la saturación de las arcillas del fondo.

Por último, el ensayo 3 -d- intentará demostrar que la anomalía de baja resistividad presente en los perfiles del ensayo 3 -c- es realmente producida por el agua que rellena el hueco. En este ensayo se vaciará el agua que contienen las bovedillas e inmediatamente después se realizarán otros dos perfiles, uno Wenner y otro Dipolo-dipolo. También se podrá comparar esta imagen con la obtenida en el ensayo 3 -a- para observar si el agua que impregna el interior del hueco y que en parte ha ocupado la porosidad de la bovedilla influye en el comportamiento eléctrico del conjunto, disminuyendo el valor de la resistividad con respecto a la que tenía en 3 -a-.

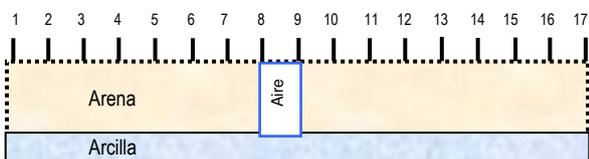
SECUENCIA DE ENSAYOS EN LA EXPERIENCIA 3: BOVEDILLA VERTICAL



Ensayo 3 -a-
Bovedilla vertical relleno aire



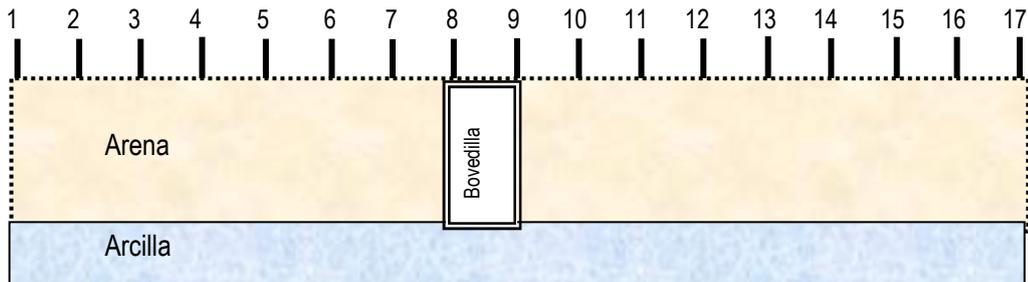
Ensayo 3 -b-
Bovedilla vertical relleno agua-inmediato-
Ensayo 3 -c-
Bovedilla vertical relleno agua -tras 24 horas-



Ensayo 3 -d-
Bovedilla vertical relleno aire -vaciado inmediato-

5.3.5.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AIRE

Se describe aquí el ensayo 3 -a- de la experiencia 3: Bovedilla vertical. Como se ha comentado anteriormente, las imágenes aquí obtenidas podrán compararse con las vistas en la experiencia 2 manteniendo el tamaño del hueco pero cambiando su forma. En la experiencia 2 se simuló un hueco con forma cuadrada pero aquí se experimenta una forma rectangular.

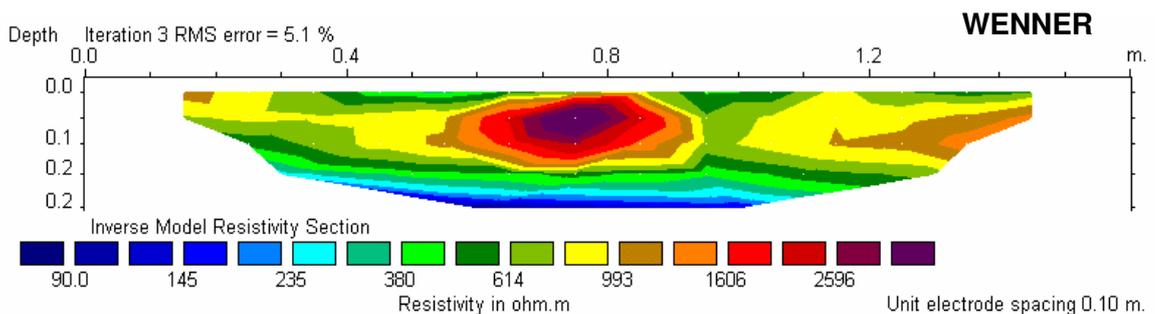


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

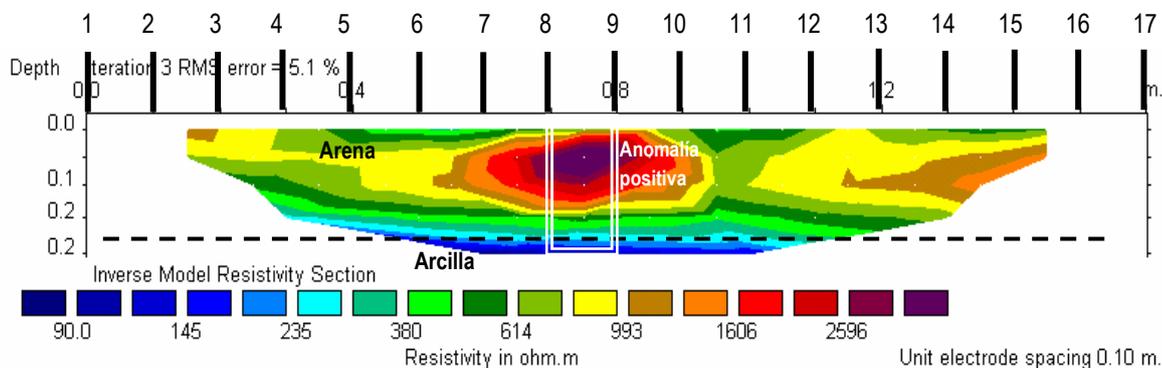
5.3.5.1.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AIRE -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad ($>$ de 2.600 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9, pero su forma no se corresponde con la forma del hueco. La anomalía positiva tiene forma de elipse con su eje mayor en posición horizontal. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 2.000 ohm.m, se puede decir que tiene un tamaño y forma proporcionales al tamaño del hueco de la bovedilla, pero girada 90°. El centro de la anomalía está situado a 12 cm de profundidad, tiene un eje mayor de 18 cm y el menor de 8 cm y su límite inferior está a 16 cm de profundidad. El centro del hueco real también se encuentra a 12 cm de profundidad.



El eje horizontal de dicha anomalía aparece exagerado con respecto a la realidad, pasando de los 10 cm que tiene en realidad el hueco a 18 cm en la imagen. Por el contrario, su dimensión vertical es tres veces menor que la real.



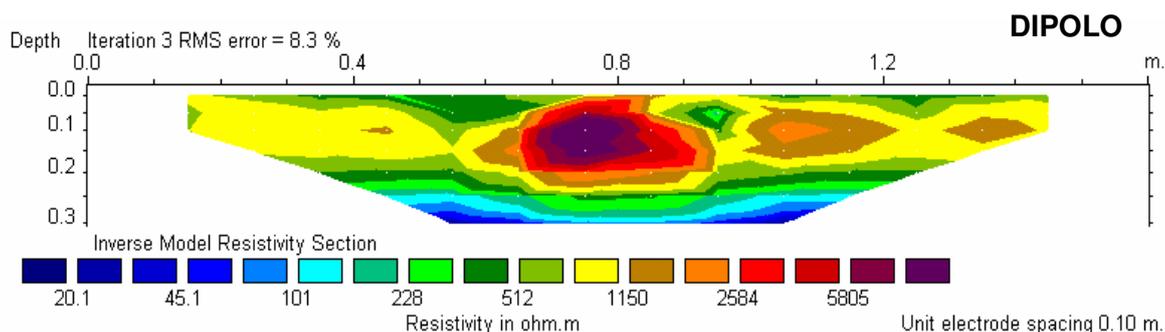
Conclusiones

- 1.- El dispositivo Wenner detecta muy bien la existencia de una franja hueca vertical, pero deformando la imagen como si de una rotación de 90º se tratara.
- 2.- El centro del hueco está situado en las mismas coordenadas distancia/profundidad que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1) y a 12 cm de profundidad.

5.3.5.2.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AIRE -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 2.600 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9, pero su forma no se corresponde con la forma del hueco. La anomalía positiva tiene forma circular perfectamente centrada en la posición del hueco. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 2.000 ohm.m, se puede decir que tiene una dimensión vertical bien ajustada al tamaño del hueco de la bovedilla, pero que está duplicada su anchura.

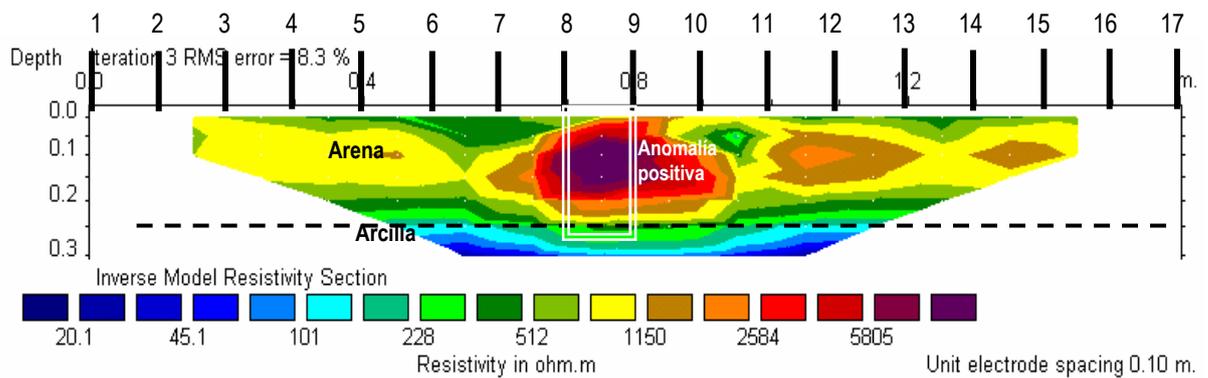


El centro de la anomalía está perfectamente situado a 12 cm de profundidad, y tiene un diámetro de unos 20 cm. El centro del hueco real también se encuentra a 12 cm de profundidad.

Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la existencia de una franja hueca vertical, pero a imagen de resistividad exagera al doble el espesor de la dimensión real.

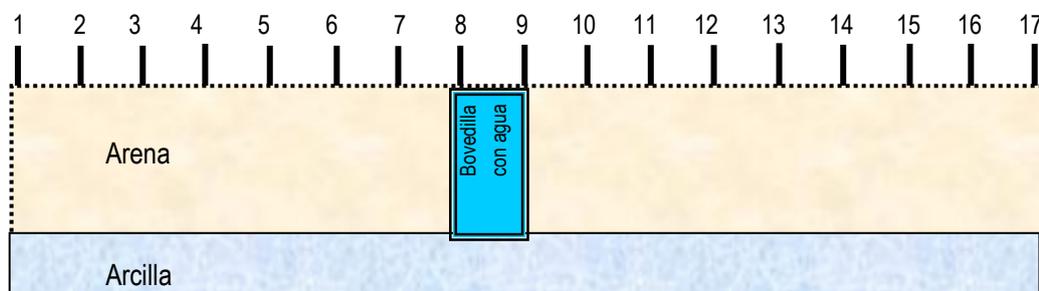
2.- El centro del hueco se está situado en las mismas coordenadas distancia/profundidad que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1) y a 12 cm de profundidad.



5.3.5.2 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -inmediato-

A continuación se describe el ensayo 3 -b- de la experiencia 3: Bovedilla vertical con relleno de agua y adquisición de medidas de inmediato, es decir, no se dejará que transcurra el tiempo desde que se rellene la bovedilla hasta la ejecución de los perfiles de tomografía. Las imágenes que sean obtenidas aquí podrán ser comparadas con el ensayo 3 -a-.

Se va a simular el relleno con agua de un hueco en el terreno y se va a comparar esa respuesta eléctrica con la imagen del ensayo anterior. Se supone que las paredes del hueco son de una roca con permeabilidad muy baja o incluso nula, como ocurre con cavidades en roca caliza de textura micrítica y sin porosidad secundaria.



Debido al carácter conductor del agua, el resultado esperado es una anomalía negativa bajo los electrodos nº8 y nº9, donde está situada la bovedilla completamente rellena de agua.

Este mismo ensayo se realizará a las 24 horas, para comparar las imágenes y comprobar si se puede detectar alguna variación por filtración del agua hacia el estrato de arenas o arcillas.

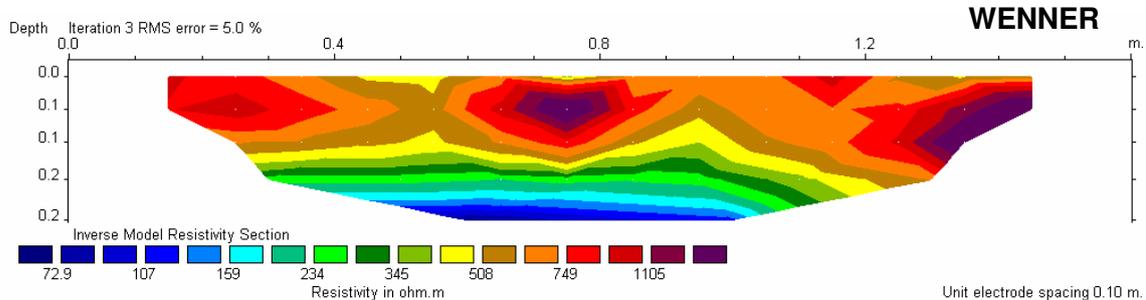
Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.5.2.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -inmediato- -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.100 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9. El resultado es contradictorio con la predicción formulada, ya que en el lugar donde

aparece la anomalía positiva se esperaba encontrar una anomalía negativa. De cualquier modo se comprueba que la anomalía positiva tiene un valor mucho menor que el obtenido en el ensayo 3 -a-, y ha bajado la resistividad del hueco de 2.600 ohm.m a 1.100 ohm.m.



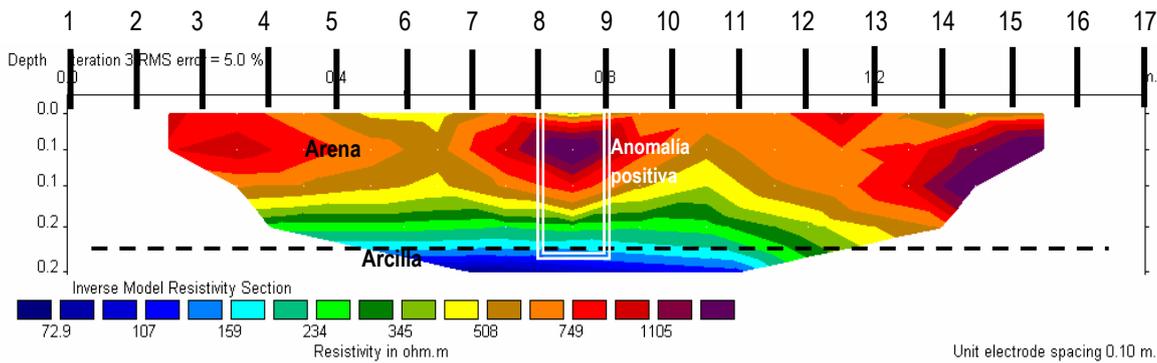
La forma y posición de la anomalía sigue siendo la misma, con forma elíptica, con su eje mayor en posición horizontal. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 1.100 ohm.m se puede decir que tiene un tamaño y forma proporcionales al tamaño del hueco de la bovedilla, pero girada 90°. El centro de la anomalía está situado a 12 cm de profundidad, tiene un eje mayor de 18 cm y el menor de 8 cm y su límite inferior está a 16 cm de profundidad. El centro del hueco real también se encuentra a 12 cm de profundidad.

Conclusiones

1.- Este perfil es muy similar al del ensayo 3 -a-, a pesar de haber sustituido el relleno dieléctrico del aire por uno conductor de agua. La anomalía positiva del perfil es generada por las paredes de cerámica de la bovedilla, con resistividad alta. Al rellenar la cavidad de agua se ha mejorado la comunicación eléctrica a su través, pero las trayectorias de las líneas de corriente se ven condicionadas por las paredes de la bovedilla que, al tener una permeabilidad muy baja, continúa teniendo sus poros rellenos de aire.

2.- Se vuelve a comprobar que el dispositivo Wenner detecta muy bien la existencia de una franja hueca vertical, pero deformando la imagen como si de una rotación de 90° se tratara.

3.- El centro del hueco se está situado en las mismas coordenadas distancia/profundidad que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1) y a 12 cm de profundidad.



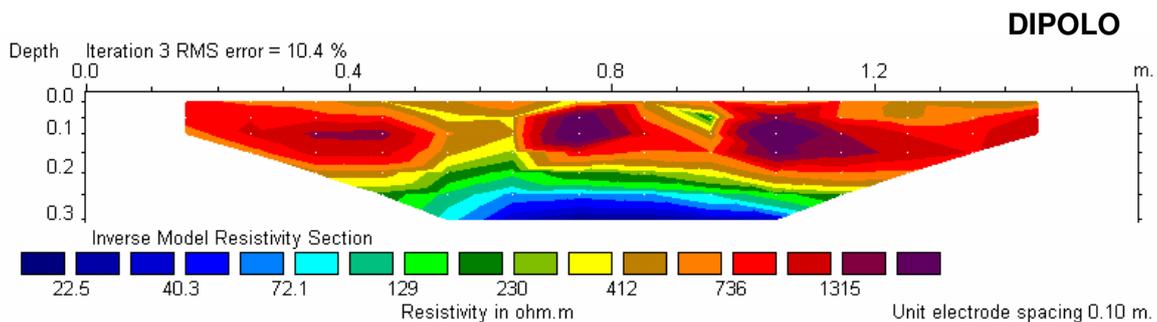
5.3.5.2.2 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -inmediato- -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.300 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9. El resultado, al igual que con el dispositivo Wenner es contradictorio con la predicción inicial, ya que en el lugar donde aparece la anomalía positiva se esperaba ver una anomalía negativa. De cualquier modo se comprueba que la anomalía positiva tiene un valor mucho menor que el obtenido en el ensayo 3 -a-, y ha bajado la resistividad del hueco de 5.800 ohm.m a 1.300 ohm.m.

La forma y posición de la anomalía sigue siendo la misma, con forma circular pero con un menor diámetro de apenas 10 cm (la mitad que en el ensayo 3 -a-), con su eje mayor en posición horizontal.

Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 1.300 ohm.m, se puede decir que tiene una dimensión bien ajustada al ancho del hueco de la bovedilla, lo que no ocurre con su anchura. El centro de la anomalía está desplazado hacia la superficie situado, en este caso, a 7 cm de profundidad, mientras que el centro del hueco real se encuentra a 12 cm de profundidad.

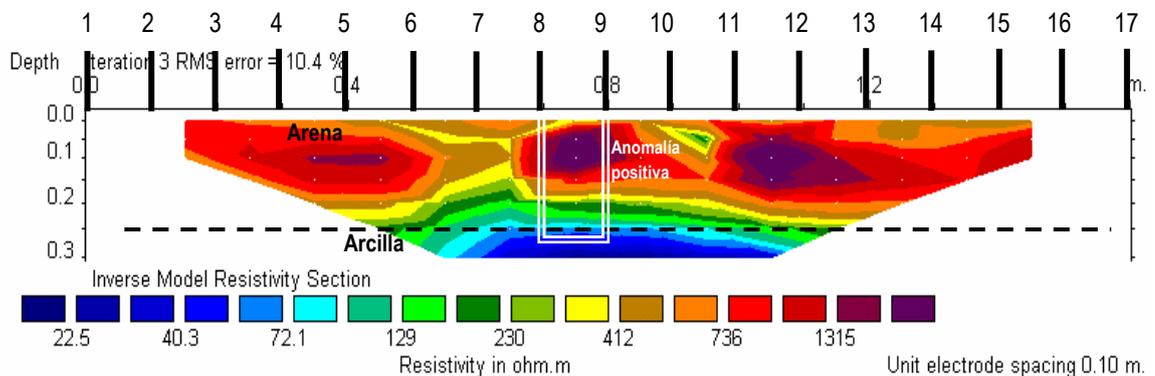


Conclusiones

1.- Este perfil es muy similar al del ensayo 3 -a-, aunque se haya sustituido el relleno dieléctrico del aire por uno conductor de agua. La anomalía positiva del perfil es generada por las paredes de cerámica de la bovedilla, con resistividad alta. Al rellenar la cavidad de agua se mejora la comunicación eléctrica a su través, pero la trayectoria de las líneas de corriente se ve condicionada por las paredes de la bovedilla, que al tener una permeabilidad muy baja continúa teniendo sus poros rellenos de aire.

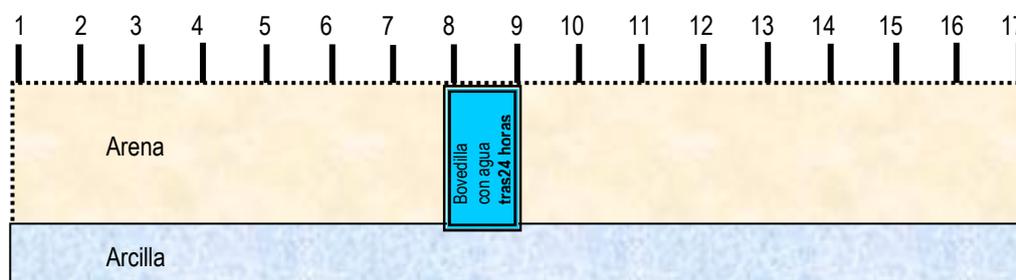
2.- Se vuelve a comprobar que el dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la existencia de una franja hueca vertical y en este caso incluso se ajusta mejor la imagen de resistividad al espesor real de la bovedilla. Sin embargo, la dimensión vertical se reduce a la mitad.

3.- El centro del hueco se está bien situado en la coordenada distancia, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1), pero la profundidad no se señala bien, ya que el centro está desplazado de los 12 cm de profundidad real a los 7 en la imagen del perfil eléctrico.



5.3.5.3 EXPERIENCIA 5: BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -tras 24 horas-

Se describe aquí el ensayo 3 -c- de la experiencia 3: Bovedilla vertical rellena por agua durante 24 horas. En este ensayo se va a simular un hueco que ha permanecido relleno con agua un tiempo considerable. El ensayo 3 -b- sorprendió con anomalías positivas de resistividad (aunque de valores inferiores al ensayo 3-a-) en lugar de valores bajos, como era de suponer para un relleno de agua. En el ensayo 3-a- se relacionó ese valor de alta resistividad con la baja permeabilidad de las paredes de cerámica de la bovedilla, lo que mantuvo a los poros de la cerámica rellenos de aire, actuando de ese modo como barrera a la corriente eléctrica.

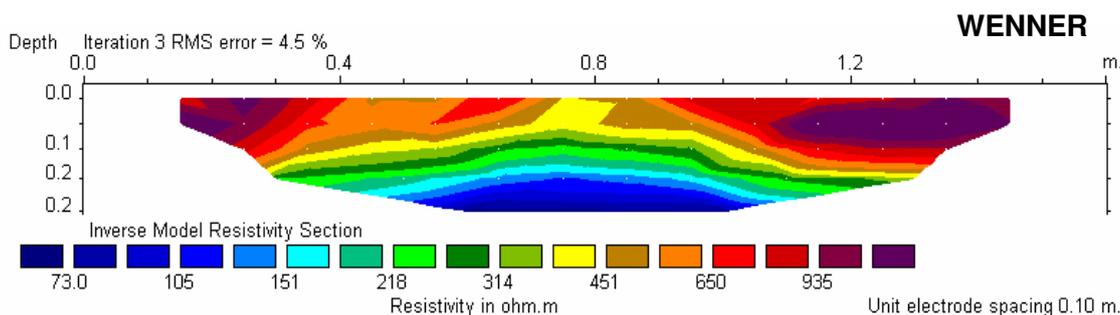


Este mismo ensayo 3 -c- se ha realizado 24 horas después de haber relleno los huecos para el ensayo 3 -b-, y tras comprobar que las filtraciones habían sido mínimas. Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.5.3.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -tras 24 horas- -Dispositivo Wenner-

Resultados

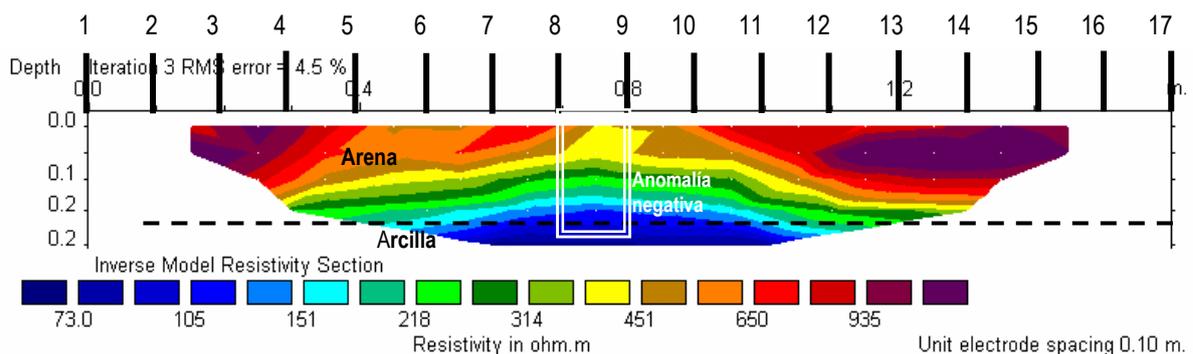
Se puede apreciar cómo la anomalía positiva que aparecía en el ensayo 3 -b- ha desaparecido y en su lugar se contempla un bandeado con forma de joroba (convexo hacia arriba) con valores bajos de resistividad (< de 400 ohm.m).



La cresta de esa "joroba" de resistividad baja señala exactamente la posición de la bovedilla, a 0.75 m del electrodo 1. Por lo tanto, la anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9, y en esta ocasión el resultado ratifica la predicción, ya que aparece una anomalía negativa, como le corresponde a un relleno conductor como el agua.

La posición de la anomalía coincide perfectamente con la posición del hueco. Algo más extraña es su forma, que no abarca un área cerrada como en ocasiones anteriores, sino que presenta una forma cóncava, como si se tratara de una deformación ascendente del sustrato de arcilla hacia el estrato de arena.

Puesto que en este caso no aparece en la imagen un área cerrada, no se puede estimar la profundidad de la anomalía, si bien es de destacar que la cresta de su forma convexa llega hasta la superficie del estrato de arena. A la espera de nuevas experiencias, podría estimarse que el techo de la cavidad queda definido por la posición de ese punto de máxima curvatura.



Conclusiones

1.- En comparación con el perfil Wenner del ensayo 3 -b-, se puede ver cómo en este caso si se obtiene una anomalía negativa en respuesta al relleno de agua del hueco. En este caso, al esperar 24 horas desde que se rellenara el hueco, las paredes de cerámica de la bovedilla han absorbido suficiente agua como para bajar su resistencia al paso de la corriente eléctrica. El relleno de agua mejora la comunicación eléctrica a través del hueco.

2.- El dispositivo Wenner detecta bien la existencia de una franja vertical rellena de agua. La imagen resultante es una anomalía negativa con forma de joroba, es decir, convexa hacia arriba.

3.- La cresta de la curvatura señala la posición de la coordenada horizontal del hueco. Se puede estimar, a falta de nuevos ensayos, que el punto de mayor cota de

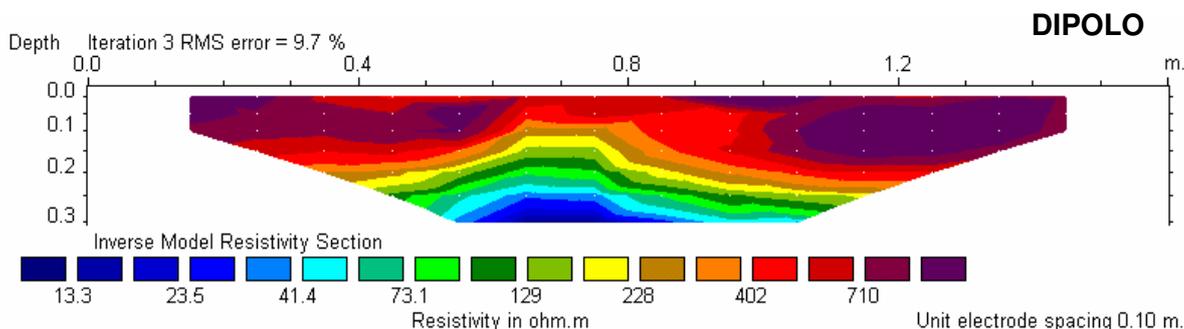
esa forma convexa señala la posición del techo de la cavidad. El límite inferior del hueco queda limitado a aquella profundidad donde los flancos de la curvatura recuperan la horizontalidad, y utilizando como superficie de referencia el contacto límite entre formaciones de diferente resistividad.

5.3.5.3.2 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -tras 24 horas- -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

Se puede observar cómo la anomalía positiva que aparecía en el ensayo 3 -b- ha desaparecido y en su lugar se contempla un bandeado con forma de joroba (convexo hacia arriba) con valores bajos de resistividad (< de 400 ohm.m).

La cresta de esa "joroba" de resistividad baja señala exactamente la posición de la bovedilla, a 0.75 m del electrodo 1. Por lo tanto, la anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9, y en esta ocasión el resultado ratifica la predicción inicial, ya que aparece una anomalía negativa, como le corresponde a un relleno conductor como el agua.

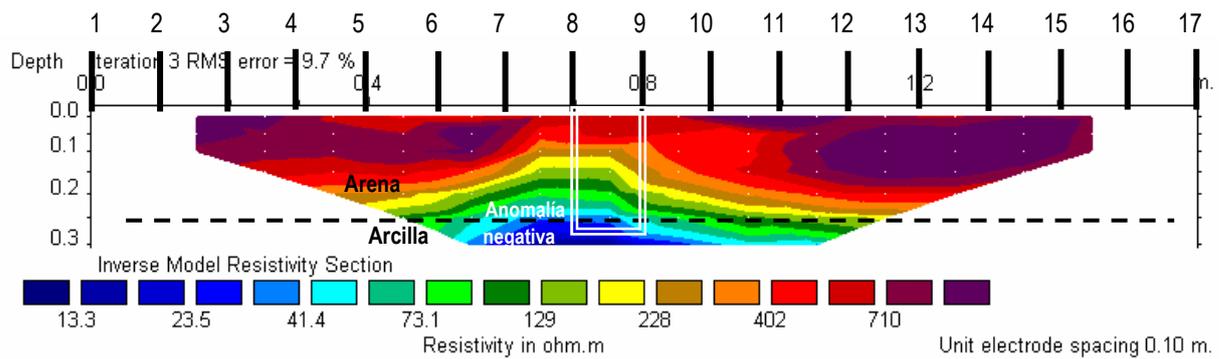


La posición de la anomalía coincide perfectamente con la posición del hueco. Su forma, como en el perfil anterior realizado con dispositivo Wenner, presenta forma cóncava, más clara y acusada en esta ocasión.

Para estimar la profundidad del hueco se mantiene el supuesto del perfil anterior, donde se consideró que el techo de la cavidad quedaba definido por la posición del punto de máxima curvatura en la cresta de la anomalía de forma convexa.

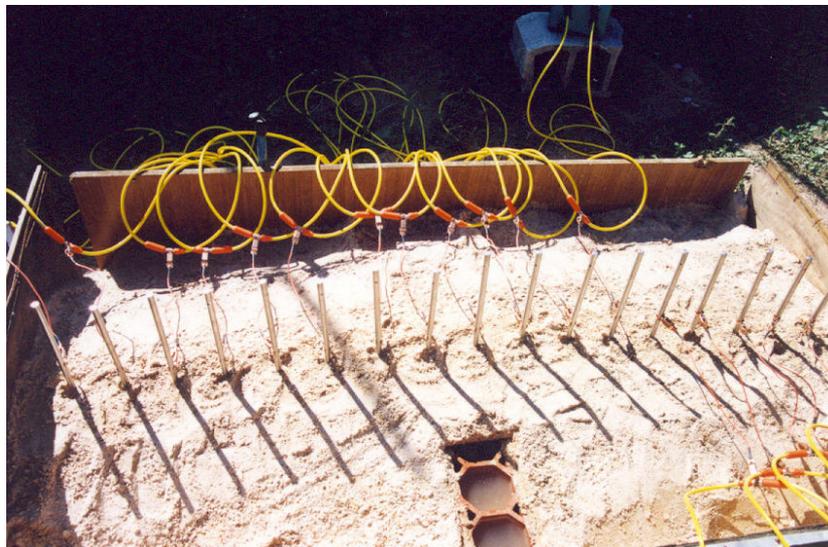
Conclusiones

1.- Se puede decir de este experimento, que cuando existe un hueco relleno de agua en el subsuelo, éste se identifica y localiza en un perfil de tomografía por la posición de una anomalía negativa con forma de joroba o convexa hacia arriba.



2.- Tanto el dispositivo Wenner como el Dipolo-dipolo detectan bien la existencia de huecos rellenos de agua, proporcionando imágenes muy parecidas que requieren la misma interpretación.

3.- La cresta de la curvatura señala la posición de la coordenada horizontal del hueco. Se estima, a falta de nuevos ensayos, que el punto de mayor cota de esa forma convexa señala la posición del techo de la cavidad. El límite inferior del hueco queda limitado a aquella profundidad donde los flancos de la curvatura recuperan la horizontalidad, y utilizando como superficie de referencia el contacto límite entre formaciones de diferente resistividad.



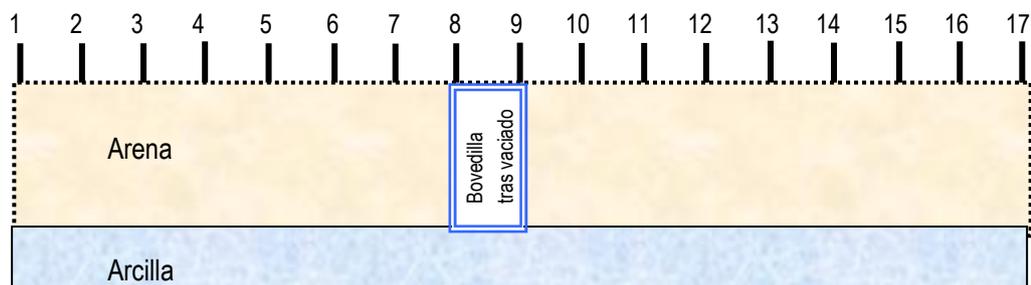
5.3.5.4 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO DE AIRE - vaciado inmediato -

Modelo

A continuación se describe el ensayo 3 -d- de la experiencia 3: Bovedilla vertical con aire, tras vaciar el agua que lo ha rellenado durante 24 horas. En este ensayo se va a evaluar la incidencia en el comportamiento eléctrico del hueco de su vaciado. El agua se ha sacado nada más finalizar el ensayo 3 -c-. De esta manera se podrá ver cómo afecta realmente el agua que ocupa el hueco a la imagen obtenida en el perfil de resistividad.

En los ensayos 3 -a- y 3 -b- las paredes de la bovedilla tenían sus poros con aire, y eso dejaba su huella en las imágenes del perfil generando anomalías positivas.

En esta ocasión se podrá comprobar la verdadera influencia del relleno de agua únicamente, sin que afecte la resistividad de la cerámica que compone la bovedilla que se supone se ha igualado a la de la arena circundante. También se podrá ver la influencia del agua que incluye y recubre los nervios internos que unen ambas caras de la bovedilla.



Este ensayo 3 -d- se ha realizado inmediatamente después de la realización del ensayo 3 -c-, y tras el vaciado de agua de las oquedades. La diferencia entre estos perfiles y los del ensayo 3-a- mostrará la influencia de la humedad que impregna las paredes de los huecos y ocupa parcialmente sus poros.

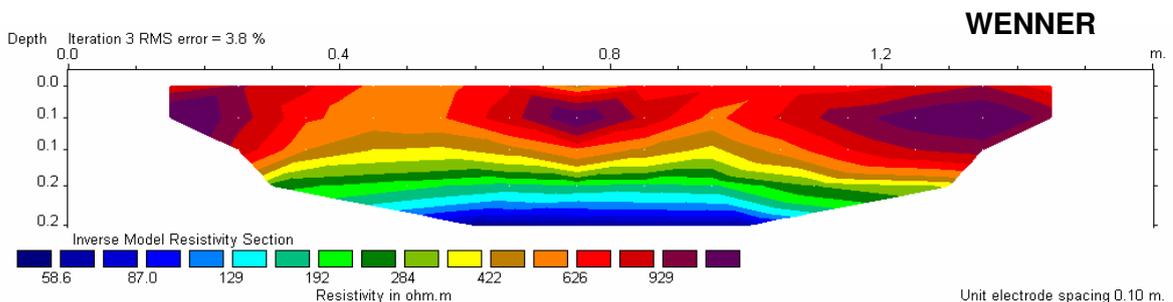
5.3.5.4.1 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO DE AIRE -vaciado inmediato- - Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.100 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9. El resultado es idéntico al obtenido en el perfil Wenner del ensayo 3 -b-, donde

aparecía una anomalía positiva, pero de valor mucho menor que en el ensayo 3 -a-, con resistividades de mayores de 930 ohm.m.

La forma y posición de la anomalía es la misma que en el ensayo 3 -b-, con forma elíptica y su eje mayor en posición horizontal. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 930 ohm.m se puede decir que tiene un tamaño y forma proporcionales al tamaño del hueco de la bovedilla, pero girada 90°. El centro de la anomalía está situado a 12 cm de profundidad, tiene un eje mayor de 18 cm y el menor de 8 cm y su límite inferior está a 16 cm de profundidad. El centro del hueco real también se encuentra a 12 cm de profundidad.

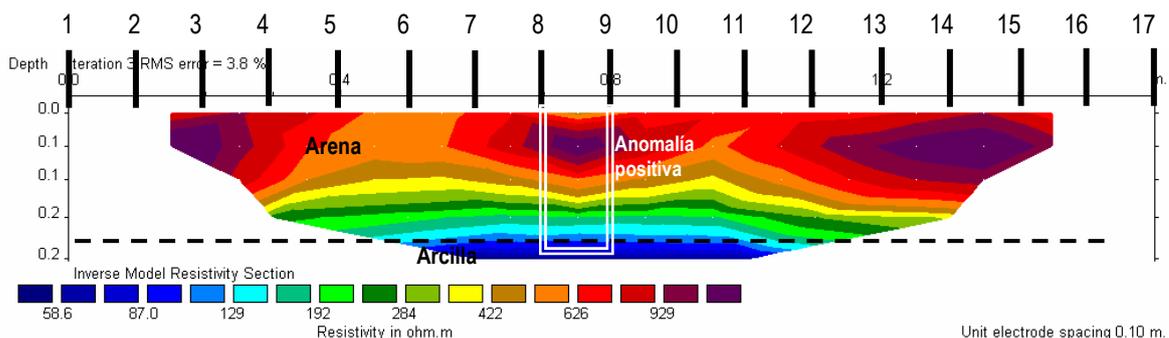


Conclusiones

1.- Este perfil es muy similar al del ensayo 3 -b-, donde la anomalía positiva del perfil es moderadamente alta, en torno a 1.000 ohm.m, mientras que en el ensayo 3 -a- tenía más de 2.600 ohm.m. Al haber estado el interior de la cavidad en contacto de agua, se ha mejorado la comunicación eléctrica a su través, lo que aminora la resistencia eléctrica del hueco.

2.- Se comprueba que cuando un hueco está relleno de agua, presenta una anomalía negativa con forma de joroba, pero cuando el hueco está relleno de aire, presenta una anomalía con forma de elipse cuyo eje mayor toma una orientación horizontal.

3.- El centro del hueco se está situado en las mismas coordenadas distancia/profundidad que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1) y a 12 cm de profundidad.



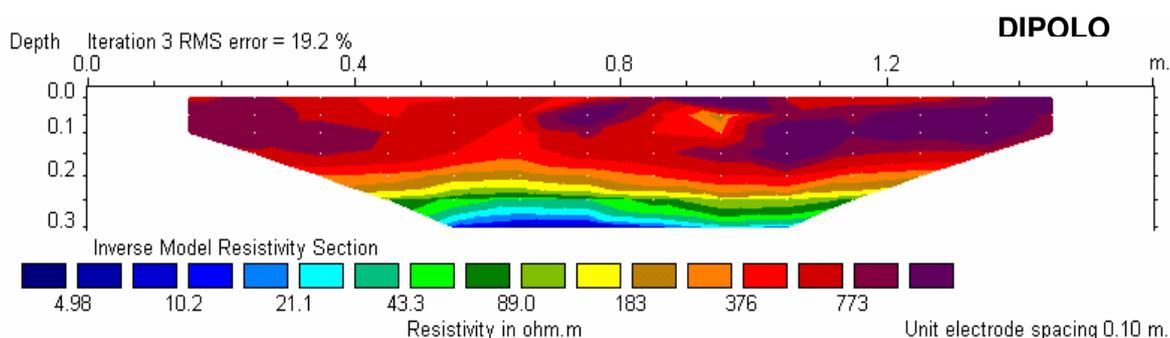
5.3.5.4.2 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AIRE -vaciado inmediato- -
Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el lugar donde antes (ensayo 3 -c-) aparecía una anomalía negativa con forma de joroba ahora aparece una anomalía de valores altos de resistividad (> de 770 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº8 y nº9, lugar que antes era ocupado por la cresta de la "joroba" de baja resistividad. El resultado es similar al obtenido en el perfil Dipolo-dipolo del ensayo 3 -b-, donde la anomalía positiva presentaba valores mucho menores que en el ensayo 3 -a- (de 5.800 ohm.m en 3-a- a 1.300 ohm.m en 3 -b-)

La forma y posición de la anomalía es similar a la del ensayo 3 -b-, aunque mucho pero definida. Tiene tamaño y forma difusos, sin cerrar una forma geométrica definida, si bien se intuye la forma elíptica de eje mayor horizontal que pudimos ver en el ensayo 3 -b-.

El centro de la anomalía está situado a 7 cm de profundidad, tiene un eje mayor horizontal de 14 cm y el menor de 6 cm y su límite inferior está a 10 cm de profundidad. El centro del hueco real también se encuentra a 12 cm de profundidad, lo que demuestra que la anomalía ha sido desplazada hacia arriba. Esto puede deberse a que la base de la bovedilla está casi saturada en agua y eso enmascara los valores de alta resistividad de la base del estrato de arena.



Conclusiones

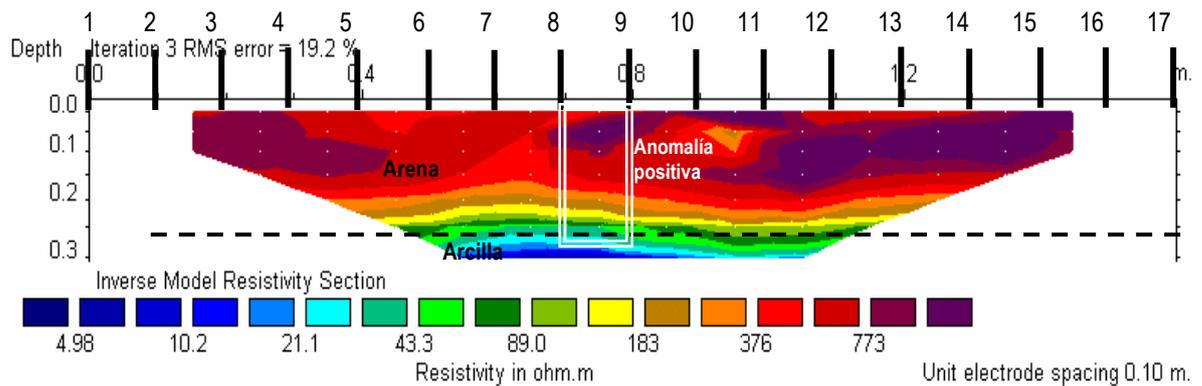
1.- Este perfil es muy similar al del ensayo 3 -a-, ya que el modelo simula un hueco relleno de aire. La diferencia es que en este caso la bovedilla ha estado en contacto con agua durante 24 horas y sus paredes aún están impregnadas por el agua que se ha vaciado tan sólo unos minutos antes de medir el perfil.

La anomalía positiva del perfil definitivamente es generada por el hueco de la bovedilla. Cuando el hueco está relleno de agua la imagen es muy distinta. En este caso, al haber una cavidad en el estrato de arena, las líneas de corriente se deforman

rodeando el hueco, deformando también las líneas de potencial que se detectan en superficie (ver apartado 4.3.1).

2.- Se vuelve a comprobar que el dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la existencia de un hueco de forma vertical y la anomalía se ajusta bien a la posición horizontal del hueco, bajo electrodos nº8 y nº9 (a distancia 0,75 m del electrodo nº1).

3.- La profundidad no se indica bien, ya que el centro está desplazado de los 12 cm de profundidad real a los 7 en la imagen del perfil eléctrico.



5.3.6 EXPERIENCIA 4: TUBO DE PVC 12 cm de diámetro

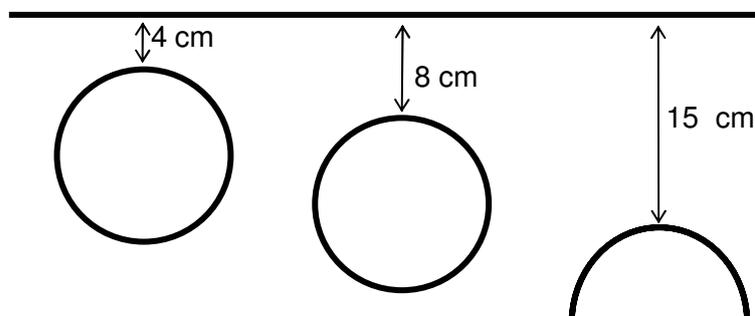
Este apartado incluye los ensayos de la experiencia 4 realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

- 5.3.6.1. Tubo de PVC 12 cm / 4 cm profundidad
- 5.3.6.2. Tubo de PVC 12 cm / 8 cm profundidad
- 5.3.6.3. Tubo de PVC 12 cm / 15 cm profundidad -

Modelo

Esta experiencia pretende estudiar la influencia de la profundidad en la respuesta eléctrica del hueco. Para ello se tomarán tres perfiles, donde se enterrará progresivamente un objeto a una profundidad cada vez mayor.

Como el objeto se enterrará en el estrato de arena, la profundidad de enterramiento está limitada a 25 cm máximo. Esta profundidad máxima también condiciona el diámetro del objeto a enterrar. Finalmente se decide enterrar un tubo de PVC de 12 cm de diámetro a las profundidades de 4, 8 y 15 cm. Estos datos de profundidad hacen referencia a la distancia que separa la superficie del estrato de arena del punto más alto del tubo (cresta), como se indica en el esquema que sigue:



Teóricamente, a mayor profundidad menor densidad de datos, lo que repercute negativamente en la resolución de la imagen de anomalía a medida que aumente la profundidad del tubo (Sumanovac, F.; Weisser, M., 2001; Loke, M.H., 2000).

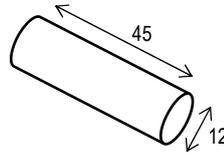
La experiencia pretende determinar la respuesta eléctrica del terreno en tres situaciones distintas: 1º Cuando la profundidad es 4 cm, $P = 0,33 D_h$.

2º Cuando la profundidad es 8 cm, $P = 0,66 D_h$.

3º Cuando la profundidad es 15 cm, $P = 1,25 D_h$.

Siendo D_h el diámetro del hueco y P la profundidad.

La separación entre electrodos es de 10 cm, y las dimensiones del tubo de PVC son 45 x12 (medidas en cm):



Mediciones

La experiencia 4 consta de tres ensayos, completando un total de seis perfiles, tres mediante dispositivo Wenner y tres mediante dispositivo Dipolo-dipolo. Cada perfil Wenner contiene 40 medidas repartidas en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm. Los perfiles Dipolo-dipolo realizan 90 medidas en 9 niveles que alcanzan una profundidad de investigación de 30 cm.

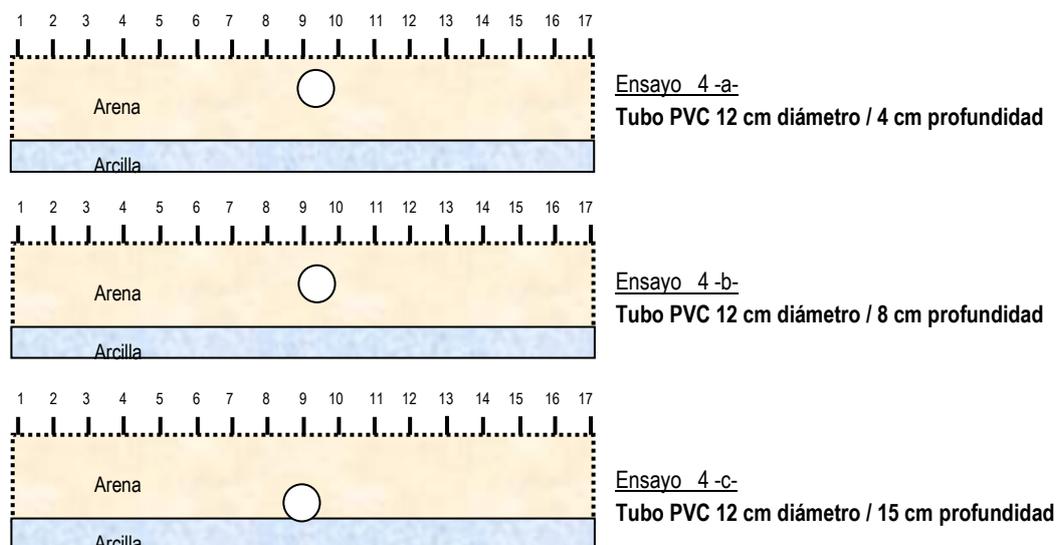
Se simulará la existencia de una cavidad en el estrato de arena enterrando un cilindro de PVC de 12 cm de diámetro.

El primer ensayo, denominado 4 -a-, obtendrá perfiles de tomografía con la cresta del hueco situada a 4 cm de profundidad, bajo los electrodos nº9 y nº10.

El segundo ensayo, denominado 4 -b-, obtendrá perfiles de tomografía con la cresta del hueco situada a 8 cm de profundidad, bajo los electrodos nº9 y nº10.

El tercer ensayo, 4 -c-, obtendrá perfiles de tomografía con la cresta del hueco situada a 15 cm de profundidad, bajo el electrodo nº9.

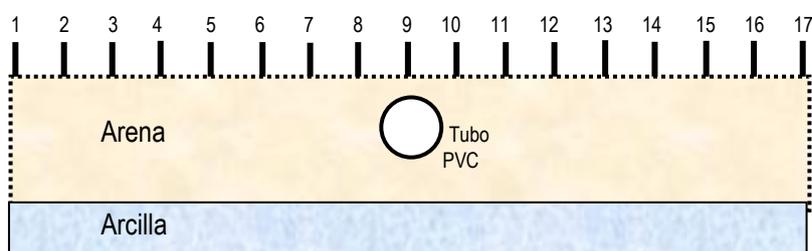
SECUENCIA DE ENSAYOS EN LA EXPERIENCIA 4: TUBO DE PVC



En el ensayo 4 -c- el cilindro de PVC se coloca sobre el contacto arcilla-arena. Para conseguir los 15 cm de recubrimiento habrá que encajarlo 2 cm en el estrato de arcilla.

5.3.6.1 TUBO DE PVC 12 cm / 4 cm profundidad

Se describe aquí el ensayo 4 -a- de la experiencia 4: Tubo de PVC de 12 cm de diámetro. Como se ha comentado anteriormente, en esta prueba inicial el tubo que simula el hueco se entierra bajo 4 cm de arena. Su límite inferior estará por tanto a 16 cm de profundidad.



La profundidad es 1/3 del diámetro del hueco: $P = 0,33D_h$, $P = 4$ cm.

Este ensayo servirá para obtener los perfiles de tomografía con el hueco de 12 cm relleno de aire y comparar esta imagen con las obtenidas en las experiencias 1 y 2. Se consigue de ese modo completar una secuencia de progresiva disminución del diámetro de hueco, de 30 cm en la Experiencia 1, a 15 cm en la Experiencia 2 y 12 cm aquí. En este caso se tiene un ratio D_{e1}/D_h de 10/12.

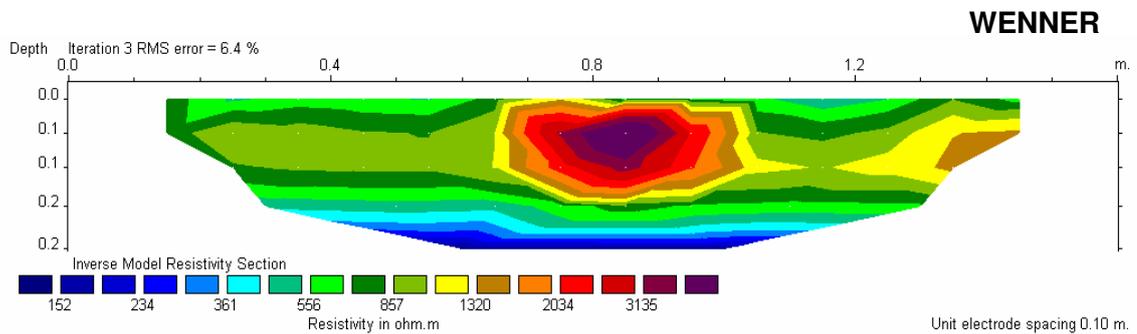
Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.6.1.1 TUBO DE PVC 12 cm / 4 cm profundidad -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad ($>$ de 3.000 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº9 y nº10, y tiene una forma bastante circular casi perfecta. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 3.000 ohm.m, se puede decir que tiene un tamaño y forma similares al tamaño del tubo de PVC. El centro de la

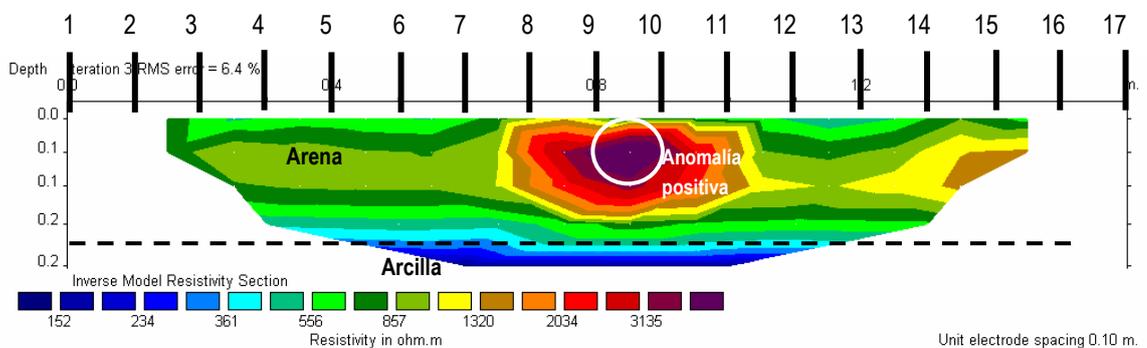
anomalía está situado a 12 cm de profundidad, lo que no se corresponde con la posición real del centro del hueco, que está a 10 cm de profundidad.



Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta muy bien la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro, en una posición muy superficial (su centro está a 10 cm de profundidad), y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).

2.- El centro del hueco está situado en la misma coordenada horizontal que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº9 y nº10 (a distancia 0,85 m del electrodo nº1), pero no ocurre lo mismo con la posición vertical, donde el centro real de la cavidad está situado a 10 cm de profundidad, mientras que la anomalía indicaría 14 cm.

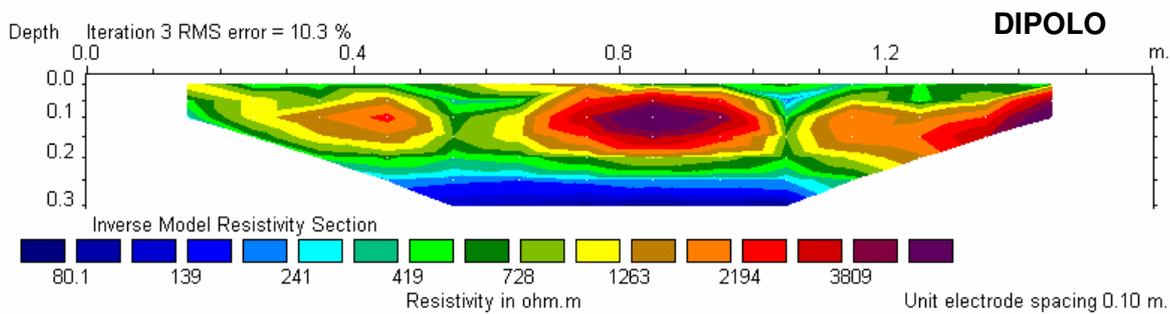


3.- La anomalía positiva parece exagerar el tamaño real del hueco. Si se toma como perímetro de anomalía la isolínea de resistividad 2.000 ohm.m (color naranja) se puede concluir que la cavidad tiene forma ovalada, con un diámetro mayor en posición horizontal de 30 cm y un diámetro vertical de 15 cm.

5.3.6.1.2 TUBO DE PVC 12 cm / 4 cm profundidad -Dispositivo Dipolo-dipolo-

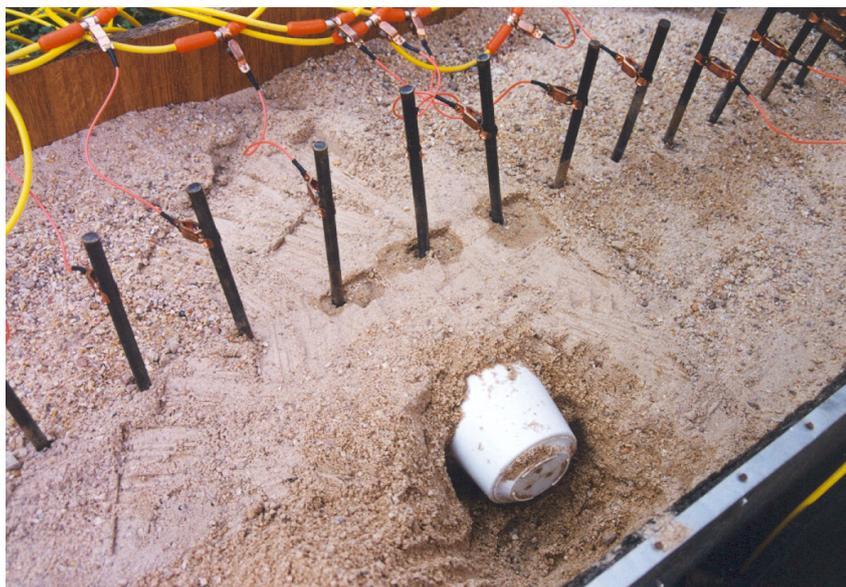
Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 3.800 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº9 y nº10, y tiene una forma ovalada muy pronunciada. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 3.800 ohm.m, se puede decir que tiene un eje horizontal de 20 cm y un eje vertical de 10 cm. El centro de la anomalía está bien situado a 12 cm de profundidad, lo que se coincide con la posición real del centro del hueco, que está también a 10 cm de profundidad.



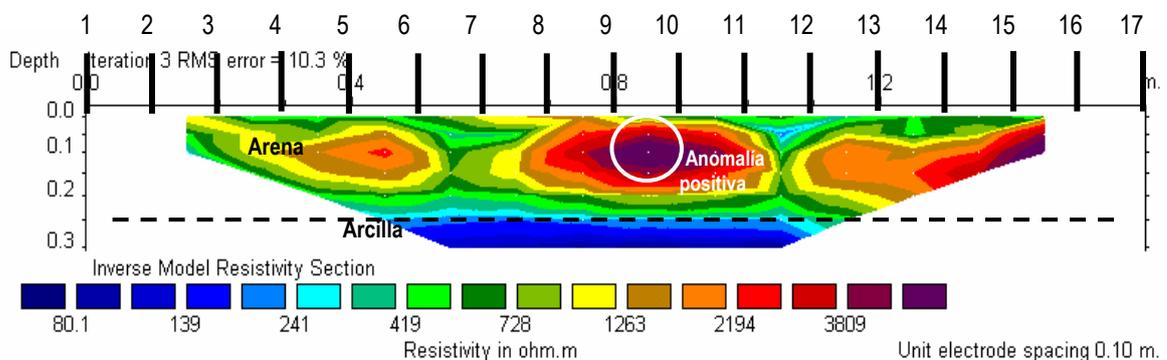
Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro, en una posición muy superficial (su centro está a 10 cm de profundidad), y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).



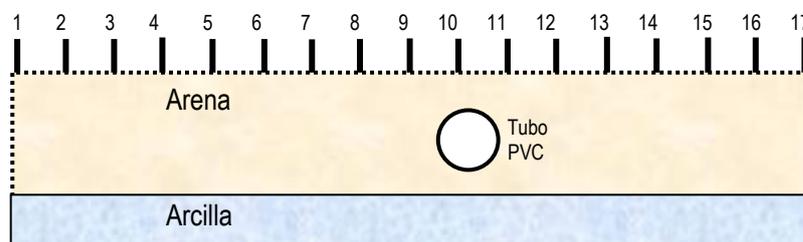
2.- El centro del hueco está situado en la misma coordenada horizontal que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº9 y nº10 (a distancia 0,85 m del electrodo nº1), y ocurre lo mismo con la posición vertical, donde el centro del hueco real y el centro de la anomalía coinciden a la profundidad de 10 cm. Se ve cómo el dispositivo Dipolo-dipolo aporta una imagen más veraz que el dispositivo Wenner.

3.- La anomalía positiva de la imagen parece exagerar el tamaño real del hueco. Tomando como perímetro de anomalía la isolínea de resistividad 2.000 ohm.m (color naranja) se puede concluir que la cavidad tiene forma ovalada, con un diámetro mayor en posición horizontal de 30 cm y un diámetro vertical de 10 cm, dimensiones que no se corresponden con la realidad.



5.3.6.2 TUBO DE PVC 12 cm / 8 cm profundidad

Se describe aquí el ensayo 4 -b- de la experiencia 4: Tubo de PVC de 12 cm de diámetro. Al igual que el ensayo anterior en esta prueba se simula un hueco del tamaño del tubo de PVC, pero en este caso enterrado bajo 8 cm de arena. Su límite inferior estará por tanto a 20 cm de profundidad.



La profundidad, en centímetros, es aproximadamente $P = 0,66D_h$, es decir $P = 8$ cm.

Este ensayo servirá para obtener los perfiles de tomografía con el hueco de 12 cm relleno de aire y comparar esta imagen con las obtenidas en las experiencias 1 y 2, así

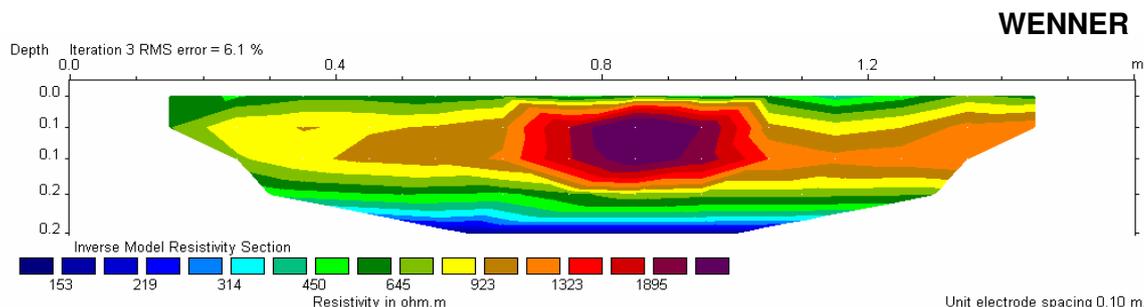
como los perfiles 4 -a-. Se continúa de ese modo con una secuencia de progresiva disminución del diámetro de hueco, de 30 cm en la Experiencia 1, a 15 cm en la Experiencia 2 y ahora 12 cm. En este caso se tiene un ratio D_{el}/D_h cercano a 1.

Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.6.2.1 TUBO DE PVC 12 cm / 8 cm profundidad -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.800 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº9 y nº10, y tiene una forma circular casi perfecta. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 1.800 ohm.m, se puede decir que tiene un tamaño y forma similares al tamaño del tubo de PVC. El centro de la anomalía está situado a 14 cm de profundidad, lo que se corresponde con la posición real del centro del hueco, que está a 14 cm de profundidad.



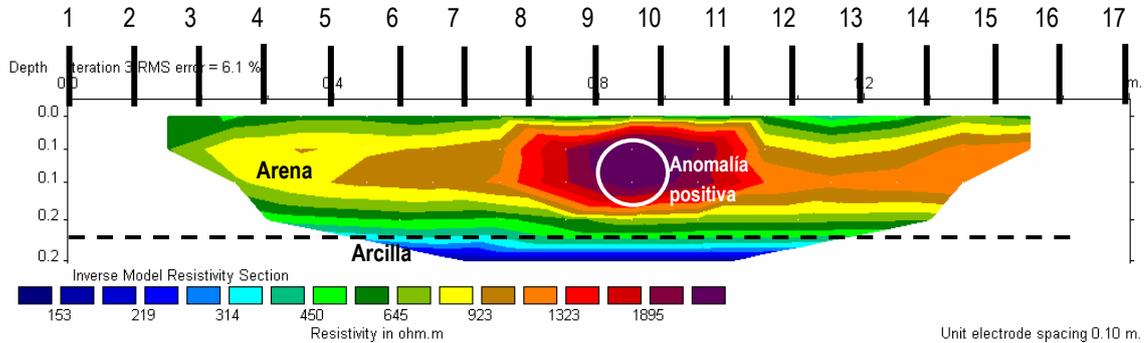
Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta muy bien la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro, en una posición superficial (su centro está a 14 cm de profundidad), y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).

2.- El centro del hueco está situado en la misma coordenada horizontal que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº9 y nº10 (a distancia 0,85 m del electrodo nº1), y ocurre lo mismo con la posición vertical, coincidentes a 14 cm.

3.- La anomalía positiva parece exagerar el tamaño real del hueco en su eje horizontal. Esto viene ocurriendo en todos los perfiles que hasta ahora se han analizado, donde las imágenes que presentan anomalías positivas exageran el eje horizontal respecto de la dimensión verdadera del hueco. Si se tomara como perímetro

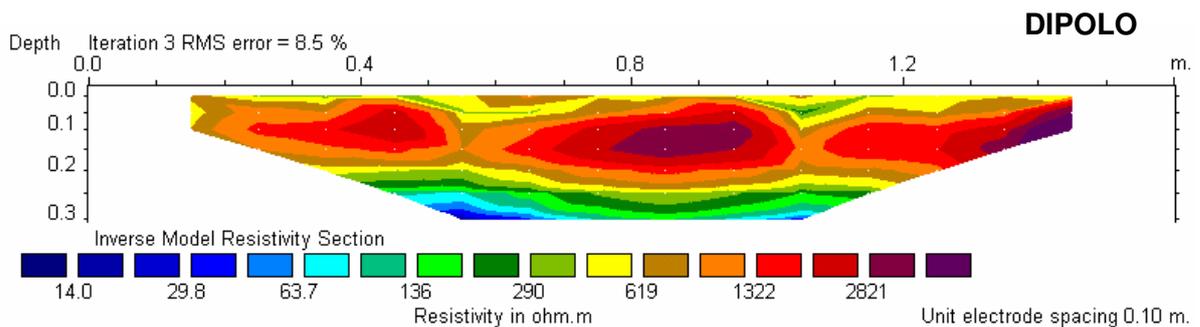
de anomalía la isolínea de resistividad 1.300 ohm.m (color naranja) podría decirse que la cavidad tiene forma ovalada, con un diámetro mayor en posición horizontal de 30 cm y un diámetro vertical de 15 cm.



5.3.6.2.2 TUBO DE PVC 12 cm / 8 cm profundidad -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 2.800 ohm.m). La anomalía está perfectamente centrada bajo los electrodos nº9 y nº10, y tiene forma ovalada. Considerando como anomalía positiva a la región con valores de resistividad superiores a 2.800 ohm.m, se puede decir que tiene un eje horizontal de 20 cm y un eje vertical de 6 cm. El centro de la anomalía está ligeramente desviado hacia arriba y la derecha, pero es un resultado aceptable.

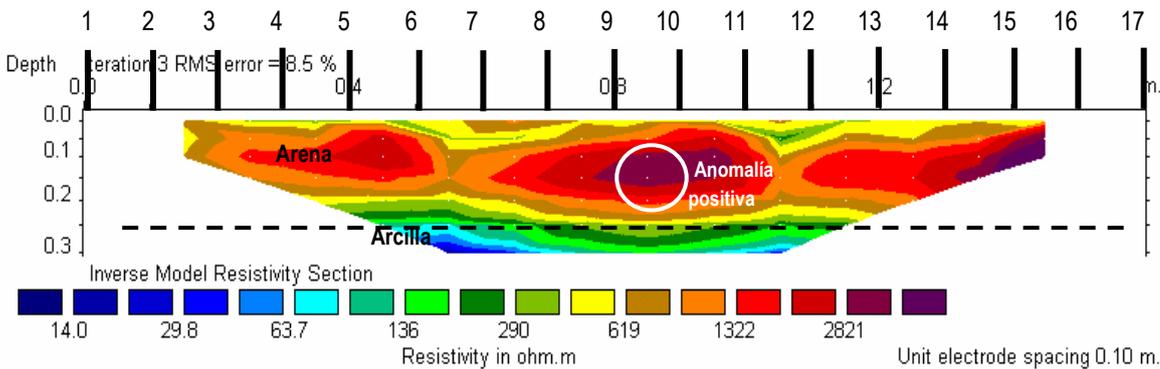


Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro en una posición superficial (su centro está a 14 cm de profundidad) y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).

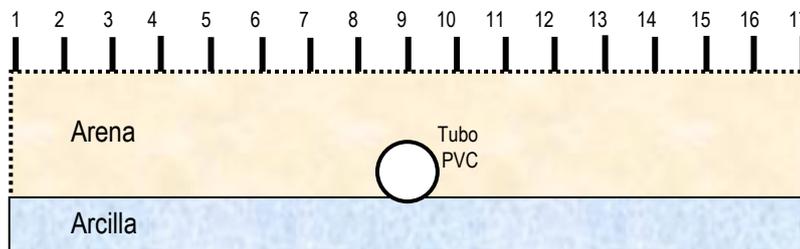
2.- El centro del hueco está aproximadamente situado en las mismas coordenadas horizontal y vertical que el centro de la anomalía, es decir, bajo electrodos nº9 y nº10 (a distancia 0,85 m del electrodo nº1), a 14 cm de profundidad.

3.- La anomalía positiva de la imagen parece exagerar el tamaño real del hueco. Si se tomara como perímetro de anomalía la isolínea de resistividad 2.800 ohm.m (color rojo parduzco) se podría concluir que la cavidad tiene forma ovalada, con un diámetro mayor en posición horizontal de 30 cm y un diámetro vertical de 8 cm. Al aumentar la profundidad se observa que disminuye la dimensión vertical de la anomalía.



5.3.6.3 TUBO DE PVC 12 cm / 15 cm profundidad

A continuación se describe el ensayo 4 -c- de la experiencia 4: Tubo de PVC de 12 cm de diámetro. Al igual que el ensayo anterior en esta prueba se simula un hueco cuyo diámetro es el del tubo de PVC, pero en este caso enterrado bajo 15 cm de arena. Su límite inferior estará por tanto a 27 cm de profundidad. En ensayos anteriores se colocó el cilindro de PVC bajo los electrodos nº9 y nº10, pero en este ensayo, por efectos en la excavación de la arena ha quedado colocado 7 cm hacia la izquierda con respecto a posiciones anteriores, bajo el electrodo nº9.



La profundidad es $P= 1,25 D_h$, que son 15 cm.

Este ensayo servirá para obtener los perfiles de tomografía con el hueco de 12 cm relleno de aire y comparar esta imagen con las obtenidas en las experiencias 1 y 2, así

como los perfiles 4 -a- y 4 -b- con el mismo hueco a menor profundidad. Se logra, de ese modo, continuar una secuencia de progresiva disminución del diámetro de hueco y aumento de la profundidad. En este caso se tiene un ratio D_{el}/D_h de 0,83 (10/12).

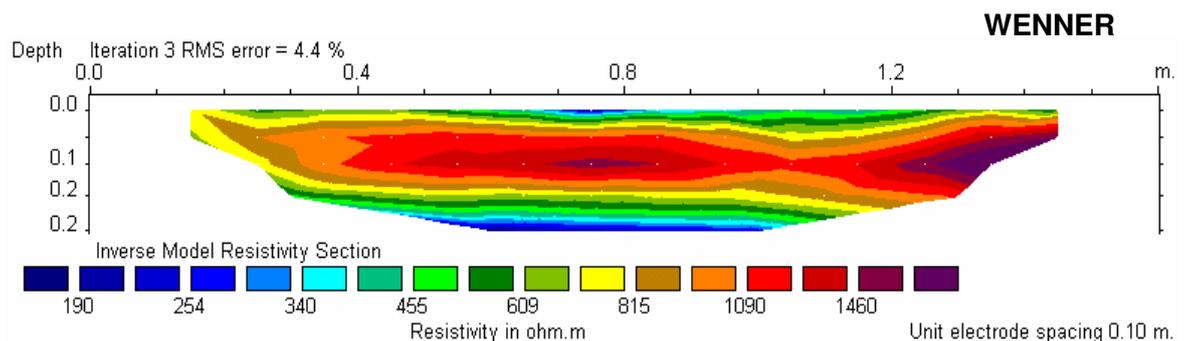


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo. Esto permitirá ver la diferencia de resolución entre ambos dispositivos.

5.3.6.3.1 TUBO DE PVC 12 mm / 15 cm profundidad -Dispositivo Wenner-

Resultados

En este caso el perfil no presenta una anomalía clara. A diferencia de lo visto en los ensayos 4 -a- y 4 -b-, aquí no aparece una forma circular o elíptica. Únicamente se puede observar bajo el electrodo n°9, en el lugar ocupado por el cilindro de PVC, una delgada imagen de anomalía positiva con forma de huso, de valores altos de resistividad (> de 1.400 ohm.m) La anomalía está centrada bajo el electrodo n°9, pero debido a que las isolíneas de resistividad son horizontales podrían interpretarse como zonas en la arena con diferente grado de humedad y no como un indicio de hueco. En la experiencia 0 se calibró el estrato de arena sin ningún objeto enterrado, y la imagen resultante fue muy similar a esta.

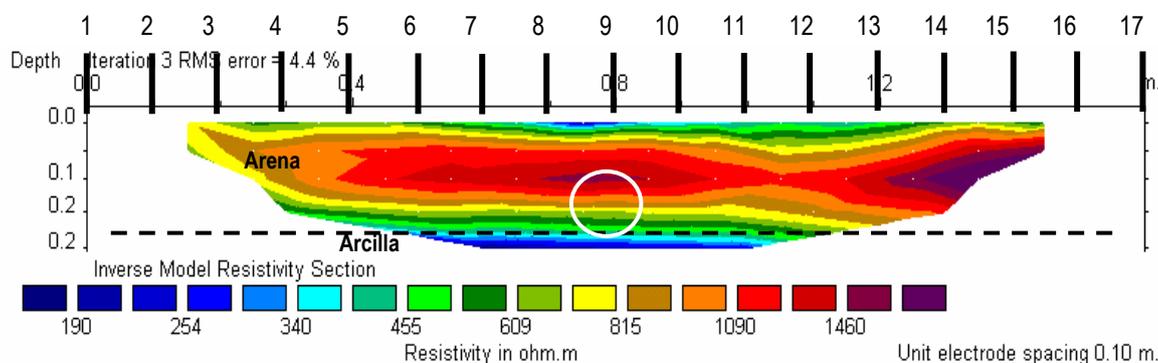


Se distingue a distancia 1,4 m bajo el electrodo nº15, otra zona resistiva una anomalía positiva, donde se localizan los mayores valores de resistividad, pero se sabe que esa respuesta es debida a la menor humedad de la arena en esa zona. Por otro lado, en superficie, entre los 0,7 y 0,8 m se observa una fina lámina de baja resistividad (300 ohm.m). Esto es debido a que en esa zona superficial la arena estaba tan seca que hubo que añadir agua en la base de cada electrodo para mejorar su contacto.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner no detecta la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro, en una posición profunda (su centro está a 21 cm de profundidad), y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).

2.- Inicialmente y a la espera de nuevas experiencias se puede decir que la profundidad límite para la detección de cavidades con dispositivo Wenner está en un rango de entre $0,66D_h$ y $1,25D_h$. Calculando la media de esta distancia se puede decir como dato de partida que al profundidad límite de detección de huecos dieléctricos está en $0,95D_h$.



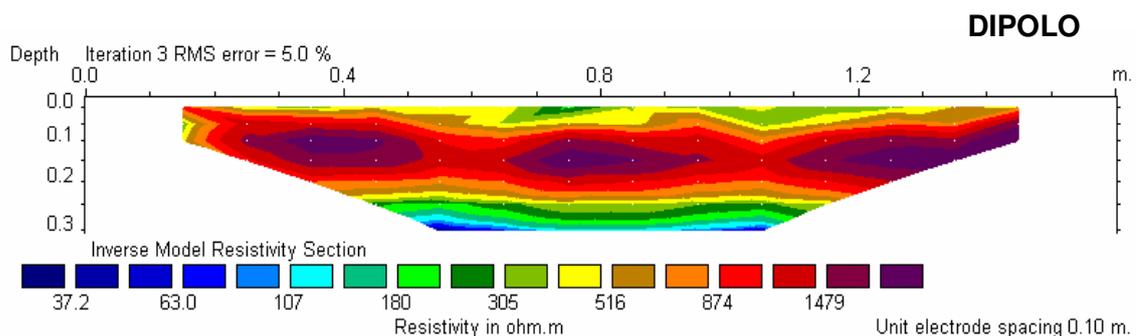
3.- A la espera de nuevos experimentos se podría aceptar que el dispositivo sí que detecta la cavidad suponiendo que la respuesta eléctrica en estos casos (para los que la profundidad es $1,25D_h$) genera una anomalía de resistividad alta con forma de huso muy delgado y que la posición de la cresta de la cavidad coincide con la posición del centro de la anomalía. Pero estas formas de huso son tan frecuentes y generalmente provocadas por cambios litológicos locales o variaciones en la humedad de una misma formación. Se le puede dar a este ensayo la denominación de indicio, ya que aparece una anomalía situada en la posición del tubo que puede estar relacionada con su presencia.

5.3.6.3.2 TUBO DE PVC 12 mm / 15 cm profundidad -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En este caso el perfil no presenta una anomalía clara. A diferencia de lo visto en los ensayos 4 -a- y 4 -b-, aquí no se observa una sola forma circular o elíptica que indique con exactitud la posición de la cavidad. En esta imagen obtenida con dispositivo Dipolo-dipolo se distinguen tres anomalías idénticas y si no fuera porque se conoce la posición exacta del cilindro de PVC no habría manera de deducirlo.

Bajo los electrodos nº5, nº9 y nº14 se distinguen las tres anomalías positivas con forma ovalada, de valores altos de resistividad (> de 1.400 ohm.m). Se sabe que sólo existe un hueco, que está situado bajo el electrodo nº9, que ese hueco tiene 12 cm de diámetro y que se encuentra a 15 cm de profundidad. Pero lo cierto es que dicho hueco no parece generar ningún tipo de anomalía especial en esa zona, ya que en lugares adyacentes existen sendas anomalías idénticas en terreno homogéneo y continuo.



En la experiencia 0 se calibró el estrato de arena (apartado 5.3.2) sin ningún objeto enterrado, y la imagen resultante fue muy similar a esta, con zonas de resistividad variable dentro del estrato de arena debido a la variación de su humedad interior.

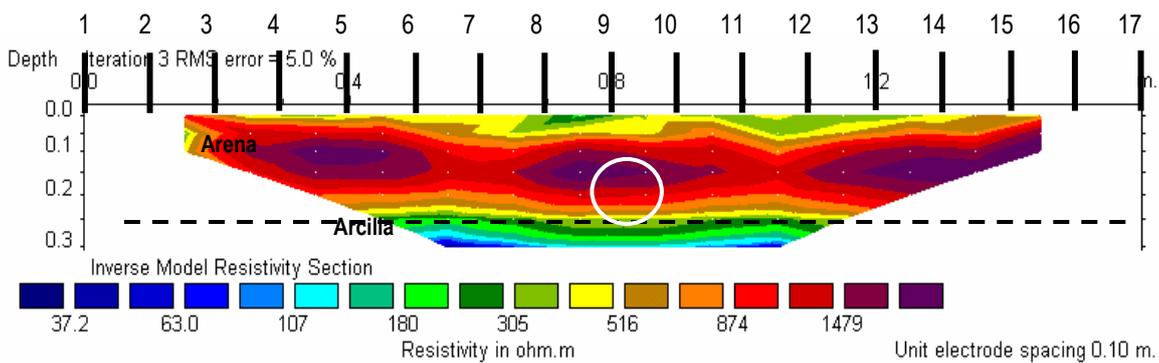
Como en el perfil anterior tipo Wenner, en superficie se observan láminas de baja resistividad (300 ohm.m) debido a que hubo que añadir agua a los electrodos para mejorar su contacto en una superficie arenosa muy seca.

Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no detecta la presencia de un hueco de 12 cm de diámetro, en una posición profunda (su centro está a 21 cm de profundidad), y con un espaciado entre electrodos similar al diámetro del hueco (10 cm).

2.- Inicialmente y a la espera de nuevas experiencias se puede decir que la profundidad límite para la detección de cavidades con dispositivo Wenner está en un rango de entre $0,66D_h$ y $1,25D_h$. Calculando la media de esta distancia se puede decir como dato de partida que al profundidad límite de detección de huecos dieléctricos está en $0,95D_h$.

3.- A la espera de nuevos experimentos se podría aceptar que el dispositivo sí que detecta la cavidad suponiendo que la respuesta eléctrica en estos casos (para los que la profundidad tiene un rango 18 veces el ratio D_e/D_h) y para dispositivos tipo Dipolo-dipolo, genera una reflexión en la anomalía a derecha e izquierda, proporcionando una imagen simétrica respecto de la posición que ocupa el hueco. Es decir, el hueco provoca una imagen con tres anomalías, de las cuales la del centro es la verdadera, y que la cresta del hueco está situada en el centro de la anomalía. Esta posibilidad se vislumbra como poco probable.



5.3.7 EXPERIENCIA 5: TUBO METÁLICO 15 cm de diámetro

Este apartado incluye dos ensayos realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

5.3.7.1 TUBO METÁLICO 15 cm de diámetro -Dispositivo Wenner-

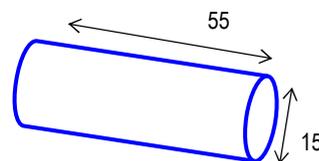
5.3.7.2 TUBO METÁLICO 15 cm de diámetro -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Modelo

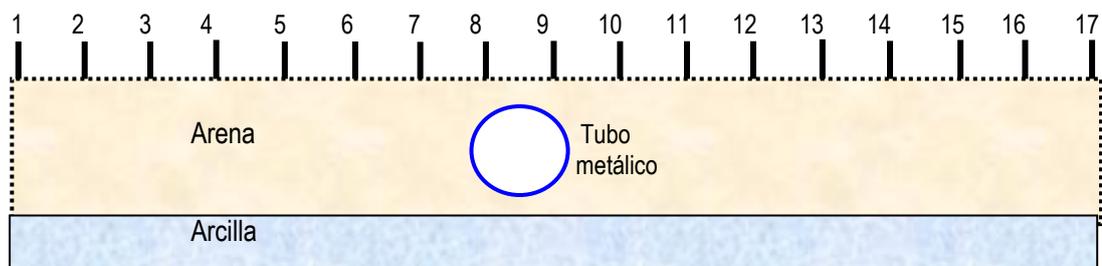
El modelo simula un hueco conductor de 15 cm de diámetro y enterrado en la arena a una profundidad de 5 cm, midiendo desde la superficie hasta la cresta del hueco.

El objeto empleado para la experiencia es un tubo de hierro en chapa de 2 mm. Teóricamente este cuerpo conductor dará una respuesta eléctrica similar a la que podría dar un hueco relleno de agua en roca muy poco, o nada permeable (Si la roca fuera permeable el hueco quedaría enmascarado por la superficie del nivel piezométrico)

Para esta experiencia el ratio D_e/D_h será 1/1,5, es decir, el diámetro del hueco es 1,5 veces la separación interelectrónica. La separación entre electrodos es de 10 cm, y se utilizará un tubo con las dimensiones que a continuación se detallan (mediciones en cm):



Para evitar que entrara arena al interior del tubo se colocaron dos baldosas de espesor despreciable en ambos extremos. El tubo se colocó centrado bajo los electrodos nº8 y nº9. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. El hueco simulado tiene forma circular de radio 15 cm, y tiene un espesor de recubrimiento de 5 cm de arena, por cuanto la profundidad será $P= 0,33D_h$.



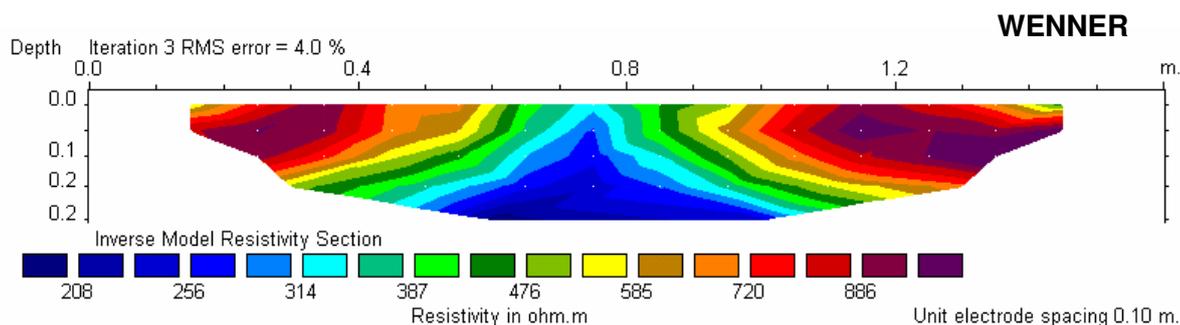
Mediciones

Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm

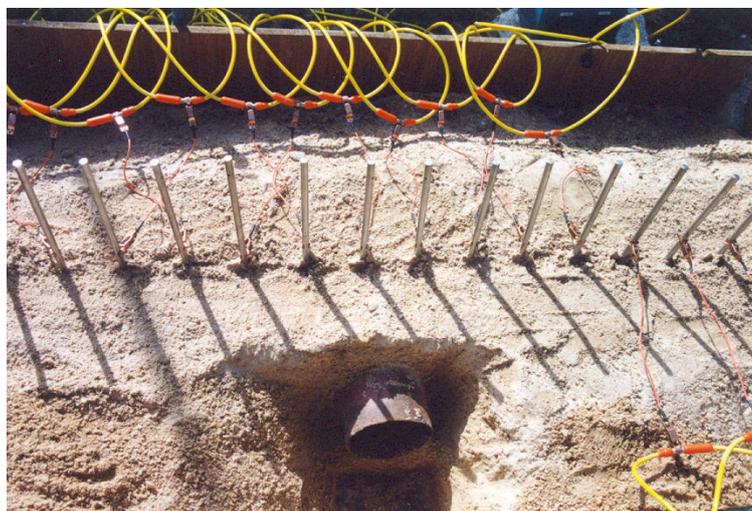
5.3.7.1 TUBO METÁLICO 15 cm de diámetro -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores bajos de resistividad (< de 300 ohm.m) debido al carácter conductor del hierro del tubo enterrado. La anomalía tiene forma de V invertida, y tiene un aspecto muy similar a las anomalías negativas con forma de joroba vistas en el ensayo 3 -c- de la experiencia 3. En aquella ocasión también se trataba de un hueco conductor (subapartado 5.3.5.3) y representaba, a escala menor pero de forma real, lo que aquí se está simulando: un hueco relleno de agua.



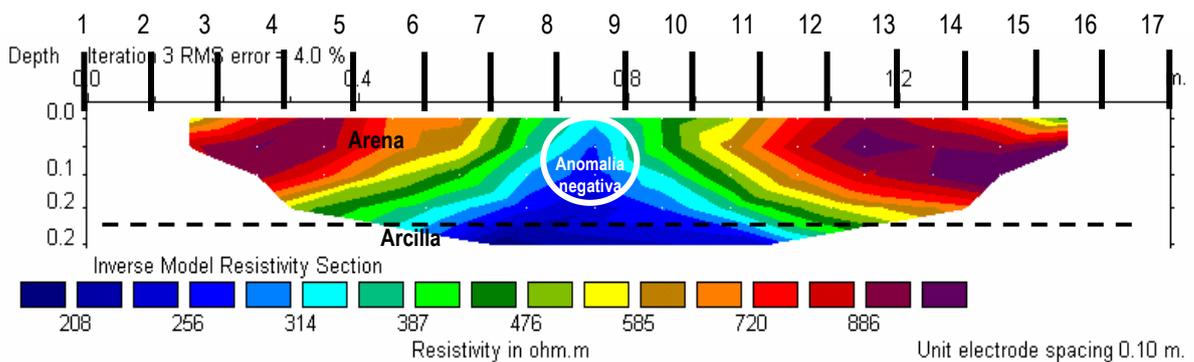
La anomalía aparece perfectamente centrada entre los electrodos nº8 y nº9. La profundidad a la que se encuentra el hueco parece determinada por la cresta de la isolínea de resistividad 300-310 ohm.m, que parece la prolongación de la superficie de inflexión y contacto entre la capa inferior de arcilla y la capa superior de arena.



El diámetro del hueco podría estimarse como 1/4 de la distancia que separa la cresta de la anomalía del contacto arena-arcilla. Se comprende que, si el tubo de hierro hubiera sido enterrado en un único estrato homogéneo de arena, la anomalía negativa habría aparecido formando un recinto cerrado y totalmente rodeado por material resistivo. La forma de joroba es producida por la mezcla de imágenes de los dos conductores del modelo: tubo de hierro + sustrato de arcilla.

Conclusiones

1.- El Dispositivo Wenner detecta bien la presencia de un hueco conductor. La imagen que presenta, cuando está cercano a un nivel también conductor (p.e. estrato de arcilla, nivel piezométrico), es la resultante del solape entre las dos respuestas de baja resistividad. Para esta experiencia, con un hueco conductor sobre una lámina de arcilla próxima, la imagen obtenida en el perfil de resistividad es una anomalía negativa con forma convexa hacia arriba.



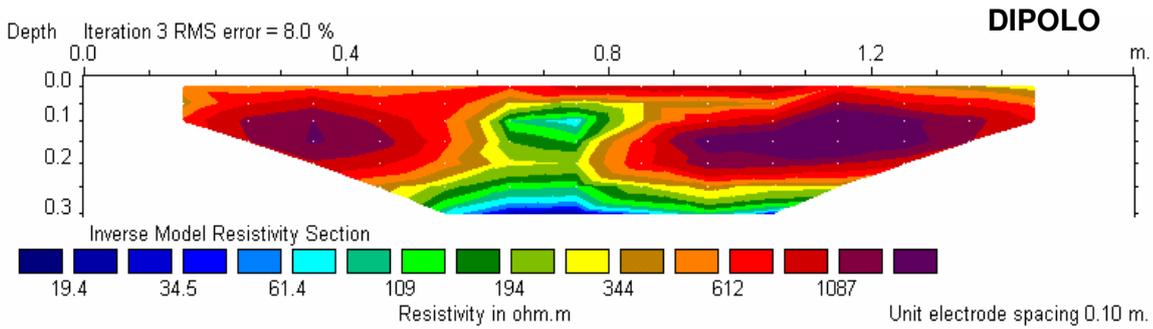
2.- El tamaño del hueco se puede deducir del siguiente modo: Su límite superior se localiza en la cresta de la anomalía, que es el punto de máxima altura (y curvatura) para la isolínea de resistividad que coincide y tiene continuidad, con la superficie de separación entre los niveles resistivo y conductor (límite arena-arcilla).

El límite inferior del hueco está situado en la vertical y bajo la cresta de la anomalía, a 1/4 de la distancia que separa la superficie de separación resistivo-conductor (arena-arcilla) de la cresta de la anomalía.

5.3.7.2 TUBO METÁLICO 15 cm diámetro - Dispositivo Dipolo-dipolo -

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores bajos de resistividad (< de 300 ohm.m) debido al carácter conductor del hierro del tubo enterrado. La anomalía negativa tiene forma de elipse, con su eje mayor en posición horizontal. Es una anomalía similar a las vistas en las experiencias 2 y 4, pero conductoras en lugar de resistivas.



La anomalía aparece perfectamente centrada entre los electrodos n°8 y n°9. La profundidad de su centro geométrico es de 12 cm desde la superficie, idéntica a la profundidad real del tubo de hierro.

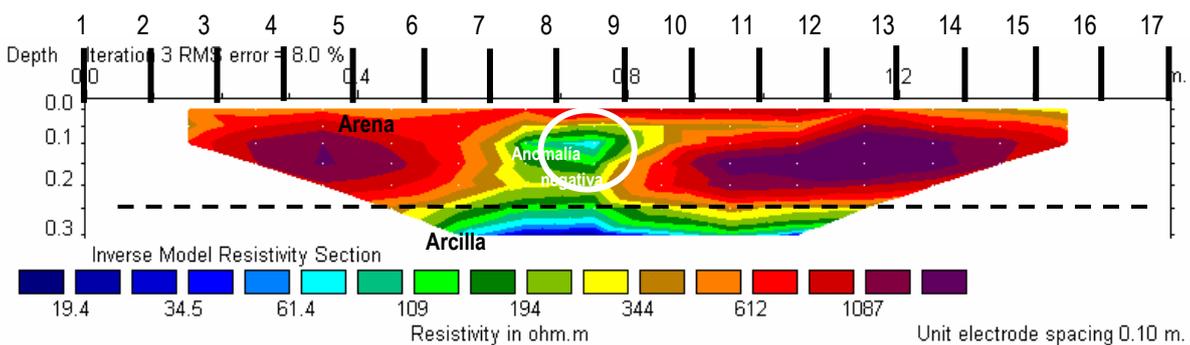
A diferencia de la imagen obtenida con dispositivo Wenner, en este caso si aparece un área que se cierra, y está claramente separada del estrato de arcilla infrayacente. Se puede decir entonces, que el dispositivo Dipolo-dipolo detecta mejor este tipo de cavidades de tipo conductor. En el ensayo 3 -c- de la experiencia 3 Bovedilla vertical, se pudo ver como la configuración electródica Dipolo-dipolo también era válida para casos en los que el hueco conductor y el nivel conductor inferior estaban en contacto. En aquella ocasión se pudo ver cómo el efecto sobre la imagen era una deformación en forma de joroba de la superficie de resistividad separación arena-arcilla.

El tamaño del hueco puede estimarse bien, ya que puede distinguirse el centro y perímetro de la anomalía. Podría suponerse que el hueco es de sección circular o de sección cuadrada, con un diámetro similar al diámetro medio de los ejes mayor y menor de la forma ovalada de la anomalía.

Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un hueco conductor. La resolución de este dispositivo es superior a la Wenner, ya que en este caso la imagen producida por el hueco no se solapa con la generada por un nivel cercano también conductor (estrato de arcilla, nivel piezométrico, etc.). El resultado es una anomalía negativa de forma elíptica con su eje mayor en disposición horizontal y su centro bien situado bajo los electrodos n°8 y n°9, a distancia 0,75 m.

2.- El centro de la cavidad y el centro de la anomalía coinciden perfectamente en su posición horizontal y vertical. El tamaño del hueco se puede deducir fácilmente a partir de la forma ovalada de la anomalía, ya que es la media de sus radios menor y mayor.



5.3.8 EXPERIENCIA 6: BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-)

Este apartado incluye dos ensayos realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

5.3.8.1 BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-) -Dispositivo Wenner-

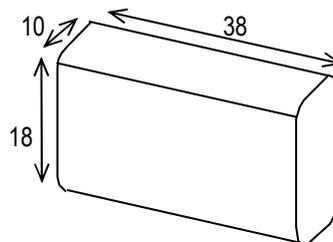
5.3.8.2 BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-) -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Modelo

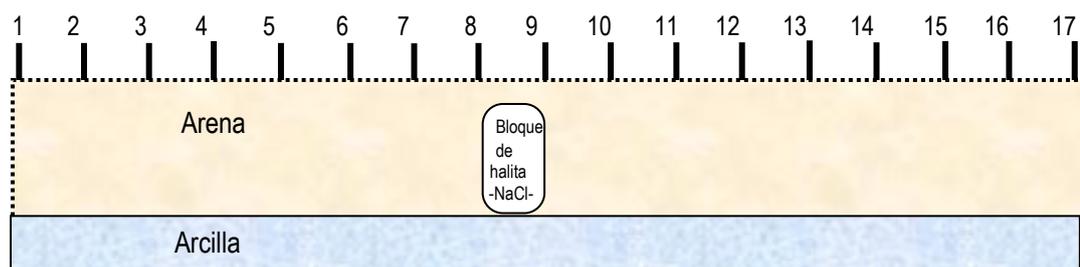
El modelo simula un hueco relleno de sales, en concreto halita (cloruro de sodio) Como ya se ha visto en el apartado 4.3.2 los minerales constituidos por enlace iónico son materiales dieléctricos o aislantes. Sin embargo, no afecta únicamente el porcentaje de minerales, sino que también influye la textura y la estructura. Casi siempre, la conductividad tiene un origen electrolítico o iónico, en función de la porosidad, agua que rellene los poros y sales disueltas.

La textura del bloque de sal está constituida por un compacto agregado de granos de halita de granulometría variable entre 1 mm y 5 mm, su humedad es la humedad higroscópica. El comportamiento geoelectrico del bloque en el banco de arena+arcilla se prevé resistivo, ya que aparentemente no tiene conductividad, por ser un bloque seco de baja porosidad.

El tamaño del hueco relleno de halita es similar es de 38x18x10 (mediciones en cm):



La posición del bloque dentro del estrato de sal es centrada bajo los electrodos nº8 y nº9 y con su base apoyada sobre el contacto con el estrato de arcilla. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. La sección del bloque es una forma rectangular de dimensiones 10 cm de ancho por 18 cm de alto, y tiene un espesor de recubrimiento de 7 cm de arena.



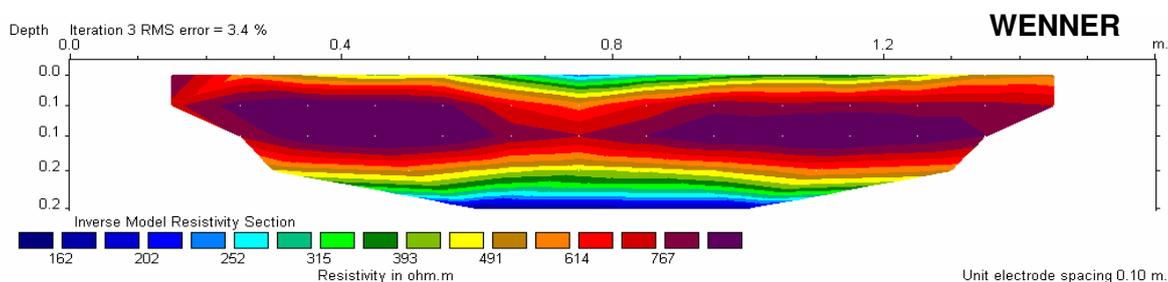
Mediciones

Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm

5.3.8.1 BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-) -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía negativa en el centro, coincidiendo con la posición del bloque de sal. La forma de la anomalía tiene forma de pinzamiento sobre las líneas de alta resistividad que limitan el estrato de arena. El estrato de arena tiene una resistividad homogénea y constante en toda su sección, y está representada en el perfil por una banda de resistividad alta, superior a 760 ohm.m. Dicha banda tiene un espesor constante en todo el perfil (11 cm), pero sufre un adelgazamiento progresivo e importante hasta hacerse cero justo en la posición del bloque de sal.



Dado que la anomalía es negativa, se puede deducir que el bloque tiene mayor conductividad que la arena circundante. Sin embargo antes de realizar el perfil se apuntó que el bloque de sal tenía como única humedad la humedad higroscópica. Un ensayo de humedad posterior, desveló que la humedad de la sal era $w=5,3\%$, y la humedad de la arena circundante $w=6,1\%$. Los resultados indican que el bloque de sal tiene menos humedad que la arena, y sin embargo es más conductora. Eso se traduce en que la resistividad del agua que contiene la arena es mayor que la resistividad del agua que contiene el bloque de sal, o lo que es lo mismo, que el contenido en sales disueltas es mayor para el agua que ocupa los poros del bloque de sal.

Por la imagen que presenta el perfil de resistividad no se puede determinar el tamaño del bloque de sal. Se podría suponer que tiene la altura de todo el estrato de arena, ya que afecta por igual a toda esa banda.

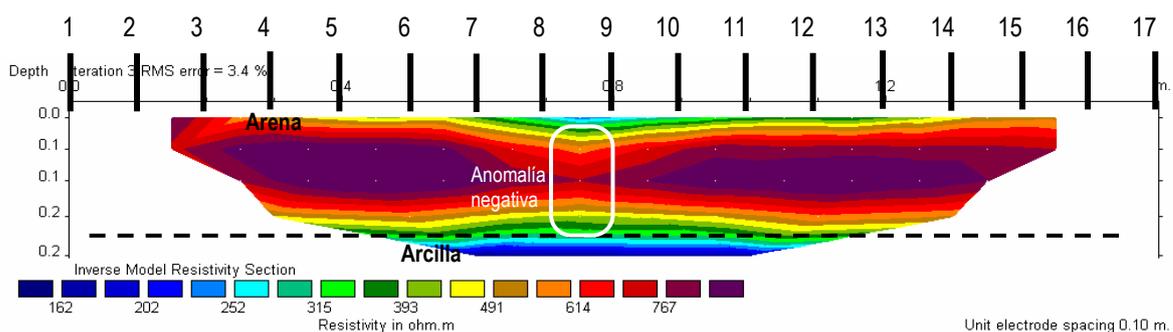


En la imagen se ha superpuesto la posición real del bloque de sal, centrado bajo los electrodos nº8 y nº9, y se puede comprobar como el encaje de la anomalía está correctamente localizado bajo dichos electrodos, pero es difícil precisar sobre su tamaño.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta huecos rellenos de sal. La anomalía que se observa en un perfil es de baja resistividad, debido a que el poco agua que rellena los poros del bloque de sal tiene un alto contenido en sales, y el efecto conductor es mayor que el de la arena, con mayor humedad pero menor contenido en sales disueltas. La imagen de la anomalía tiene una forma de adelgazamiento de la banda resistiva que caracteriza el estrato de arena.

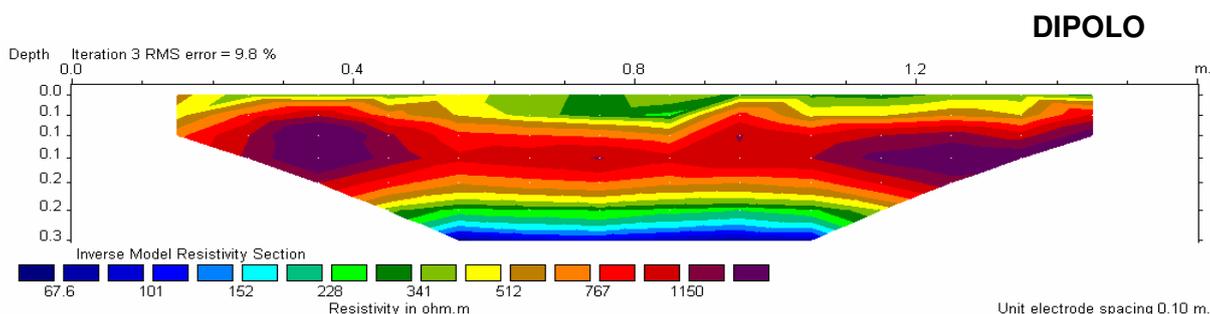
2.- La posición del hueco relleno de sal queda perfectamente localizada, ya que el punto de máximo adelgazamiento que marca la anomalía coincide con la posición exacta del bloque de sal. El centro de ese bloque es el centro de la anomalía, y sus dimensiones reales no son fáciles de determinar, al menos para el modelo creado en esta experiencia.



5.3.8.2 BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-) -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido no se observan anomalías con claridad. Al igual que en el perfil anterior, realizado con dispositivo Wenner, existe un adelgazamiento de la banda de resistividad alta (> a 760 ohm.m), pero en esta ocasión no figura un único punto de adelgazamiento por baja resistividad. Para este perfil existen dos anomalías, y ninguna de ellas coincide con la posición del bloque de sal. El primer punto de adelgazamiento se encuentra a distancia 0,55 m, entre los electrodos nº6 y nº7; y el segundo punto está a 0,85 m, entre los electrodos nº9 y nº10.



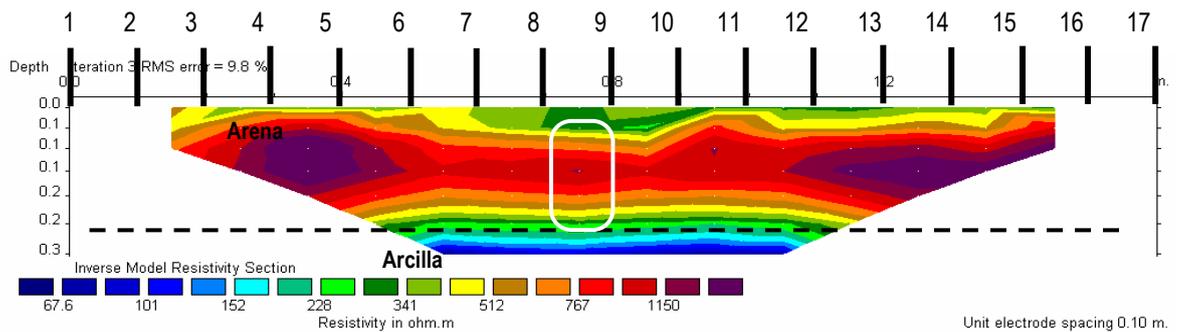
Curiosamente, la posición del bloque de sal coincide con cierta precisión, con el lugar intermedio de esas dos anomalías. Podría pensarse entonces, que el dispositivo Dipolo-dipolo detecta bien el bloque de sal pero que la imagen resultante es diferente a la del dispositivo Wenner. En este caso el hueco relleno de sal estaría situado en el lugar intermedio de esos dos puntos de adelgazamiento de la capa resistiva correspondiente a la arena.

Sin embargo esta nueva interpretación no es concordante con la teoría de que el bloque tenga mayor conductividad que la arena circundante. En tal caso, el perfil presentaría sólo una anomalía de resistividad negativa en torno a un centro bien claro, como se pudo ver en la experiencia 5 (tubo de hierro, apartado 5.3.7) Finalmente se concluye que para esta experiencia el dispositivo Dipolo-dipolo no proporciona resultados satisfactorios.

Conclusiones

1.- Por lo visto en esta experiencia y en comparación con otras realizadas sobre modelos con huecos conductores (Experiencia 5 y ensayo 3-c- de la experiencia 3), se puede decir que el dispositivo Dipolo-dipolo no detecta huecos rellenos de sal. La anomalía que se observa en el perfil tiene forma almohadillada, con dos zonas de adelgazamiento. La posición del bloque de sal es la posición el punto medio del segmento que separa esos adelgazamientos (los adelgazamientos son zonas de baja resistividad).

2.- La otra posibilidad es que el bloque de sal no se comporte como un conductor, sino como un dieléctrico moderado (moderado con respecto al estrato de arena circundante). En tal caso sería el dispositivo Wenner el que falla, y el Dipolo-dipolo el correcto. Pero por la precisión de las imágenes y la calidad de los materiales ensayados, resulta lógico estimar la opción Wenner como más veraz.



5.3.9 EXPERIENCIA 7: CILINDRO DE ARCILLA humedad 28%

Se detallan a continuación los siguientes ensayos:

5.3.9.1 CILINDRO DE ARCILLA humedad 28% -Dispositivo Wenner-

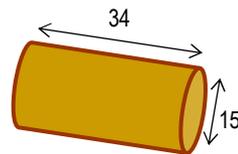
5.3.9.2 CILINDRO DE ARCILLA humedad 28% -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Modelo

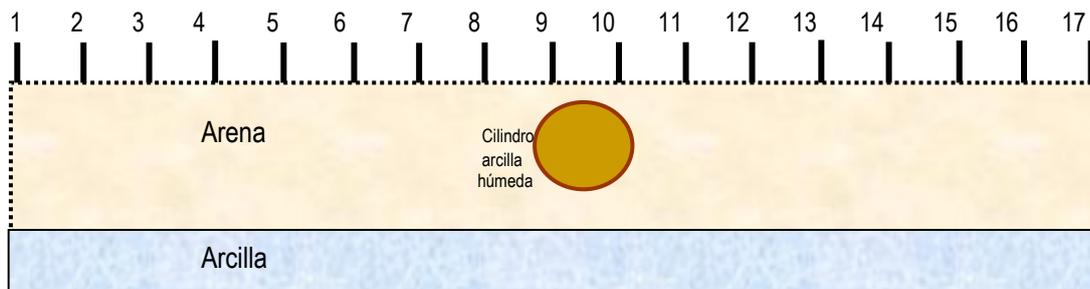
El modelo simula un hueco cilíndrico relleno de arcilla. Se ha utilizado un cilindro de arcilla de 15 cm de diámetro y enterrado en la arena a una profundidad de 5 cm, midiendo desde la superficie hasta la cresta del cilindro. Para tallar el cilindro se ha empleado el mismo tipo de arcilla que el utilizado en el estrato de arcilla del banco de pruebas.

Presumiblemente, al tener mucha humedad, el cilindro se comportará como un hueco conductor. Se espera una respuesta similar a la del tubo metálico de la experiencia 5, pero con una anomalía negativa de menor en intensidad, ya que la conductividad metálica del hierro es mayor que la conductividad iónica del agua atrapada en la arcilla.

Para esta experiencia el ratio D_{el}/D_h será 1/1,5, es decir, el diámetro del hueco es 1,5 veces la separación interelectródica. La separación entre electrodos es de 10 cm, y se utilizará un cilindro con las dimensiones que a continuación se detallan (mediciones en cm):



El cilindro fue colocado centrado bajo los electrodos nº9 y nº10. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. El hueco simulado tiene forma circular de radio 15 cm, y tiene un espesor de recubrimiento de 5 cm de arena. Por lo tanto $P = 5$ cm que es $0,3D_h$



Mediciones

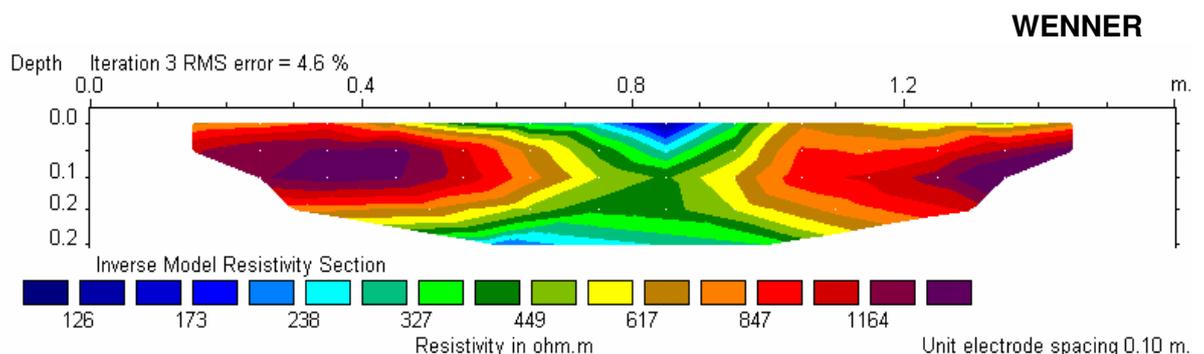
Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm

5.3.9.1 CILINDRO DE ARCILLA humedad 28% -Dispositivo Wenner-

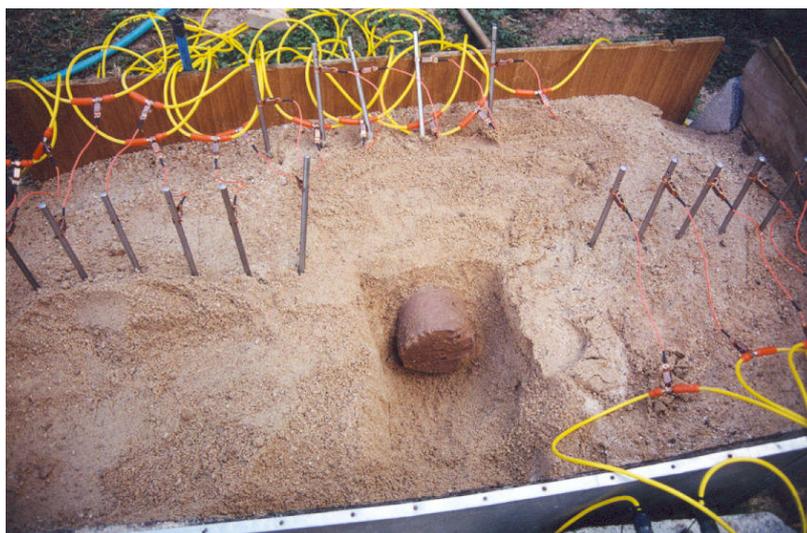
Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores bajos de resistividad (< de 300 ohm.m) debido provocada por la conductividad del cilindro de arcilla. Los valores de resistividad considerados como normales para una arcilla varían entre 1 y 100 ohm.m (Orellana, 1982).

La anomalía recuerda la forma de pinzamiento obtenida en la experiencia 6 (bloque de sal), donde las líneas de resistividad del estrato de arena sufren un adelgazamiento en su espesor coincidente con la posición del bloque de sal. En esta ocasión el estrato de arena también presenta una resistividad homogénea y constante en toda su sección, y está representada en el perfil por una banda de resistividad alta, superior a 610 ohm.m. Pero sufre un brusco adelgazamiento hasta cortarse en la zona ocupada por el cilindro de arcilla.



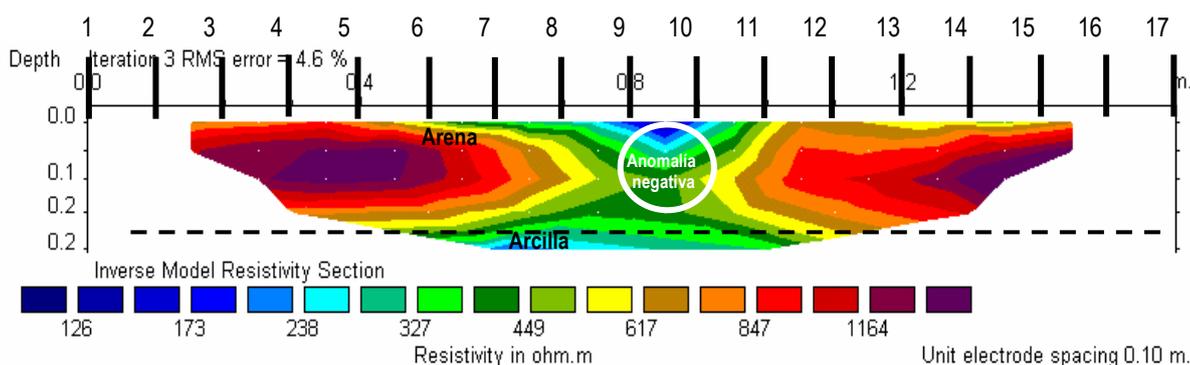
En la imagen se ha superpuesto la posición real del cilindro de arcilla, centrado bajo los electrodos nº9 y nº10, y se puede comprobar como el encaje de la anomalía está perfectamente localizado bajo dichos electrodos, pero resulta difícil deducir su tamaño.



Por la imagen que presenta el perfil de resistividad no se puede determinar el tamaño del cilindro de arcilla. Se podría suponer que tiene la altura de todo el estrato de arena, ya que afecta por igual a toda esa banda.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta muy bien huecos rellenos de arcilla, siempre y cuando tenga suficiente contraste de resistividad con su entorno. Puesto que la arcilla tiene en general valores de resistividad bajos (< de 100 ohm.m), presenta en este caso una anomalía de baja resistividad que contrasta claramente con los altos valores del estrato de arena.



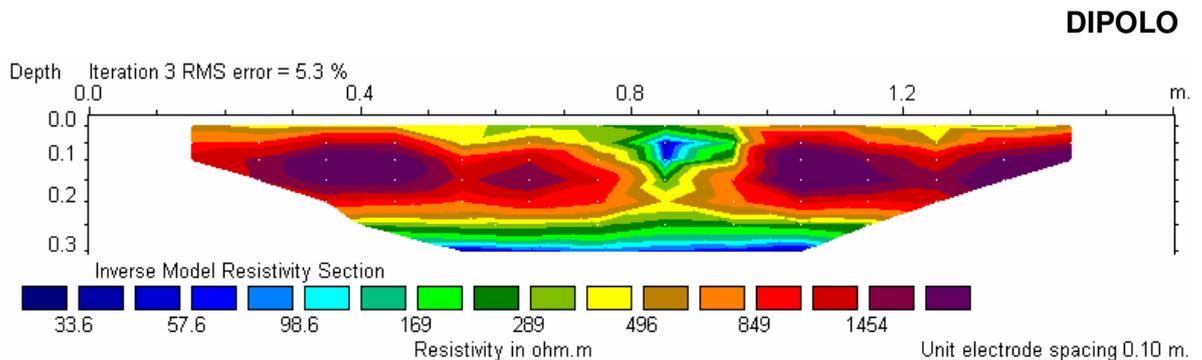
2.- La imagen de la anomalía tiene una forma de adelgazamiento de la banda resistiva que caracteriza el estrato de arena. El plano de simetría de esa silueta con forma de adelgazamiento y corte que aparece en la imagen coincide exactamente con el punto donde se encuentra la cavidad rellena de arcilla.

3.- La posición del hueco relleno de arcilla se localiza con precisión, pero no así su forma, ya que sus dimensiones reales no son fáciles de determinar, al menos para el modelo creado en esta experiencia.

5.3.9.2 CILINDRO DE ARCILLA humedad 28% -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores bajos de resistividad (< de 100 ohm.m) debido al carácter conductor del cilindro de arcilla enterrado. La anomalía negativa tiene forma circular, con su centro colocado bajo los electrodos nº9 y nº10 (a 0,85 m). Es una anomalía similar a la vista en la experiencia 5 (tubo de hierro). La profundidad de su centro geométrico es 12 cm desde la superficie, idéntica a la profundidad real del cilindro de arcilla.



A diferencia de la imagen obtenida con dispositivo Wenner, donde únicamente se observaba un pinzamiento, en este caso se obtiene un área que se cierra, y está claramente separada del estrato de arcilla infrayacente. El dispositivo Dipolo-dipolo detecta mejor este tipo de cavidades conductoras que el dispositivo Wenner.

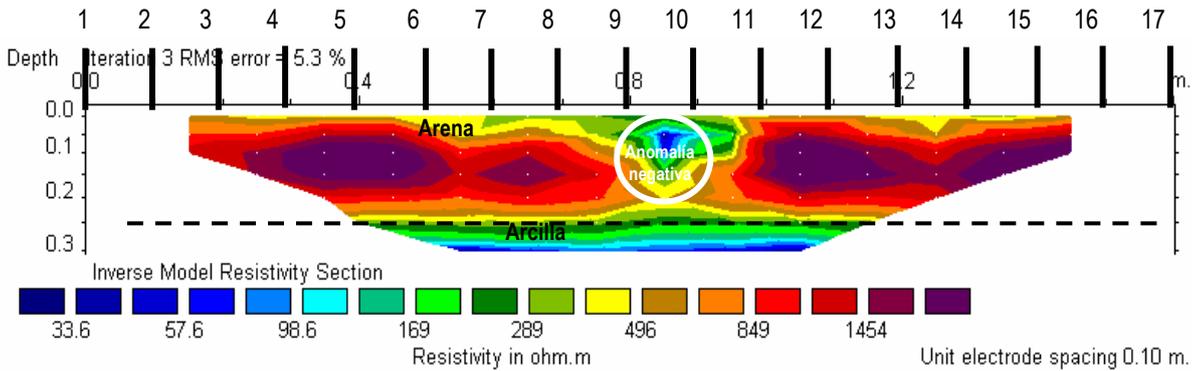
El tamaño del hueco se puede estimar bien a partir de la posición del centro y del perímetro de la anomalía. De la imagen se deduce que el hueco es muy probablemente de sección circular, cuyo diámetro será el del área afectada por la anomalía.

Conclusiones

1.- El Dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un hueco relleno de arcilla. La resolución de este dispositivo es superior a la Wenner, ya que en este caso la imagen producida por el hueco no se solapa con la imagen generada por un nivel cercano también conductor (estrato de arcilla). El resultado es una anomalía negativa de forma circular y su centro bien situado bajo los electrodos nº9 y nº10, a distancia 0,85 m.

2.- El centro de la supuesta cavidad rellena de material arcilloso (conductor) y el centro de la anomalía coinciden perfectamente en su posición horizontal y vertical.

3.- El tamaño del hueco se puede deducir fácilmente a partir de la forma circular de la anomalía, ya que son coincidentes la posición real del hueco con la posición de la anomalía.



5.3.10 EXPERIENCIA 8: BLOQUE DE ARCILLA humedad 6%

Este apartado incluye dos ensayos realizados en la experiencia 8 con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

5.3.10.1 BLOQUE DE ARCILLA humedad 6% -Dispositivo Wenner-

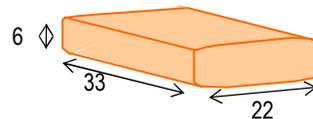
5.3.10.2 BLOQUE DE ARCILLA humedad 6% -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Modelo

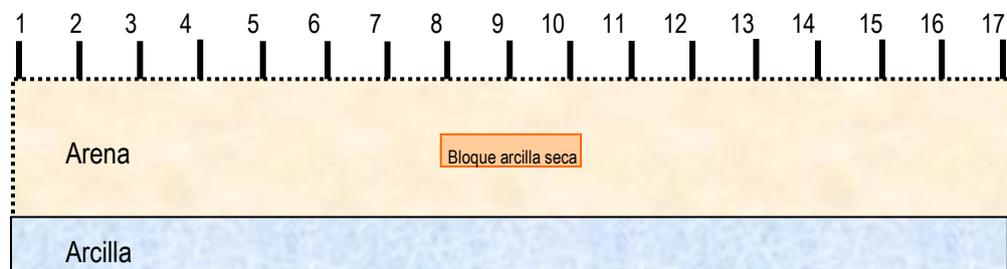
El modelo simula un hueco de sección rectangular relleno de arcilla. Se ha utilizado un bloque de arcilla enterrado en la arena a una profundidad de 10 cm, midiendo desde la superficie hasta el techo del bloque.

La arcilla tiene una humedad media y se desconoce cual será su comportamiento o contraste dentro de la arena. El modelo es similar al de la experiencia 7 (apartado 5.3.9), pero en este caso el hueco relleno de arcilla se encuentra a mayor profundidad y su humedad es similar a la de la arena que lo rodea.

Para simular la cavidad rellena de arcilla se empleará un bloque con las dimensiones que a continuación se detallan (mediciones en cm):



El bloque se colocó centrado bajo el electrodo n°9. En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. El hueco relleno de arcilla que se ha simulado tiene forma rectangular con una sección de 6 cm de alto por 22 cm de ancho, y tiene un espesor de recubrimiento de 10 cm de arena.



Mediciones

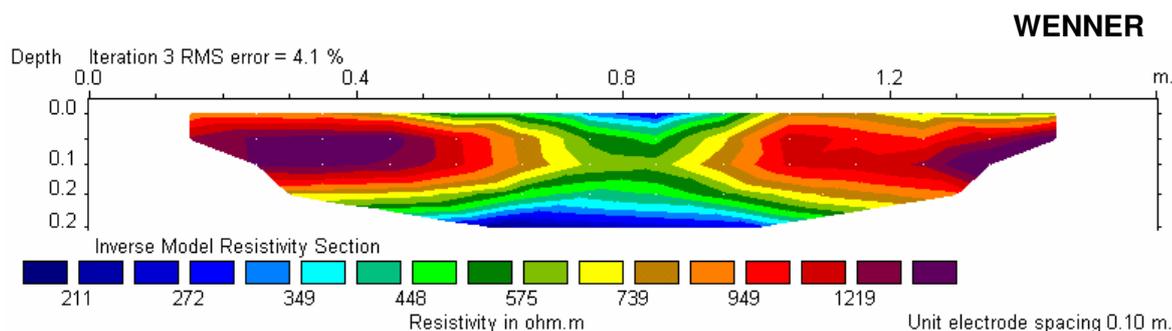
Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles, que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm

5.3.10.1 BLOQUE DE ARCILLA humedad 6% -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores medios de resistividad (500 ohm.m) provocada por la presencia del bloque de arcilla en el estrato de arena. La imagen tiene un sorprendente parecido con la obtenida en la experiencia 7 del subapartado 5.3.9.1, donde también se simuló un hueco de arcilla pero con menor humedad y forma cilíndrica. Resulta lógico relacionar la conductividad del bloque de arcilla con la capacidad de cambio catiónico de los minerales arcillosos que lo forman, proporcionando un efecto similar al de la conductividad iónica del agua.

Para esta experiencia la anomalía también tiene forma de pinzamiento, con una banda resistiva correspondiente al estrato de arena que sufre un adelgazamiento en su espesor justamente coincidiendo con la posición del bloque de arcilla enterrado. El estrato de arena sufre en su sección de resistividad un brusco adelgazamiento y corte bajo los 0,8 m de distancia, lugar donde se encuentra enterrado el bloque de arcilla.



En la imagen se ha superpuesto la posición real del bloque de arcilla, centrado bajo los electrodos nº8 y nº10, y se puede comprobar como el encaje de la anomalía es perfecto para esa posición.

Por la imagen que presenta el perfil de resistividad no se puede determinar el tamaño del cilindro de arcilla. En la experiencia 7, se formuló el supuesto de que la altura del hueco pudiera ser la altura de todo el estrato de arena, ya que afectaba por igual a toda esa banda. En este caso la imagen es idéntica, a pesar de que se sabe

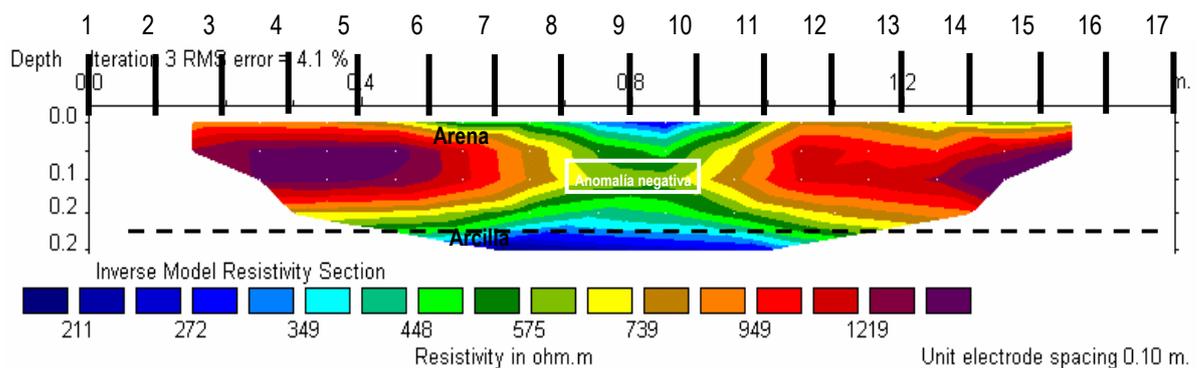
que el bloque únicamente tiene 6 cm de altura. Se concluye por tanto que se puede conocer la posición de un hueco relleno de arcilla, no así su verdadera dimensión.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta muy bien huecos rellenos de arcilla, siempre y cuando tenga suficiente contraste de resistividad con su entorno. Puesto que la arcilla tiene en general valores de resistividad bajos (Orellana, 1982), presenta en este caso una anomalía de resistividad media (500 ohm.m) que contrasta claramente con los altos valores del estrato de arena (1200 ohm.m).

2.- La imagen de la anomalía tiene una forma de adelgazamiento de la banda resistiva que caracteriza el estrato de arena. El plano de simetría de esa silueta con forma de adelgazamiento y corte que aparece en la imagen coincide exactamente con el punto donde se encuentra la cavidad rellena de arcilla.

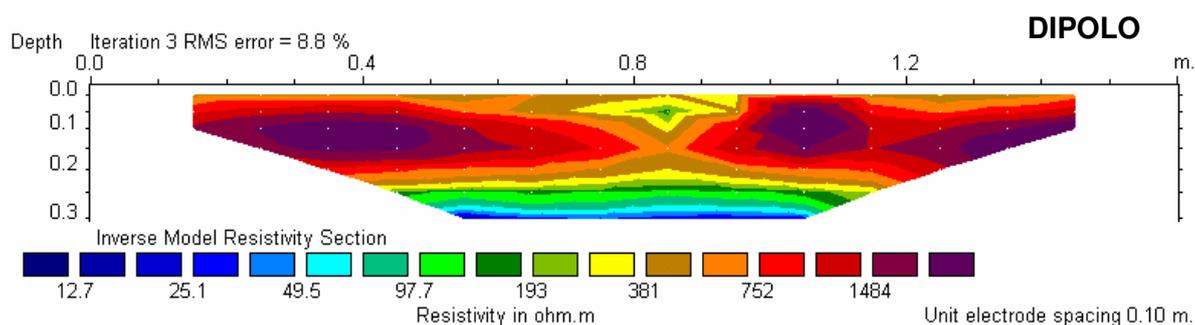
3.- La posición del hueco relleno de arcilla se localiza con precisión, pero no así su forma, ya que sus dimensiones reales no son fáciles de determinar.



5.3.10.2 BLOQUE DE ARCILLA humedad 6% - Dispositivo Dipolo-dipolo -

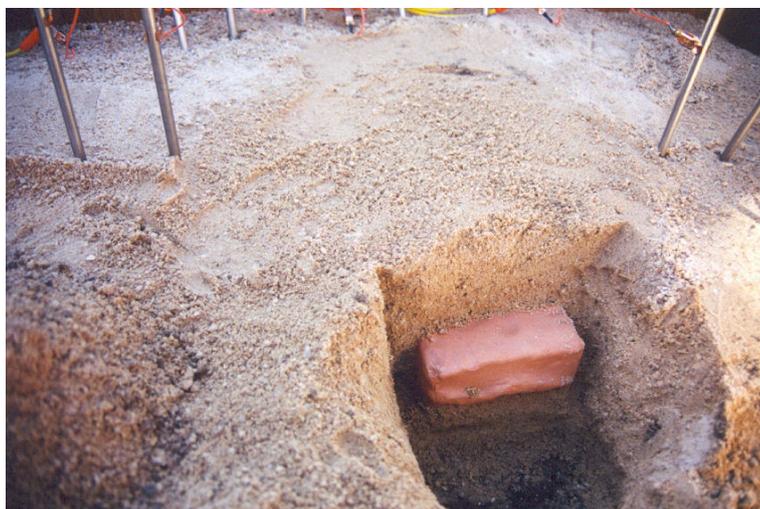
Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores bajos de resistividad (< de 200 ohm.m) situada bajo los electrodos nº8 y nº10 (a 0,80 m). Es una anomalía similar a la vista en la experiencia 7 (subapartado 5.3.9.2), donde también se simuló un hueco relleno de arcilla, pero con mayor humedad, menor profundidad y sección circular de 15 cm de diámetro. La profundidad de su centro geométrico es 8 cm desde la superficie, dato que no coincide con la profundidad real del bloque de arcilla, cuyo centro está a 13 cm de profundidad.



A diferencia de la imagen obtenida con dispositivo Wenner, donde únicamente se observaba un pinzamiento en las isolíneas de alta resistividad, en este caso se obtiene un área cerrada y que está claramente separada del estrato de arcilla infrayacente, aunque la anomalía no se localiza en la posición real del bloque arcilloso. La anomalía está desplazada hacia techo 5 cm. De cualquier modo, el dispositivo Dipolo-dipolo detecta mejor este tipo de situaciones equivalentes a cavidades conductoras que el dispositivo Wenner.

El tamaño del hueco se puede estimar bien a partir del perímetro de la anomalía, pero su profundidad no. La profundidad real del bloque de arcilla coincide con el lugar donde la banda resistiva del estrato de arena sufre el máximo adelgazamiento. De la imagen se deduce que el hueco es muy probablemente de sección rectangular u ovalada, con una dimensiones aproximadas similares a las de la anomalía.

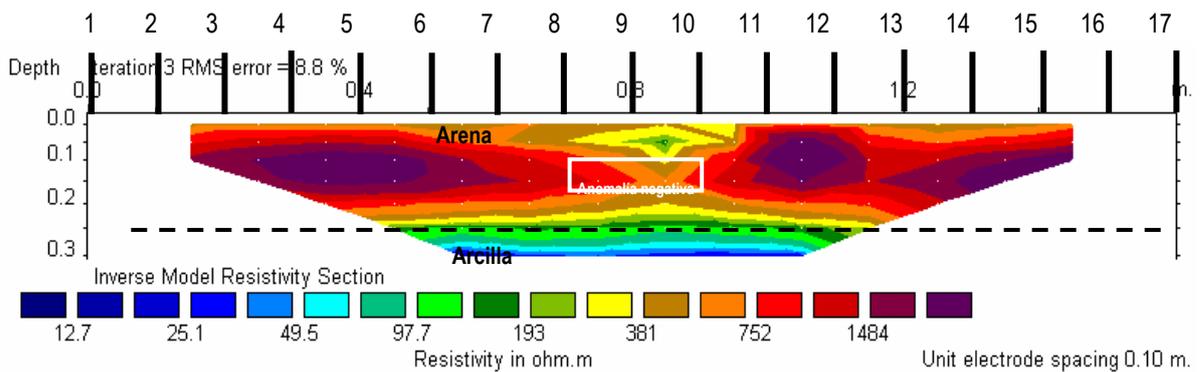


Conclusiones

1.- El Dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un hueco relleno de arcilla de baja humedad en un estrato de arena. La resolución de este dispositivo es superior a la Wenner, pero imprecisa en cuanto a la profundidad. El resultado es una anomalía negativa de forma lenticular con su centro algo desviado.

2.- El centro de la cavidad aparece desviado hacia arriba en cuanto a profundidad (a 8 cm en lugar de 13 cm) y hacia la derecha (a 0,85 m en lugar de 0,80 m).

3.- El tamaño del hueco se puede deducir fácilmente a partir de la forma lenticular de la anomalía, ya que sus dimensiones son similares a las del hueco real. Sin embargo profundidad es la correspondiente al punto de máximo adelgazamiento de la banda resistiva que identifica al estrato de arena.



5.3.11 EXPERIENCIA 9: LOSA VERTICAL

Este apartado incluye dos ensayos realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

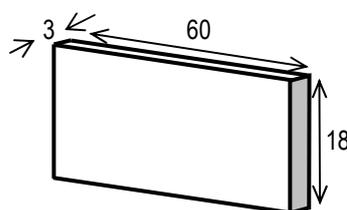
5.3.11.1 LOSA VERTICAL -Dispositivo Wenner-

5.3.11.2 LOSA VERTICAL -Dispositivo Dipolo-dipolo-

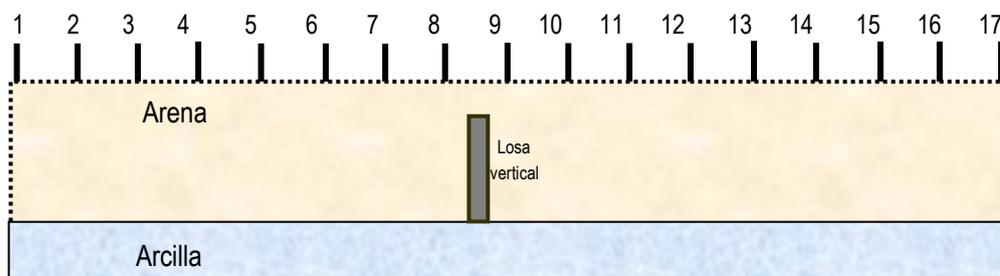
Modelo

El modelo simula una estrecha franja vertical rellena de material muy resistivo, como un dique de cuarzo o un muro arquitectónico enterrado, por ejemplo. Un detalle importante es la profundidad, ya que se ha colocado la losa a una profundidad importante. Se simula así tanto un dique de cuarzo o como un muro enterrado con un recubrimiento muy significativo, es decir, un objeto resistivo vertical enterrado. Para realizar el modelo empírico se ha empleado una losa de hormigón en disposición vertical y colocada transversalmente al perfil. La losa se apoya en el contacto arcilla-arena y está situada entre los electrodos nº8 y nº9.

Las dimensiones de la losa son las siguientes: 60x18x3 (mediciones en cm):



En el esquema inferior se observa una sección longitudinal bajo el perfil. El objeto simulado tendrá una sección con forma de tabla y dimensiones 3 cm de ancho por 18 cm de alto, y tiene un espesor de recubrimiento de 7 cm de arena. Se espera que actúe como pantalla resistiva, como pudiera hacerlo una fractura rellena de material resistivo (recristalizada) o un muro de sillares de caliza enterrado.



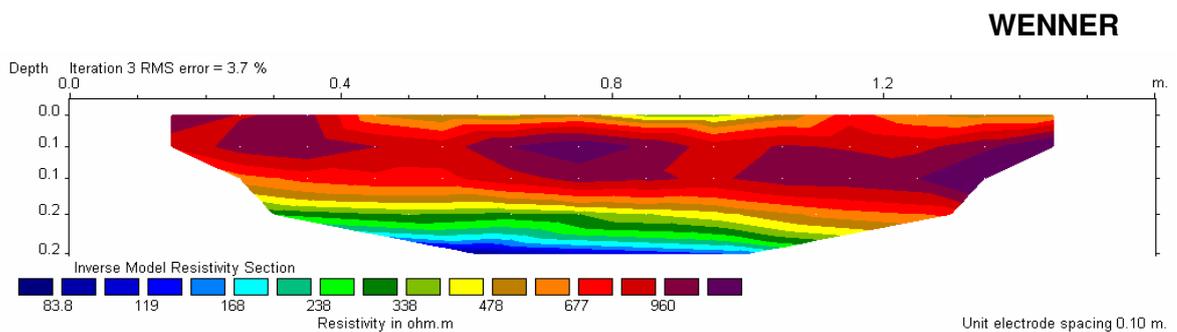
Mediciones

Se han realizado dos perfiles, uno mediante dispositivo Wenner con una adquisición total de 40 datos repartidos en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm, y otro con dispositivo Dipolo-dipolo con una adquisición total de 90 datos repartidos en 9 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 30 cm.

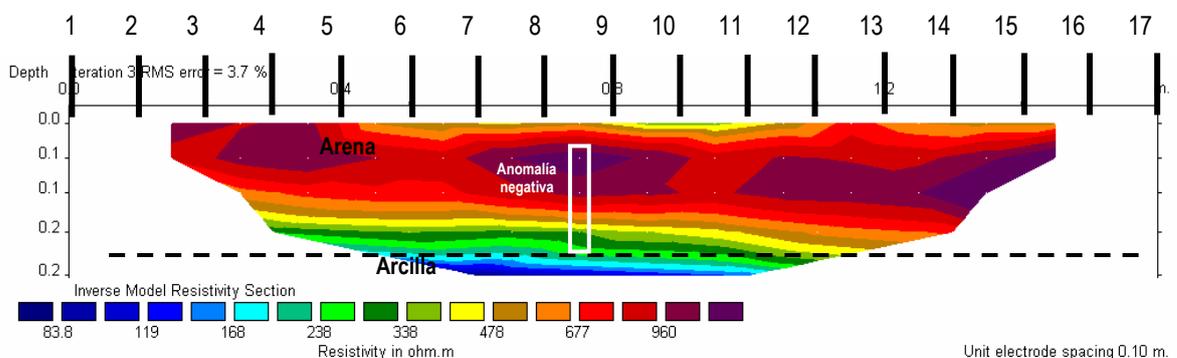
5.3.11.1 LOSA VERTICAL -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 960 ohm.m) El perfil muestra una imagen de forma ovalada con su eje mayor en posición horizontal. Su estilo y forma no difiere de las anomalías generadas a partir de huecos profundos de pequeño diámetro (ver experiencia 4, subapartado 5.3.6.3 Tubo de PVC de 12 cm de diámetro a 15 cm de profundidad)



Pero se distingue una notable diferencia entre estas anomalías positivas (la del presente ensayo y las de la citada experiencia 4) y otras anomalías de aspecto similar detectadas en experiencias con huecos más grandes o menos profundos. En estos casos, la resistividad de la anomalía tiene unos valores similares o compartidos con los del estrato de arena, mientras que en otros experimentos la anomalía concentraba en exclusiva los valores de máxima resistividad.



Conclusiones

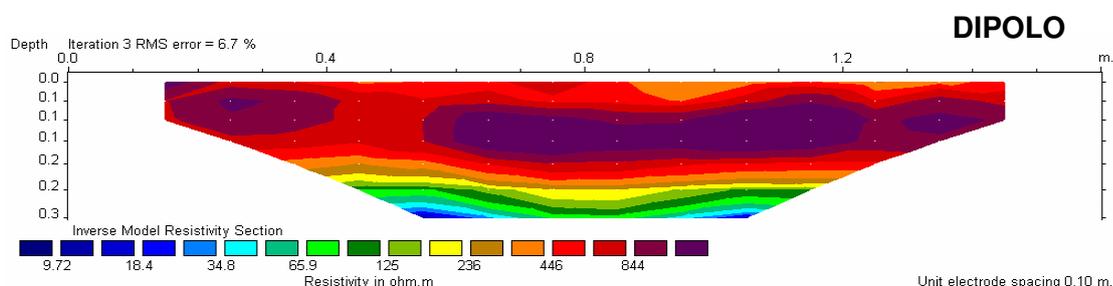
1.- El dispositivo Wenner se muestra como relativamente eficaz para la localización de una franja vertical resistiva. El perfil presenta una anomalía de resistividad positiva con forma ovalada situada con gran precisión en el lugar ocupado por la losa vertical, centrada bajo los electrodos nº8 y nº9.

2.- La profundidad y dimensiones reales del objeto enterrado no puede ser deducida a por la interpretación de las imágenes del perfil. La anomalía del perfil está bien centrada en la posición de la losa, pero su forma no tiene refleja su aspecto. La anomalía tiene forma ovalada con su eje mayor de longitud similar a la de la losa, pero en posición horizontal.

5.3.11.2 LOSA VERTICAL -Dispositivo Dipolo-dipolo-

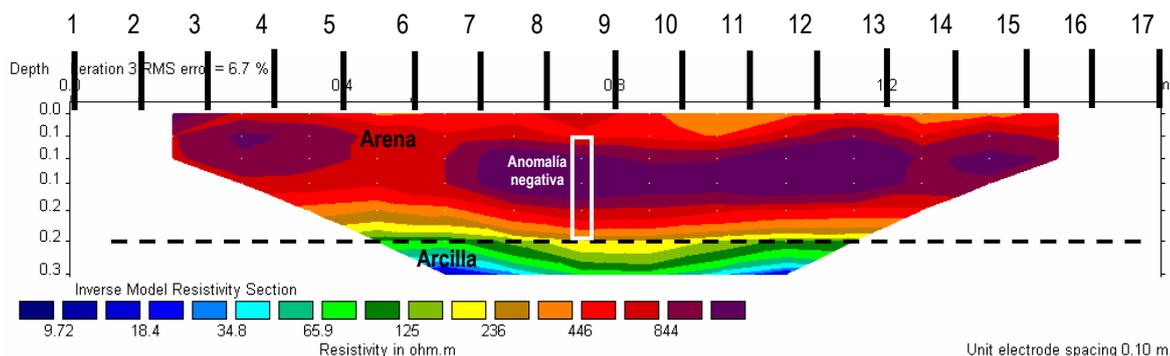
Resultados

En el perfil obtenido no se observa ninguna anomalía. Únicamente se contempla el estrato de arena con valores altos de resistividad (> de 800 ohm.m) El perfil muestra una banda continua y horizontal sin anomalías que puedan estar relacionadas con la losa vertical enterrada. En cierto modo tiene similitud con el perfil Dipolo-dipolo obtenido en la experiencia 6, subapartado 5.3.8.2 bloque de sal, donde no se observaban anomalías relacionadas.



Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no es útil para localizar una franja de material resistivo en posición vertical y con recubrimiento importante. El perfil no presenta anomalías en su distribución de resistividad que puedan estar relacionadas con el objeto enterrado.



5.3.12 EXPERIENCIA 10: CILINDRO HUECO VERTICAL

Se detallan a continuación los ensayos de la experiencia 10 realizados con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como a continuación se detalla:

- 5.3.12.1. Cilindro hueco vertical a distancia 15 cm
- 5.3.12.2. Cilindro hueco vertical a distancia 8 cm
- 5.3.12.3. Cilindro hueco vertical a distancia 4 cm
- 5.3.12.4. Cilindro hueco vertical a distancia 0 cm
- 5.3.12.5. Calibración arena sin huecos

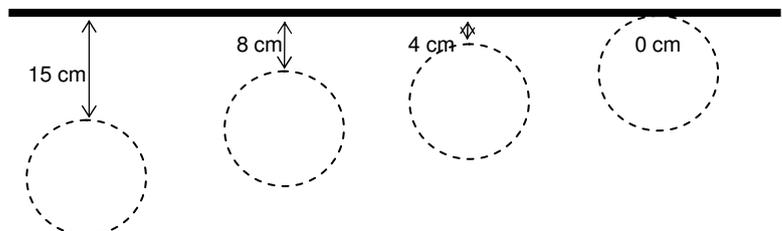
Modelo

Esta experiencia pretende analizar la influencia que tiene sobre el perfil un hueco situado a un lateral del perfil. Como se ha visto en el apartado 4.3.1, en los dispositivos de geofísica eléctrica por inyección de corriente el valor de la resistividad aparente está condicionado por todo el terreno afectado por el semibulbo de corriente inyectada. ¿Hasta qué punto puede afectar a un perfil de tomografía la presencia de un hueco cercano?

Se ha diseñado un supuesto caso en el que se realiza un perfil de tomografía en las inmediaciones de un pozo vertical relleno de aire. Para ello se ha excavado un cilindro vertical en el estrato de arena, junto al que se van a realizar cuatro perfiles distanciados 15 cm, 8 cm, 4 cm y 0 cm respectivamente. El cilindro excavado tiene un diámetro de 15 cm, ya que para tallar su forma en la arena se empleó como molde un tubo de hierro de ese diámetro.

En la figura adjunta se esquematiza la ejecución de la experiencia. La línea continua representa la dirección del perfil y el círculo de raya discontinua representa una vista en planta del hueco cilíndrico con la secuencia de 4 ensayos programados.

VISTA EN PLANTA
Distancia entre el hueco
vertical y la línea del perfil



Teóricamente cuanto menor sea la distancia entre el perfil y el hueco lateral, mayor será la superficie del bulbo de corriente afectada por él, y más claro será su reflejo en forma de anomalía sobre el perfil de resistividad. Para el ensayo 10 -d- realizado a distancia 0 cm la mitad de ese bulbo de corriente estará afectada por la presencia del hueco, y la anomalía positiva será máxima.

Este experimento simula verdaderamente un hueco real en el terreno, ya que no se ha empleado para su ejecución ningún objeto enterrado, cuyas paredes puedan incidir en la respuesta eléctrica debido a su diferencia de resistividad con el estrato de arena en el que se encuentre. Éste es un verdadero hueco en el estrato de arena.

Mediciones

La experiencia 10 consta de cinco ensayos, completando un total de diez perfiles, cinco mediante dispositivo Wenner y cinco mediante dispositivo Dipolo-dipolo. Cada perfil Wenner contiene 40 medidas repartidas en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm. Los perfiles Dipolo-dipolo realizan 90 medidas en 9 niveles que alcanzan una profundidad de investigación de 30 cm.

El primer ensayo, denominado 10 -a-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco cilíndrico vertical a una distancia de 15 cm y comparar esta imagen con las que se obtengan en experiencias siguientes a menor distancia.

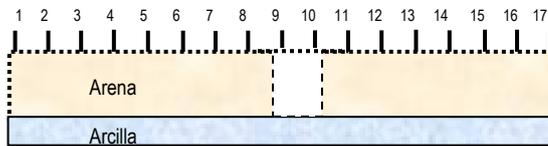
El segundo ensayo, denominado 10 -b-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco cilíndrico vertical a una distancia de 8 cm.

El tercer ensayo, denominado 10 -c-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco cilíndrico vertical a una distancia de 4 cm.

El cuarto ensayo, denominado 10 -d-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el hueco cilíndrico vertical a una distancia de 0 cm.

El último ensayo, denominado 10 -e-, se realiza en un modelo sin huecos y sirve para calibrar y comparar las anomalías que presentan los perfiles anteriores con las que da el terreno en ausencia de cavidades.

SECUENCIA DE ENSAYOS EN LA EXPERIENCIA 10: CILINDRO HUECO VERTICAL



PERFIL TRANSVERSAL DEL MODELO



VISTAS EN PLANTA

Ensayo 10 -a-

Cilindro hueco vertical a 15 cm



Ensayo 10 -b-

Cilindro hueco vertical a 8 cm



Ensayo 10 -c-

Cilindro hueco vertical a 4 cm



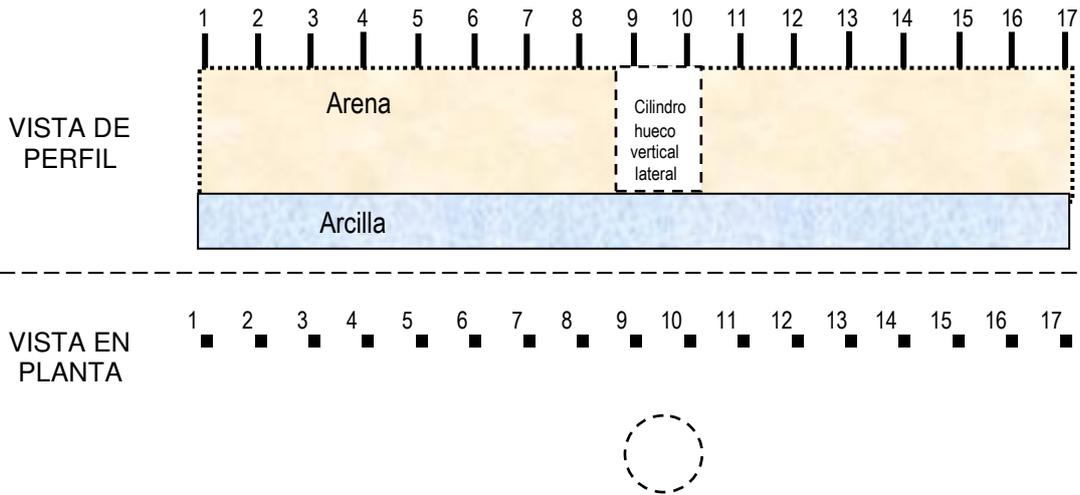
Ensayo 10 -d-

Cilindro hueco vertical a 0 cm

En todos los casos el cilindro hueco vertical tiene por altura todo el espesor de la capa de arena (25 cm) hasta llegar al nivel inferior de arcilla.

5.3.12.1 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 15 cm -

Se describe aquí el ensayo 10-a- de la experiencia 10: Cilindro hueco vertical a distancia 15 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el cilindro excavado simula el hueco con forma de pozo vertical situado en un lateral a 15 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del cilindro hueco con vistas en planta y en perfil del modelo experimental.

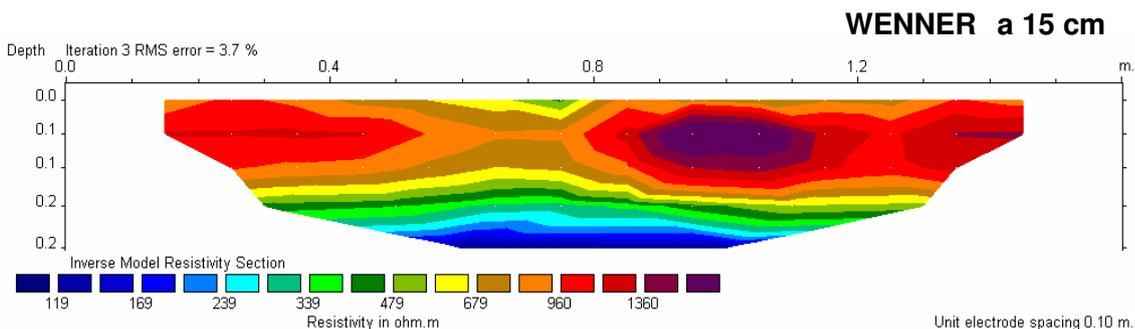


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.12.1.1 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 15 cm - -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía positiva muy clara de valores altos de resistividad (> de 1.300 ohm.m) y con forma ovalada. Sin embargo la posición de la anomalía no se corresponde con la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº10 y nº12.

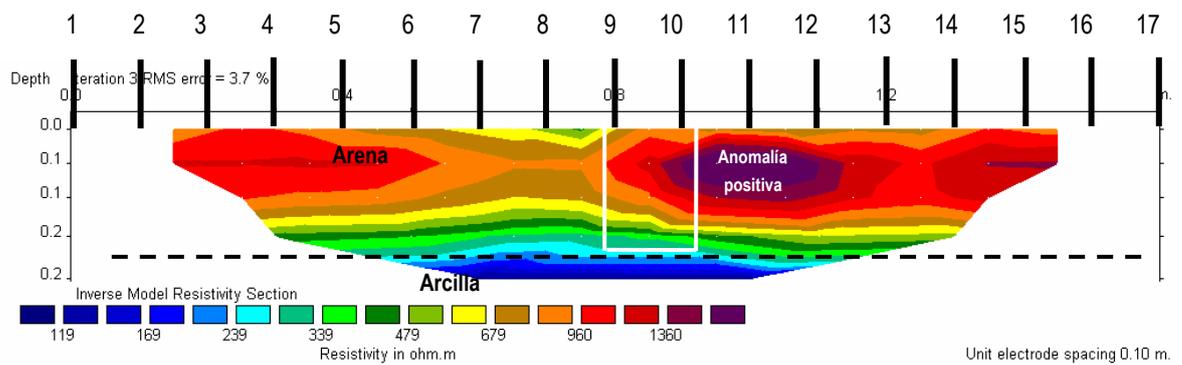


Podría suponerse, a la espera de nuevos ensayos, que el hueco cilíndrico lateral provoca una anomalía positiva que aparece desplazada en el perfil 15 cm hacia la derecha.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner sirve aparentemente para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 15 cm de distancia. El resultado no es definitivo porque la anomalía positiva se encuentra desplazada a 15 cm hacia la derecha, si bien próximos experimentos desvelarán si está relacionado ese desplazamiento con la distancia hueco-perfil.

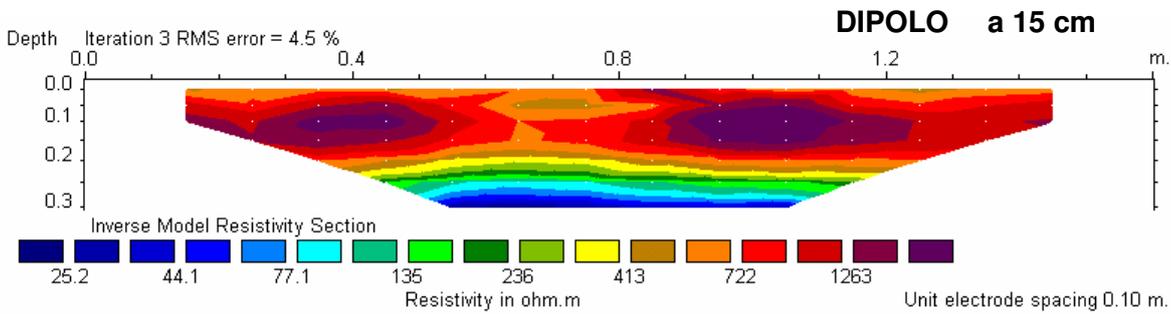
2.- El tamaño del hueco no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena.



5.3.12.1.2 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 15 cm - **-Dispositivo Dipolo-dipolo-**

Resultados

En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas muy claras de valores altos de resistividad (> de 1.200 ohm.m) y con forma ovalada. Sin embargo ninguna de las dos anomalías está bien situada en el lugar que le corresponde a la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, pero las anomalías figuran en el perfil en otra posición, bajo los electrodos nº4 y nº6 para la primera anomalía y nº10 y nº12 para la segunda.

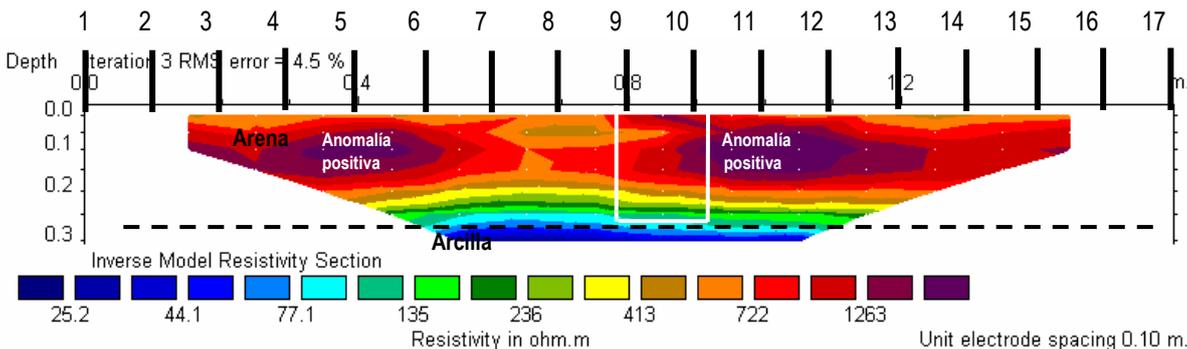


Podría suponerse, como en el ensayo anterior tipo Wenner, que esas anomalías estén relacionadas con la presencia del hueco cilíndrico lateral, y que existe algún tipo de relación entre la posición de esas anomalías y la posición del hueco a 15 cm del perfil.

Conclusiones

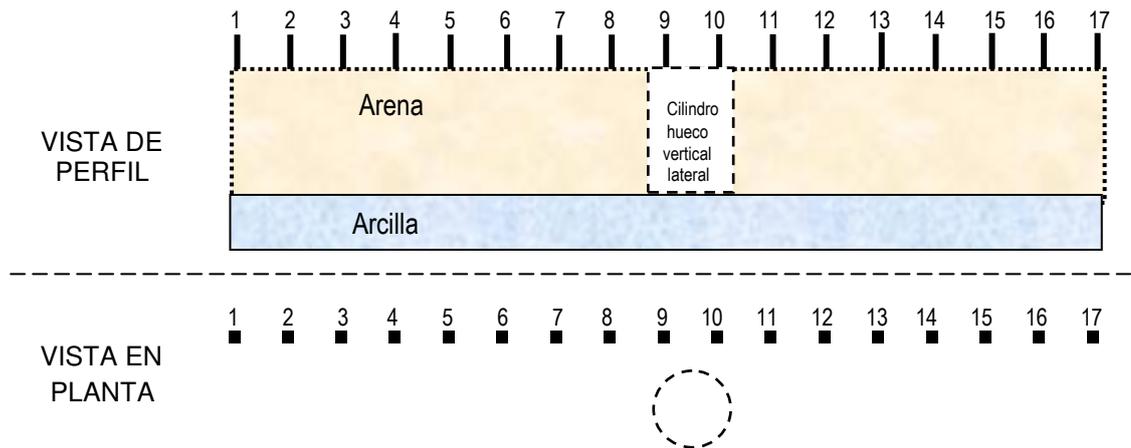
1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no sirve aparentemente para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 15 cm de distancia. El resultado no es definitivo porque las anomalías positivas se encuentran desplazadas a derecha e izquierda de la posición del hueco, si bien próximos experimentos desvelarán si está relacionado ese desplazamiento con la distancia hueco-perfil.

2.- El tamaño del hueco no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena.



5.3.12.2 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 8 cm -

Se describe aquí el ensayo 10-b- de la experiencia 10: Cilindro hueco vertical a distancia 8 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el cilindro excavado simula el hueco con forma de pozo vertical situado en un lateral a 8 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del cilindro hueco con vistas en planta y en perfil del modelo experimental.

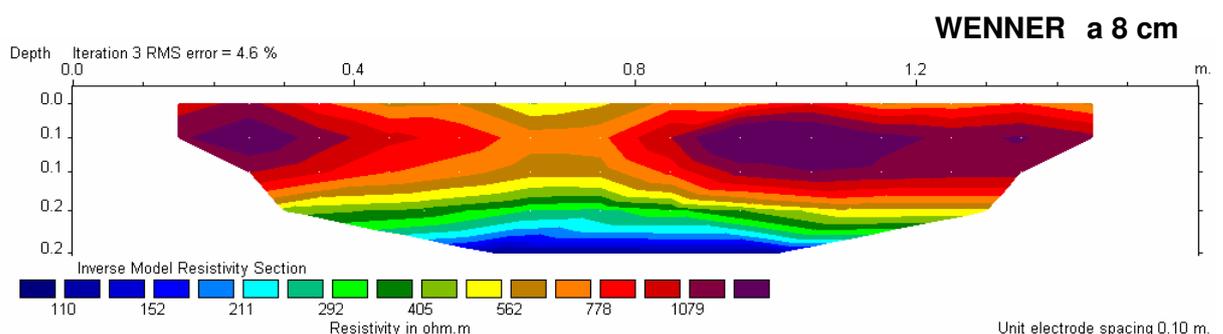


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.12.2.1 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 8 cm - -Dispositivo Wenner-

Resultados

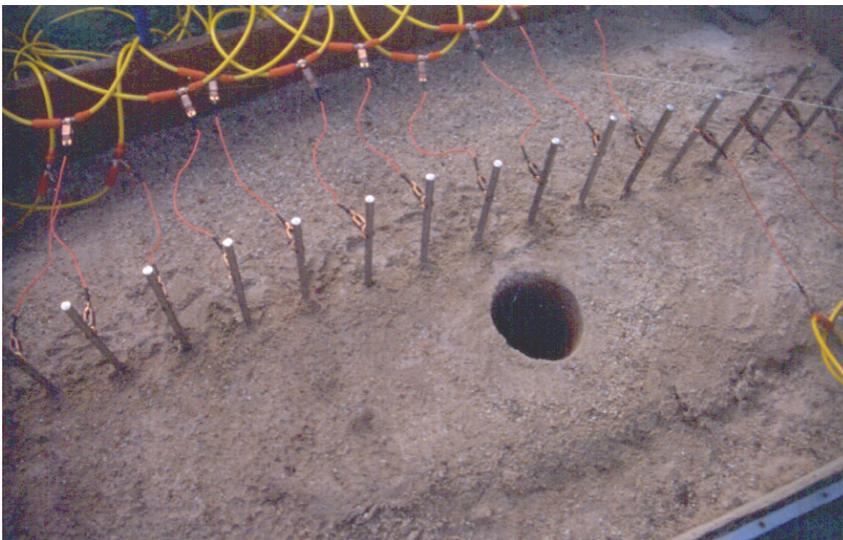
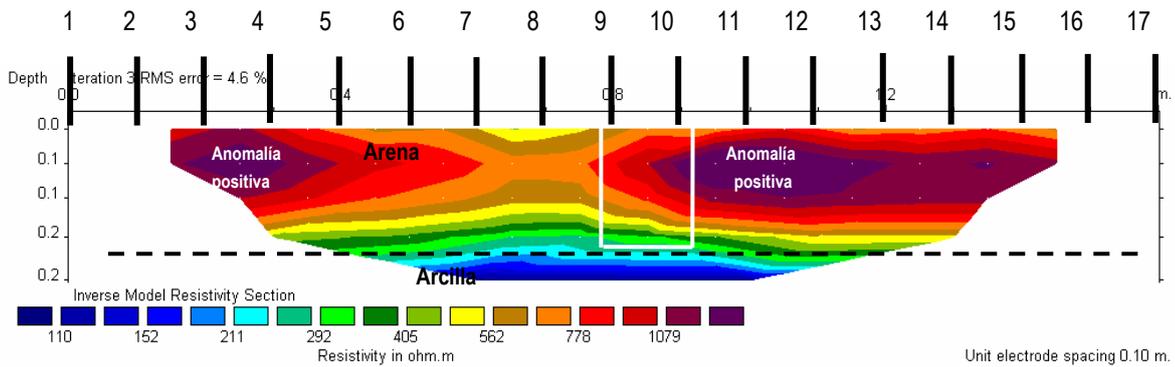
En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas de valores altos de resistividad ($>$ de 1.000 ohm.m) y con forma ovalada pero que no parecen estar relacionadas con el hueco ya que ninguna de ellas se localiza en el correspondiente a la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, pero las anomalías figuran en el perfil en otra posición, bajo los electrodos nº3 y nº4 para la primera anomalía y nº10 y nº12 para la segunda.



Esas anomalías no parecen en absoluto relacionadas con la presencia del hueco cilíndrico lateral situado a 8 cm del perfil.

Conclusiones

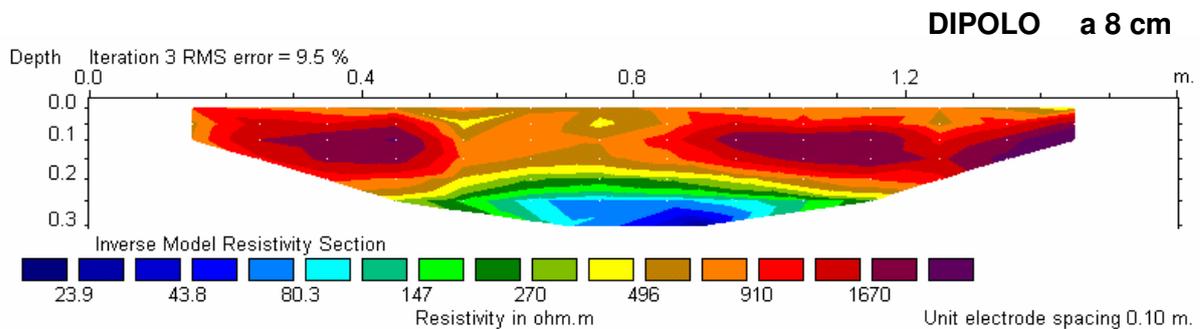
1.- El dispositivo Wenner no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 8 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.



5.3.12.2.2 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 8 cm -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

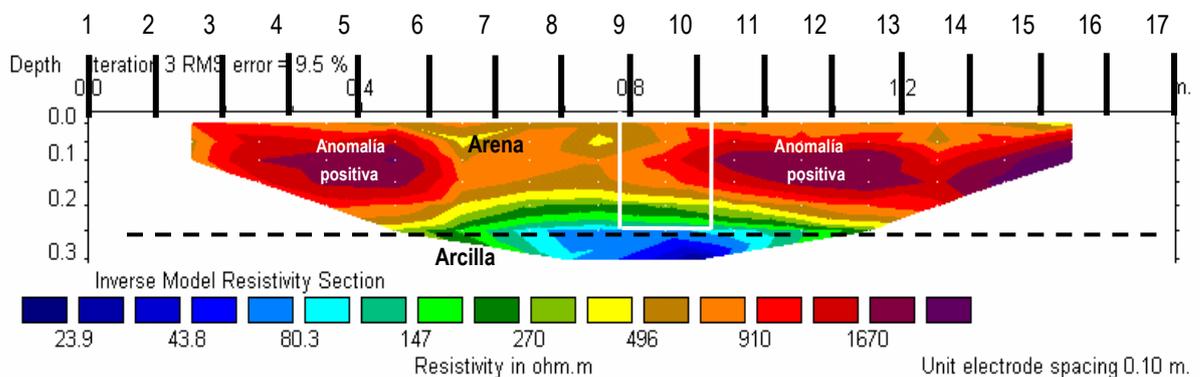
En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas de valores altos de resistividad (> de 1.600 ohm.m) y con forma ovalada. Sin embargo ninguna de las dos anomalías está bien situada en el lugar que le corresponde a la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, pero las anomalías figuran en el perfil en otra posición, bajo los electrodos nº4 y nº6 para la primera anomalía y nº10 y nº13 para la segunda.



Esas anomalías no parecen en absoluto relacionadas con la presencia del hueco cilíndrico lateral situado a 8 cm del perfil.

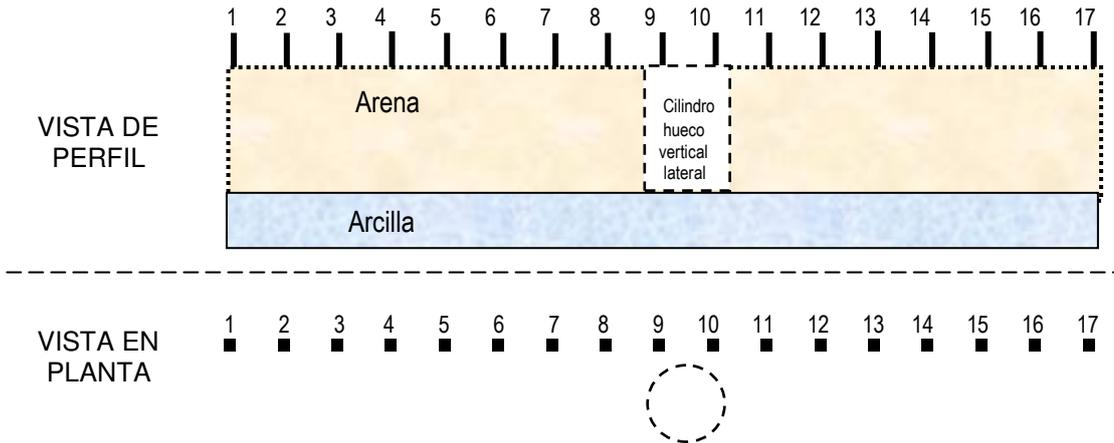
Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 8 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.



5.3.12.3 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 4 cm -

Se describe aquí el ensayo 10-c- de la experiencia 10: Cilindro hueco vertical a distancia 4 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el cilindro excavado simula el hueco con forma de pozo vertical situado en un lateral a 4 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del cilindro hueco con vistas en planta y en perfil del modelo experimental.

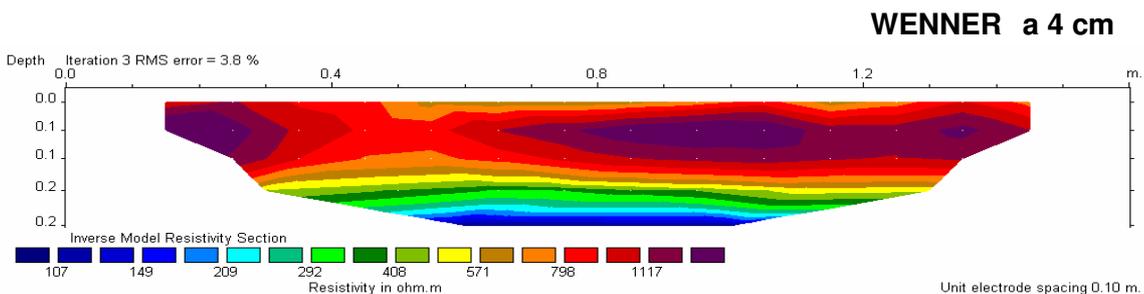


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.12.3.1 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 4 cm --Dispositivo Wenner-

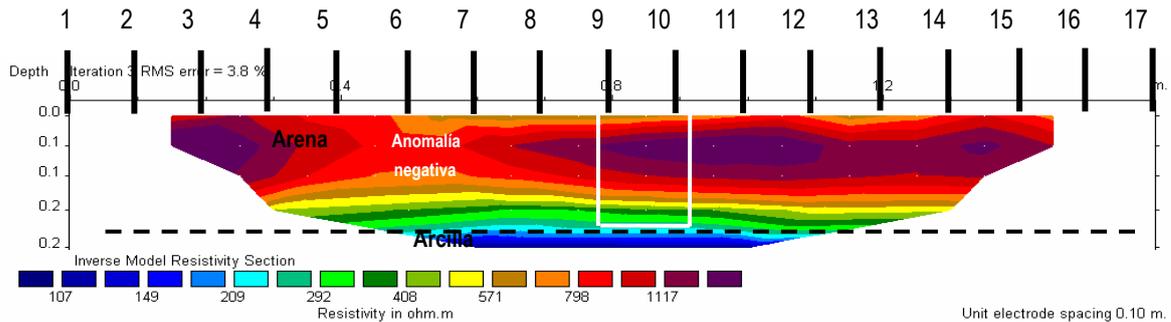
Resultados

En el perfil obtenido se observa un nivel continuo de valores altos de resistividad (> de 1.000 ohm.m) correspondiente al estrato de arena. No se detectan anomalías, únicamente entre los electrodos nº5 y nº7 se observa un adelgazamiento de ese nivel resistivo a valores algo más bajos (800 ohm.m) pero que son resistividades normales para esta arena. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y a una distancia muy próxima, pero esto no parece influir en el perfil de tomografía, que sigue sin presentar anomalías relacionadas con el cilindro hueco situado en un lateral.



Conclusiones

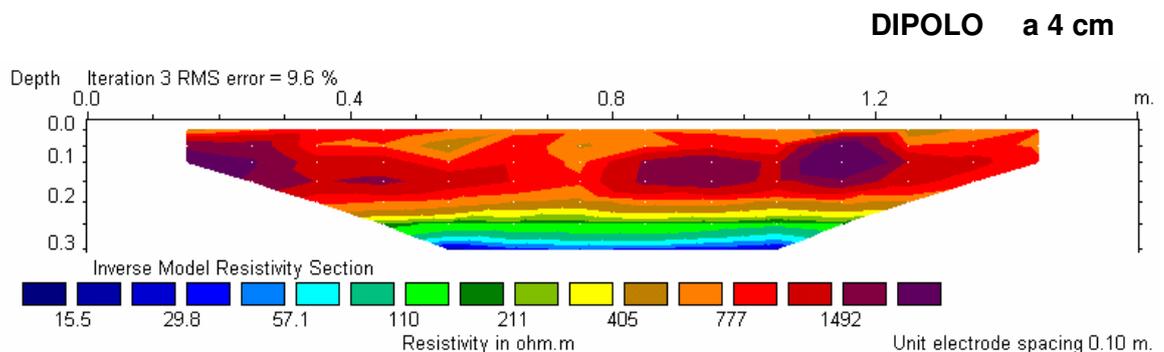
1.- El dispositivo Wenner no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 4 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.



5.3.12.3.2 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 4 cm - -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

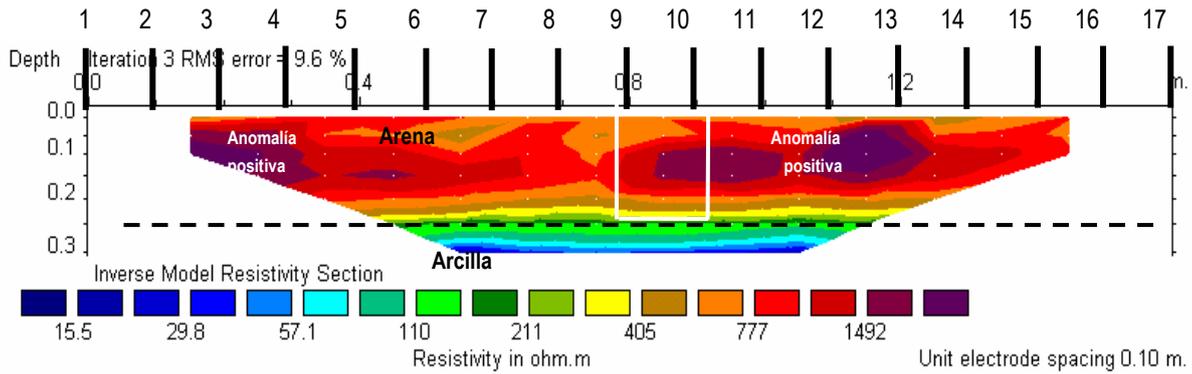
En el perfil obtenido se observan tres anomalías positivas de valores altos de resistividad (> de 1.490 ohm.m). Sin embargo ninguna de estas anomalías está bien situada en el lugar que le corresponde a la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, pero las anomalías figuran en el perfil en otra posición, bajo el electrodo nº3 la primera, y bajo los electrodos nº10 y nº13 las dos restantes.



Esas anomalías no parecen en absoluto relacionadas con la presencia del hueco cilíndrico lateral situado a 4 cm del perfil.

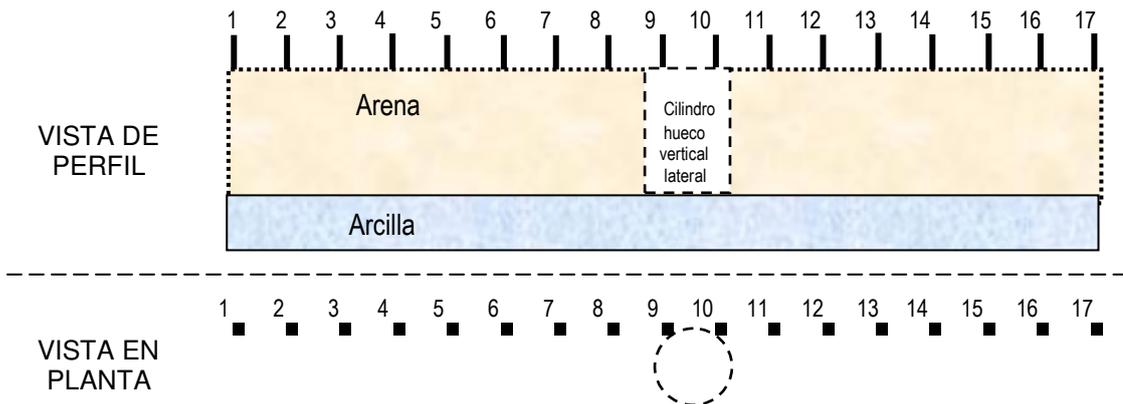
Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 4 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.



5.3.12.4 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 0 cm -

Se describe aquí el ensayo 10-c- de la experiencia 10: Cilindro hueco vertical a distancia 4 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el cilindro excavado simula el hueco con forma de pozo vertical situado en un lateral a 4 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del cilindro hueco con vistas en planta y en perfil del modelo experimental.

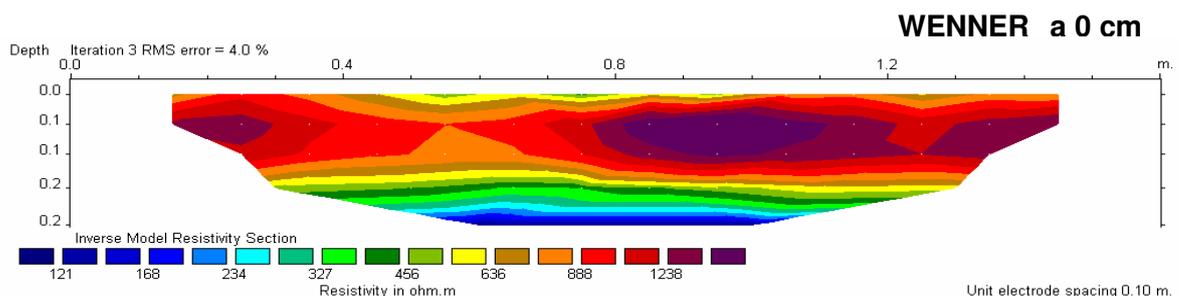


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.12.4.1 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 0 cm - **-Dispositivo Wenner-**

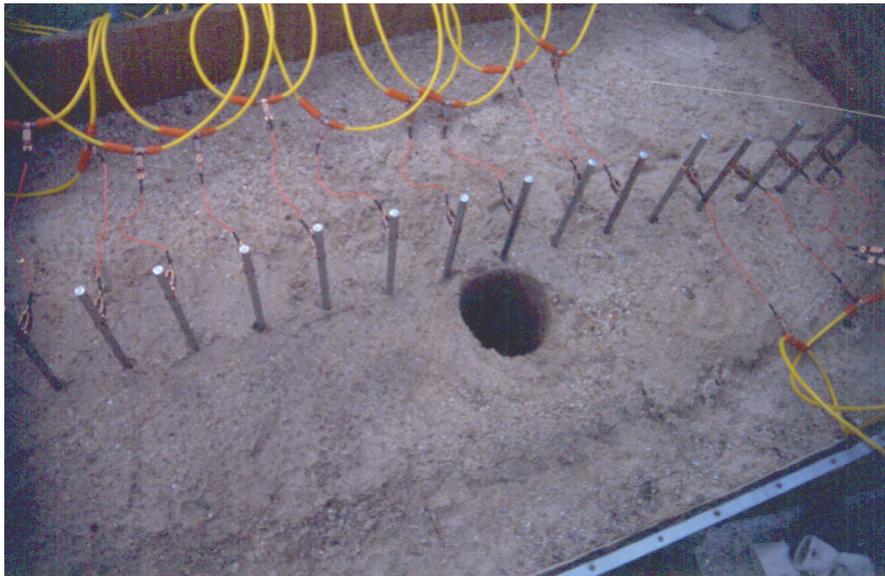
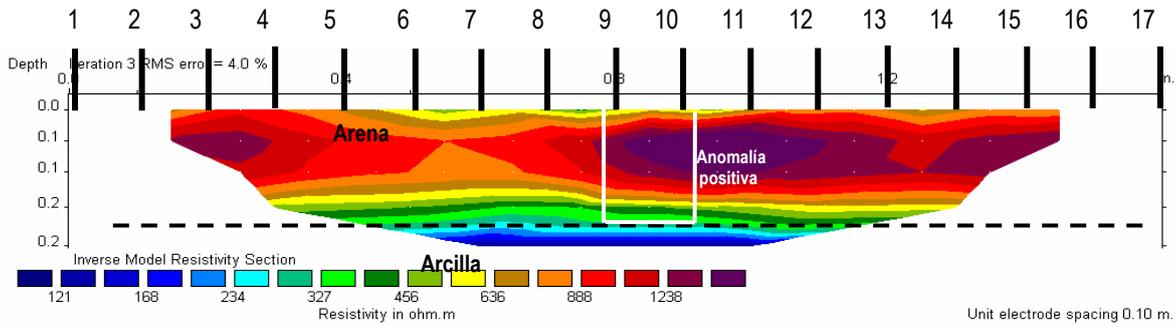
Resultados

En el perfil obtenido se observa un nivel continuo de valores altos de resistividad (> de 1.000 ohm.m) correspondiente al estrato de arena. No se detectan anomalías, únicamente entre los electrodos nº6 y nº7 se observa un adelgazamiento de ese nivel resistivo a valores algo más bajos (800 ohm.m) pero que son resistividades normales para esta arena. El cilindro hueco está situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y a una distancia muy próxima, pero esto no parece influir en el perfil de tomografía, que sigue sin presentar anomalías relacionadas con el cilindro hueco situado en un lateral.



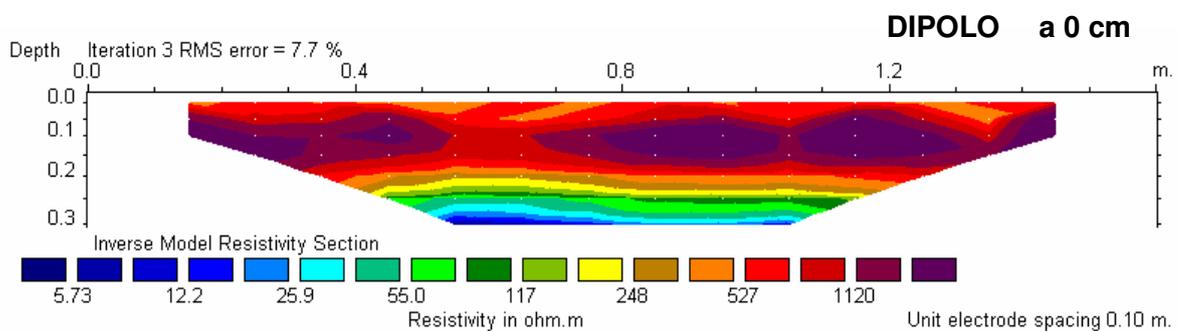
Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 4 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.

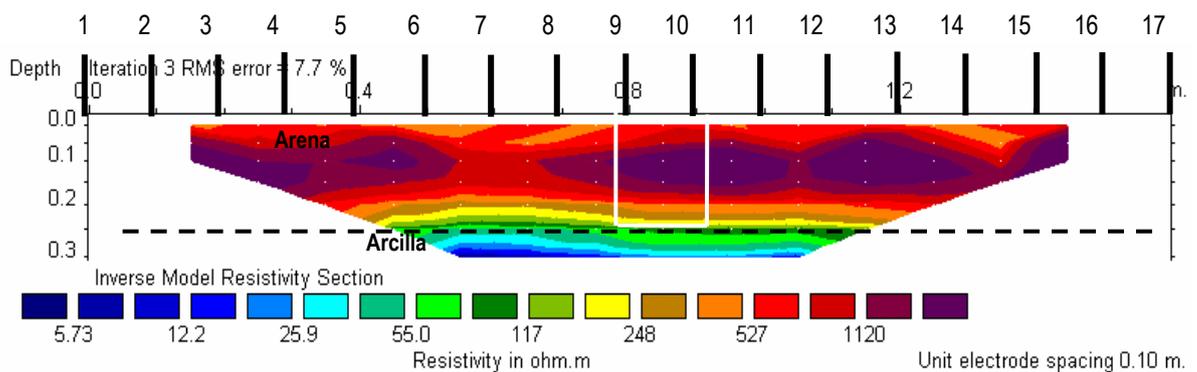


5.3.12.4.2 CILINDRO HUECO VERTICAL -a distancia 0 cm - **-Dispositivo Dipolo-****Resultados**

En el perfil obtenido se observa un nivel continuo de valores altos de resistividad (> de 1.000 ohm.m). No se detectan anomalías relacionadas con la posición del hueco. El cilindro hueco esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, pero en el perfil no se aprecia ningún incremento de la resistividad en esa zona por efecto del hueco.

**Conclusiones**

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo no sirve para detectar la presencia de un hueco cilíndrico vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 0 cm de distancia. El perfil no presenta anomalías relacionadas con la presencia del hueco.

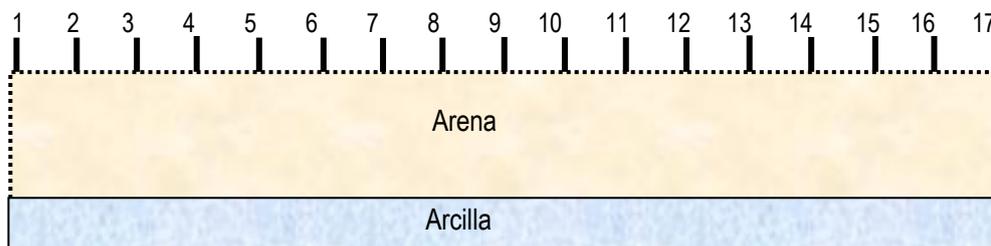


5.3.12.5 CALIBRACIÓN ARENA SIN HUECOS

Visto el resultado de la secuencia de ensayos 10-a- a 10-d-, donde se han obtenido perfiles de tomografía que sí presentan anomalías pero no relacionadas con el hueco lateral, se procede a contrastar dichos perfiles con otro que no tenga cavidades de ningún tipo, esperando que presente un aspecto similar.

En el apartado 5.3.2 (Experiencia 0), se comprobó que el estrato de arena presenta ligeras variaciones en su resistividad relacionadas con la humedad de sus poros. Suponiendo que las anomalías que han aparecido en los ensayos 10-a- a 10-d- se deben a esta variable distribución de humedad y no a la presencia del hueco lateral, tendría que obtenerse una imagen similar para este ensayo, donde no hay huecos ni objetos enterrados.

Se agrega éste a la secuencia de ensayos de la experiencia 10 (Cilindro hueco vertical) con la denominación de Ensayo 10-e-: Calibración arena sin huecos. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la composición del modelo experimental, constituido únicamente por un estrato de arena de espesor 25 cm y otro de arcilla en el sustrato.



Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

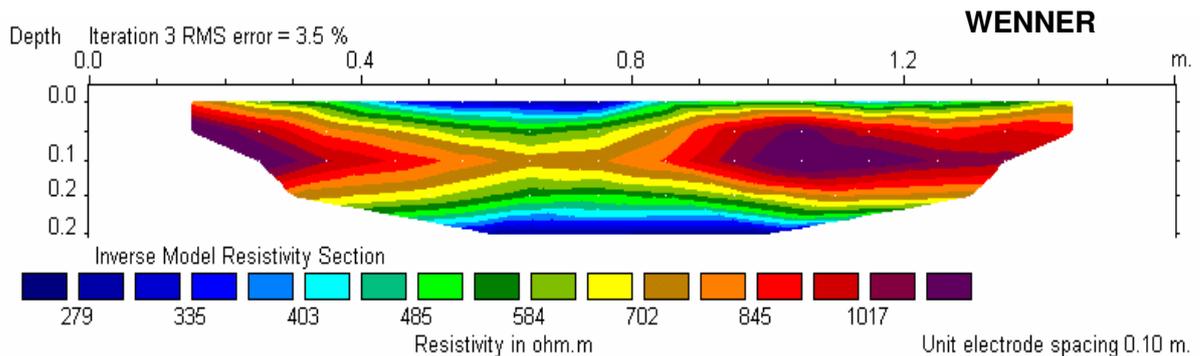
5.3.12.5.1 CALIBRACIÓN ARENA SIN HUECOS -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas de valores altos de resistividad (> de 1.000 ohm.m) y con forma ovalada. Es un perfil de aspecto similar a los obtenidos en ensayos anteriores, con un nivel resistivo correspondiente al estrato de arena que contiene variaciones en su resistividad interna.

Este ensayo se realizó 48 horas después de la secuencia 10-a- a 10-d- y tiene unas características propias que a continuación se comentan.

Se aprecia un nivel muy superficial de baja resistividad (< de 400 ohm.m) entre los electrodos nº5 y nº9 coloreado en tonos azules. Esta mayor conductividad de la superficie del estrato de arena es debida a que hubo que agregar agua junto a la base de esos electrodos para mejorar su contacto eléctrico, ya que la escasa humedad de la arena lo hacía ser demasiado resistivo como para poder realizar la medición.



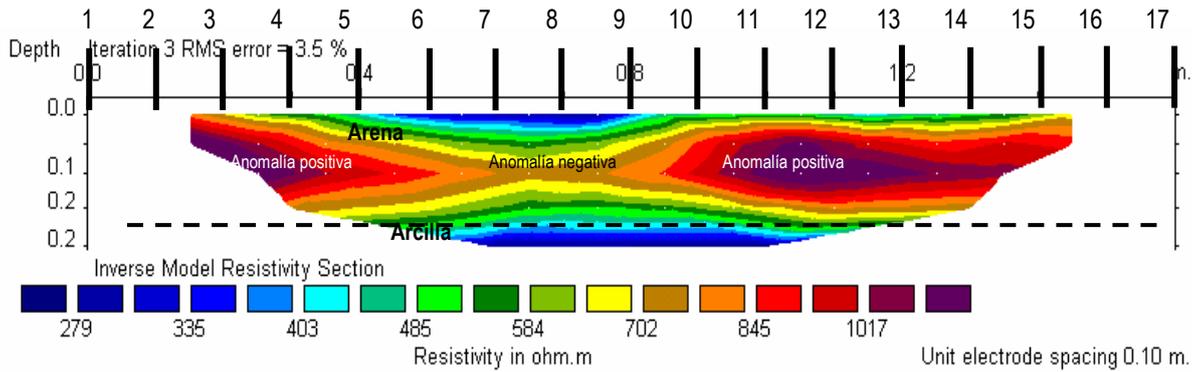
En el perfil aparecen dos anomalías positivas (> de 1000 ohm.m) situadas bajo los electrodos nº3 la primera y nº12 para la segunda. También podría decirse que ocurre lo contrario, es decir, que únicamente aparece una anomalía negativa (700 ohm.m) por adelgazamiento de ese nivel resistivo bajo el electrodo nº8. Estas anomalías se piensa que están relacionadas con la variación de humedad dentro del estrato, correspondiendo las anomalías positivas a las zonas menos húmedas y la anomalía negativa a la zona de mayor humedad. Tras el ensayo se han tomado muestras de arena para el cálculo de la humedad, obteniendo un máximo de $w=12,7\%$ bajo el electrodo nº8 a 5 cm de profundidad, y un mínimo de $w=4,6\%$ bajo el electrodo nº12 a 18 cm de profundidad.

También se piensa que esa zona de anomalía negativa presente entre los electrodos nº5 a nº9 tiene diferencias con otras zonas del estrato de arena no sólo en su humedad, sino también en su densidad, ya que para cerrar el hueco cilíndrico que se había excavado se procedió uniformizar esa franja de terreno mediante su reexcavación, relleno de arena y compactación mediante maza de 6 kg. Es posible que esa zona tuviera un porcentaje de poros con aire menor que otras, además de mayor humedad, lo que implica una menor resistividad eléctrica.

Como se pudo ver en el apartado 5.2.3 del subcapítulo de mediciones de resistividad sobre muestras de laboratorio, la influencia de la compactación de las arenas en la resistividad es notable, habiendo concluido que a mayor compactación menor resistividad para arenas con idéntica humedad.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta variaciones de humedad y densidad dentro de un estrato de arena. El perfil presenta suaves anomalías relacionadas con dichas características.

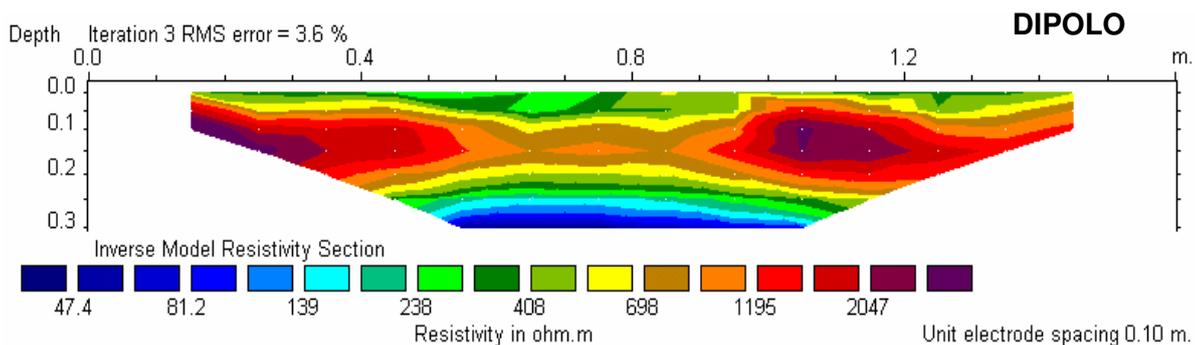


5.3.12.5.2 CALIBRACIÓN ARENA SIN HUECOS -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas de valores altos de resistividad (> de 2.000 ohm.m) y con forma ovalada. Es un perfil de aspecto idéntico al del ensayo anterior (punto 5.3.12.5.1), con un nivel resistivo correspondiente al estrato de arena que contiene variaciones en su resistividad interna.

Se aprecia un nivel muy superficial de baja resistividad (< de 400 ohm.m) a lo largo de toda la superficie del perfil, coloreado en tonos verdes. Esta mayor conductividad de la superficie del estrato de arena es debida a que hubo que agregar agua junto a la base de esos electrodos para mejorar su contacto eléctrico, ya que la escasa humedad de la arena lo hacía ser demasiado resistivo como para poder realizar la medición.

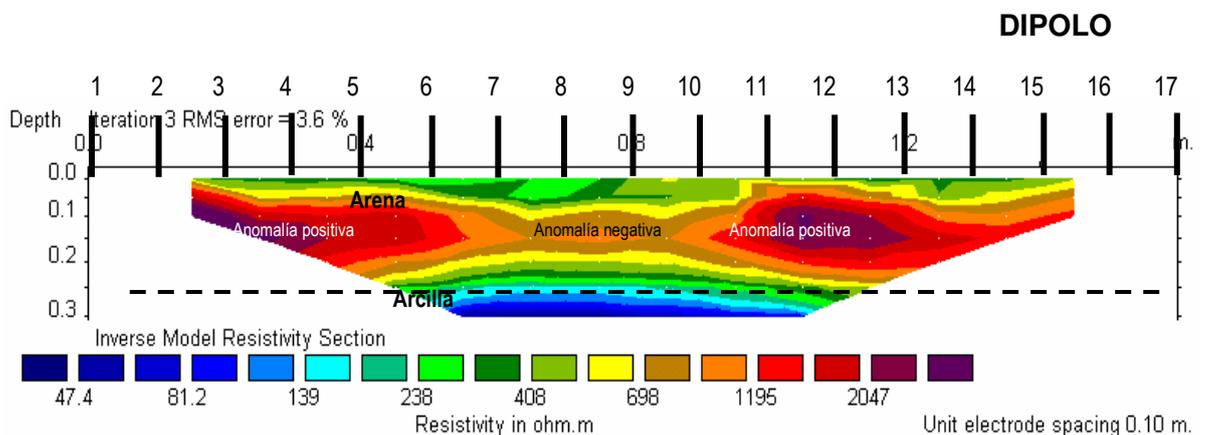


En el perfil aparecen dos anomalías positivas ($>$ de 2.000 ohm.m) situadas bajo los electrodos nº3 la primera y nº12 para la segunda. También podría decirse que ocurre lo contrario, es decir, que únicamente aparece una anomalía negativa (700 ohm.m) por adelgazamiento de ese nivel resistivo bajo el electrodo nº8-9. Estas anomalías se piensa que están relacionadas con la variación de humedad dentro del estrato, correspondiendo las anomalías positivas a las zonas menos húmedas y la anomalía negativa a la zona de mayor humedad. Como ya se ha comentado en el punto anterior se tomaron muestras para cálculo de humedad que corroboró ese supuesto.

Al igual que en el punto 5.3.12.5.1 correspondiente a este mismo ensayo con dispositivo Wenner, aquí se relaciona esa zona de anomalía negativa presente entre los electrodos nº5 a nº9 con variaciones en la densidad del estrato de arena, ya que para cerrar el hueco cilíndrico que se había excavado se uniformizó esa franja de terreno mediante reexcavación, relleno de arena y compactación con maza. Es posible que esa zona tuviera mayor densidad que otras, además de mayor humedad, lo que implica una menor resistividad eléctrica al tener las partículas más superficie de contacto para una mejor conductividad iónica.

Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo detecta variaciones de humedad y densidad dentro de un estrato de arena. El perfil presenta suaves anomalías relacionadas con dichas características.



5.3.13 EXPERIENCIA 11: DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES -a distancia 4 cm-

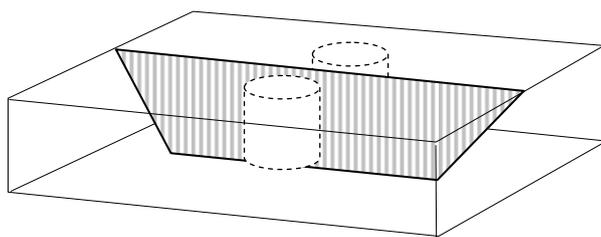
Se describen a continuación dos ensayos realizados en la experiencia 11 con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como se detalla:

5.3.13.1 DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES -Dispositivo Wenner-

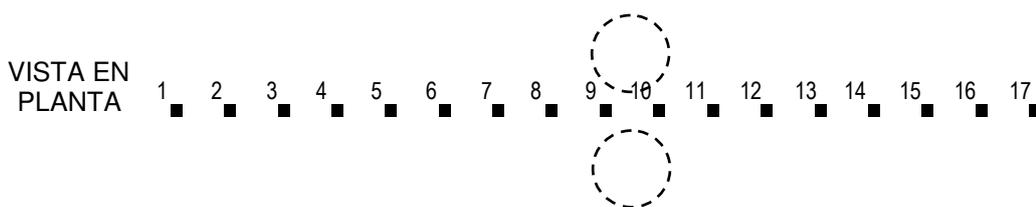
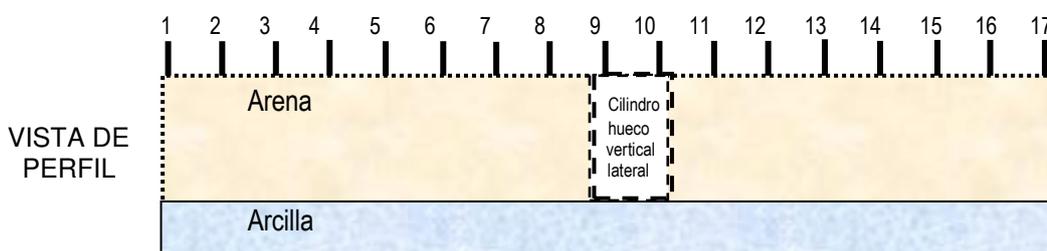
5.3.13.2 DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Modelo

Vistos los resultados negativos de la experiencia 10 (apartado 5.3.12) se pretende con esta experiencia comprobar definitivamente la influencia de los huecos situados en los laterales del perfil. En este modelo se simula la presencia de dos pozos próximos entre sí rellenos de aire, entre los cuales se realiza un perfil de tomografía. Para llevarlo a cabo se han excavado dos cilindros verticales de 15 cm de diámetro separados 8 cm. El perfil se realizará entre ambos huecos, en su punto medio, quedando cada hueco a una distancia de 4 cm del perfil.



En esta ocasión, la mayor parte del terreno afectado por el bulbo de corriente eléctrica inyectada está afectada por estos dos grandes huecos, lo que necesariamente tiene que repercutir en el aumento de su resistividad eléctrica.

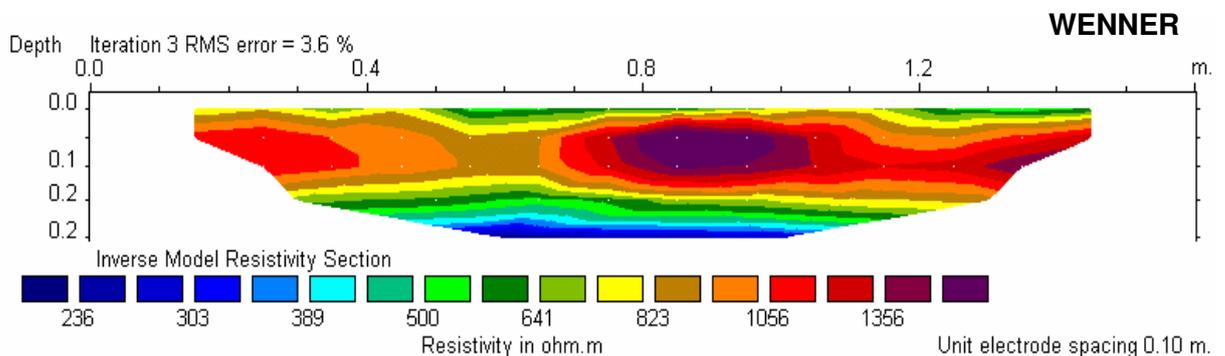


5.3.13.1 DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.300 ohm.m). La anomalía tiene forma ovalada con su eje mayor en posición horizontal. Las características de este perfil son idénticas a las del obtenido en la experiencia 2 con un bloque de cerámica relleno de aire (subapartado 5.3.4.1).

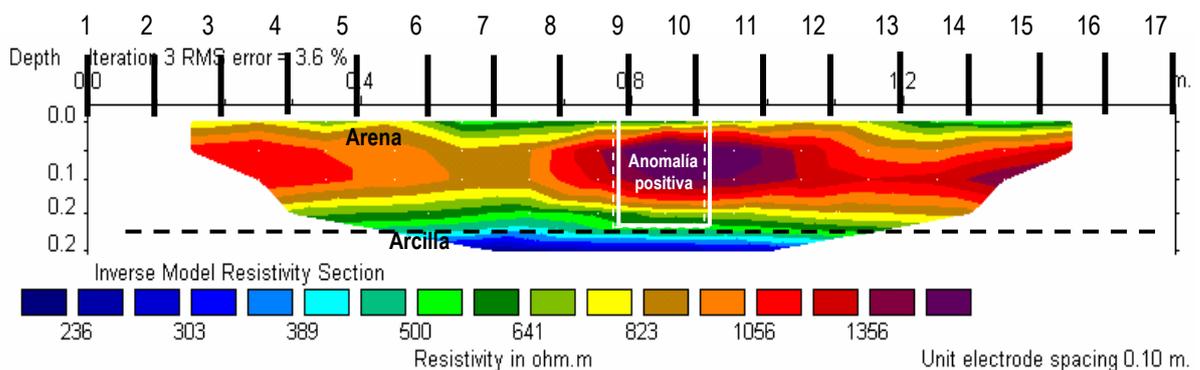
La dimensión horizontal de la anomalía es aparece ligeramente exagerada con respecto a la realidad, ya que los cilindros tienen 15 cm de diámetro y la anomalía supera los 20 cm. La dimensión vertical de la anomalía afecta aproximadamente a 2/3 del espesor del estrato de arena.



La posición horizontal de la anomalía coincide con la posición real de los huecos, situados entre los electrodos nº9 y nº10. El centro de la anomalía aparece desplazado 5 cm hacia la derecha.

Conclusiones

1.- La presencia de huecos laterales sobre la traza de un perfil de tomografía eléctrica influye sobre las imágenes de resistividad obtenidas con dispositivo Wenner. El dispositivo Wenner detecta la presencia de huecos cilíndricos verticales de 15 cm de diámetro y situados a ambos lados del perfil, a equidistancia de 4 cm.



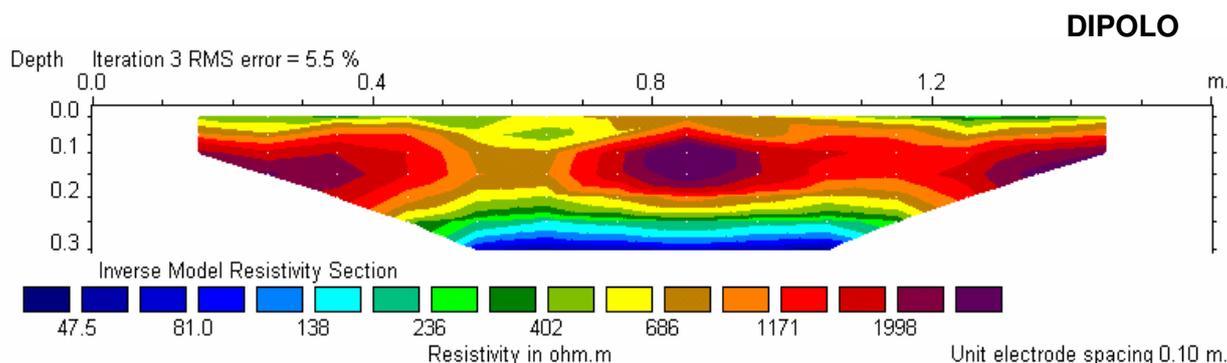
2.- El tamaño del hueco no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena.

3.- La posible explicación se debe a que al existir tramos dieléctricos a ambos lados, se combinan aumentando la resistividad en el perfil en ese punto intermedio. Cuando el hueco es único y en posición lateral, la corriente eléctrica puede pasar por “el otro lado” del perfil no notándose, consecuentemente, ese aumento de la resistividad.

5.3.13.2 DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía de valores altos de resistividad (> de 1.990 ohm.m) bajo los electrodos nº9 y nº10 del perfil. La anomalía presenta forma elíptica y su eje horizontal tiene una longitud similar al diámetro de los cilindros huecos laterales (15 cm) La dimensión vertical de la anomalía no se ajusta bien al valor real, si bien parece que afectara a todo el estrato de arena.

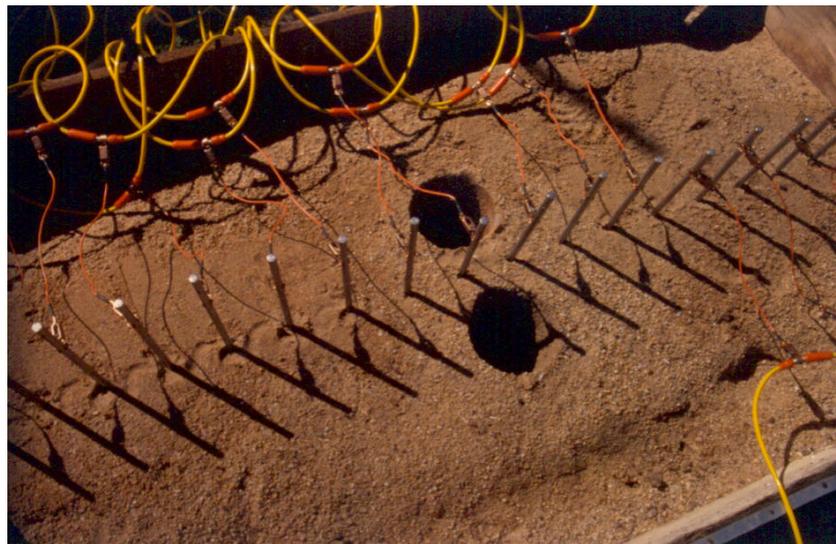
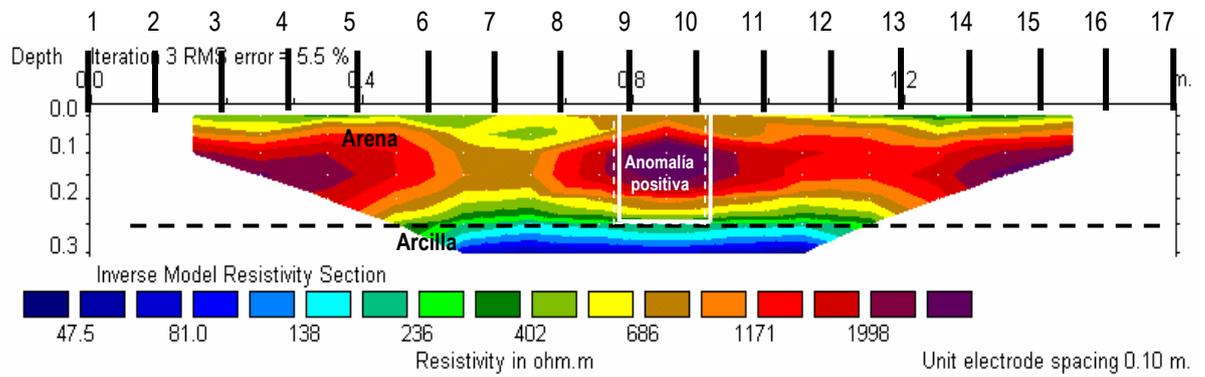


En este caso y a diferencia de lo que ocurre con el dispositivo Wenner (donde el centro de la anomalía se desplaza ligeramente a la derecha), la anomalía de resistividad representada en el perfil se ajusta con total perfección bien a la posición real de los huecos. En el perfil se ha superpuesto la posición real de los cilindros huecos verticales, situados a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y se puede comprobar como la anomalía está perfectamente dibujada entre dichos electrodos.

Conclusiones

1.- La presencia de huecos laterales sobre la traza de un perfil de tomografía eléctrica influye sobre las imágenes de resistividad obtenidas con dispositivo Dipolo-dipolo. El dispositivo Dipolo-dipolo detecta bien la presencia de huecos cilíndricos verticales de 15 cm de diámetro y situados a ambos lados del perfil, a equidistancia de 4 cm.

2.- La anomalía presente en el perfil determina muy bien la posición de los huecos en el eje horizontal pero su tamaño no puede deducirse, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena.



5.3.14 EXPERIENCIA 12: TUBO METÁLICO VERTICAL

Se describen a continuación cuatro ensayos realizados en la experiencia 12 con los dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo como se detalla:

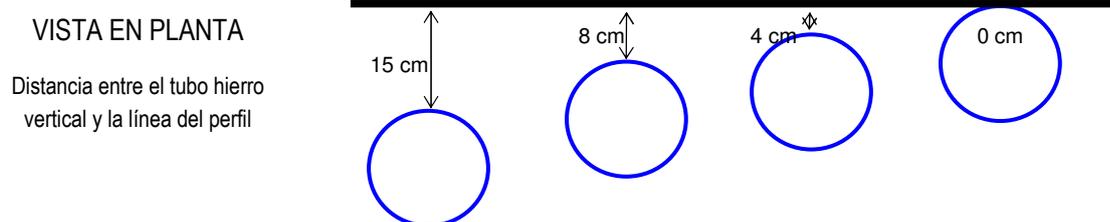
- 5.3.14.1. Tubo metálico vertical a distancia 15 cm
- 5.3.14.2. Tubo metálico vertical a distancia 8 cm
- 5.3.14.3. Tubo metálico vertical a distancia 4 cm
- 5.3.14.4. Tubo metálico vertical a distancia 0 cm

Modelo

Al igual que en la experiencia 10 del apartado 5.3.12, esta experiencia pretende analizar la influencia que tienen los huecos situados a un lateral del perfil, pero en este caso se tratará de un hueco de comportamiento conductor.

Se ha diseñado un supuesto caso en el que se realiza un perfil de tomografía en las inmediaciones de un pozo vertical relleno de agua y que no produce filtraciones hacia el terreno. Para ello se ha colocado un tubo de hierro vertical en el estrato de arena, junto al que se van a realizar cuatro perfiles distanciados 15 cm, 8 cm, 4 cm y 0 cm respectivamente. El tubo de hierro tiene un diámetro de 15 cm y es el objeto que se utilizó como molde para tallar la forma de cilindro en el estrato de arena en la experiencia 10.

En la figura adjunta se esquematiza la ejecución de la experiencia. La línea continua representa la dirección del perfil y el círculo de raya discontinua representa una vista en planta del hueco cilíndrico con la secuencia de 4 ensayos programados.



Teóricamente cuanto menor sea la distancia entre el perfil y el tubo de hierro, mayor será su reflejo en forma de anomalía negativa sobre el perfil de resistividad. Para el ensayo 12 -d- realizado a distancia 0 cm la anomalía será máxima. Este experimento simula la existencia de un pozo vertical relleno de agua en zonas cercanas a un perfil de tomografía eléctrica, y en concreto un pozo en acuífero confinado sobre rocas impermeables. No puede tratarse de un pozo en acuífero libre porque en tal caso el tramo del pozo que estuviera relleno de agua tendría el mismo comportamiento eléctrico que todo el terreno saturado en agua hasta la superficie freática.

Mediciones

La experiencia 10 consta de cuatro ensayos, completando un total de ocho perfiles, cuatro mediante dispositivo Wenner y cuatro mediante dispositivo Dipolo-dipolo. Cada perfil Wenner contiene 40 medidas repartidas en 5 niveles que alcanzan una profundidad máxima de investigación de 27 cm. Los perfiles Dipolo-dipolo realizan 90 medidas en 9 niveles que alcanzan una profundidad de investigación de 30 cm.

El primer ensayo, denominado 12 -a-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el tubo de hierro vertical a una distancia de 15 cm.

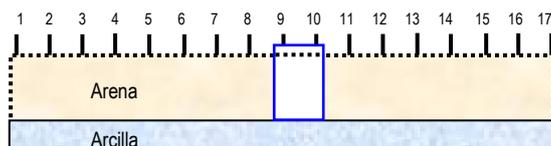
El segundo ensayo, denominado 12 -b-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el tubo de hierro vertical a una distancia de 8 cm.

El tercer ensayo, denominado 12 -c-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el tubo de hierro vertical a una distancia de 4 cm.

El último ensayo, denominado 12 -d-, sirve para obtener los perfiles de tomografía con el tubo de hierro vertical a una distancia de 0 cm.

SECUENCIA DE ENSAYOS EN LA EXPERIENCIA 12: TUBO DE HIERRO VERTICAL

En todos los casos el tubo de hierro vertical tiene por altura todo el espesor de la capa de arena (25 cm) y está hincado 3 cm en el estrato de arcilla.



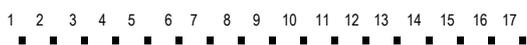
PERFIL TRANSVERSAL DEL MODELO



VISTAS EN PLANTA

Ensayo 12 -a-

Tubo de hierro vertical a 15 cm



Ensayo 12 -b-

Tubo de hierro vertical a 8 cm



Ensayo 12 -c-

Tubo de hierro vertical a 4 cm

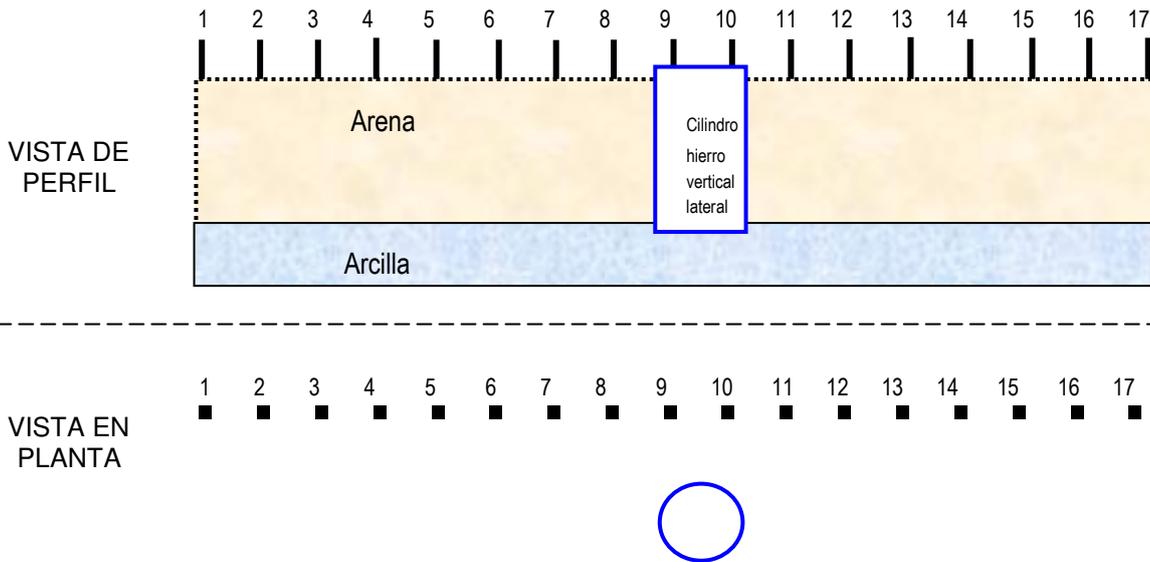


Ensayo 12 -d-

Tubo de hierro vertical a 0 cm

5.3.14.1 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 15 cm-

Se describe aquí el ensayo 12-a- de la experiencia 12: Tubo de hierro vertical a distancia 15 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el tubo de hierro simula el hueco con forma de pozo vertical relleno de agua situado en un lateral a 15 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del tubo con vistas en planta y perfil del modelo experimental.

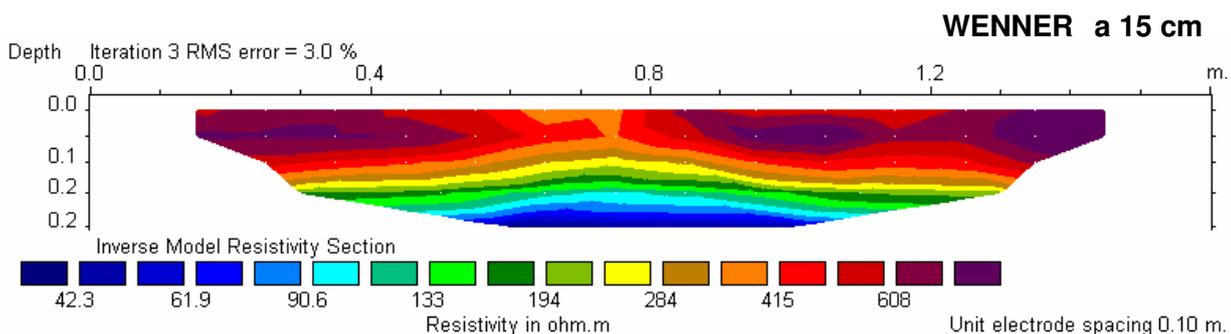


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.14.1.1 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 15 cm -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido no se observan anomalías claras. Únicamente distinguimos una bajada de la resistividad en el estrato de arena (de 600 ohm.m a 350 ohm.m) coincidiendo con una suave curvatura convexa hacia techo del contacto arena-arcilla. El máximo de esa curvatura coincide con el área de baja resistividad de la arena, situada bajo los electrodos nº8 y nº9.



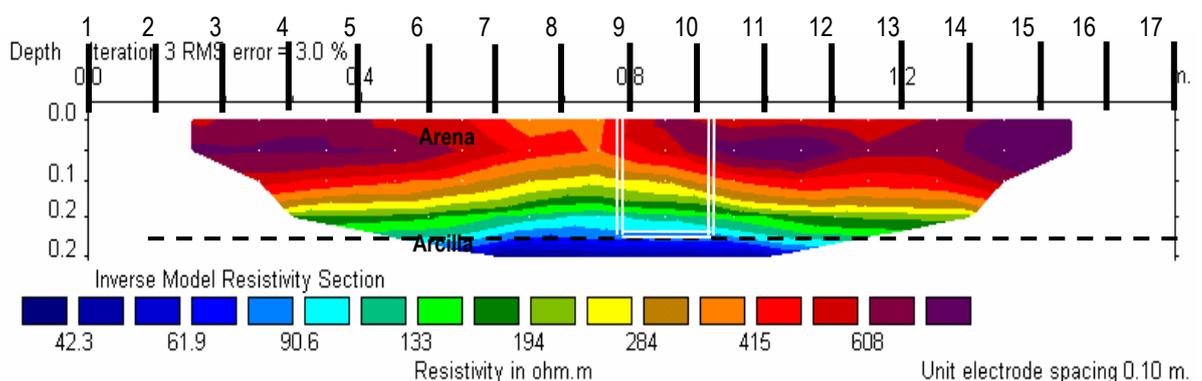
Se puede suponer, a espera de nuevas experiencias que dichas anomalías están relacionadas con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil. El tubo de hierro esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº8 y nº9. Partimos de esta idea de que el tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa que aparece desplazada en el perfil 10 cm hacia la izquierda.

Por otro lado, en el ensayo 10-e- de la experiencia 10 se demostró que la presencia de dichas variaciones de resistividad en el estrato de arena no tienen porqué estar relacionadas directamente con la presencia de objetos cercanos, sino que pueden deberse a las variaciones internas en la humedad del estrato. Esto obliga a contemplar la posibilidad de que dicha anomalía no tenga relación con la presencia del tubo de hierro vertical.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner sirve aparentemente para detectar la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 15 cm de distancia. El resultado no es definitivo porque la anomalía negativa se encuentra desplazada a 10 cm hacia la izquierda, si bien próximos experimentos desvelarán si está relacionado ese desplazamiento con la distancia tubo-perfil.

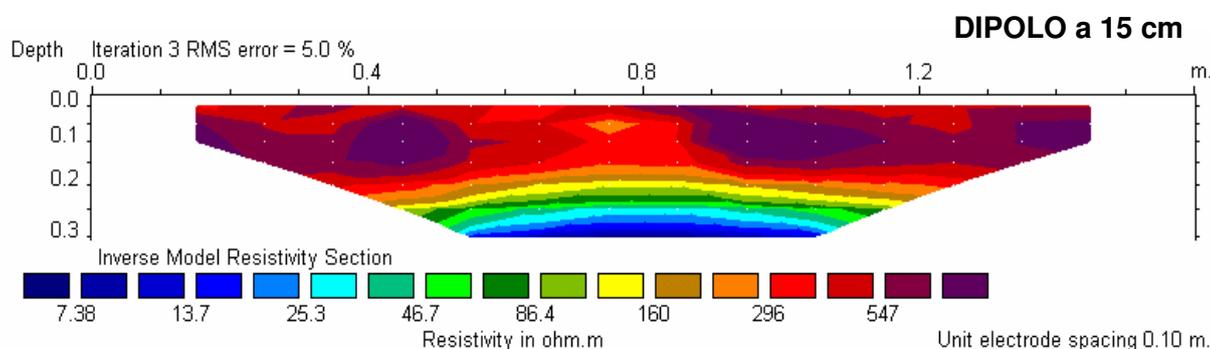
2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena y que, en cierto modo, el abombamiento convexo hacia arriba del límite arena-arcilla indica solapamiento entre la respuesta eléctrica del tubo de hierro y el estrato de arcilla.



5.3.14.1.2 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 15 cm -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas muy claras de valores medios de resistividad (> de 540 ohm.m) a distancia 0,45 m y 1,0 m respectivamente y una anomalía negativa (290 ohm.m) a distancia 0,75 m. Se puede suponer, a espera de nuevas experiencias que la anomalía negativa está relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, sufriendo ésta el mismo desplazamiento hacia la izquierda que se ha observado en el punto 5.3.14.1.1 realizado con dispositivo Wenner.



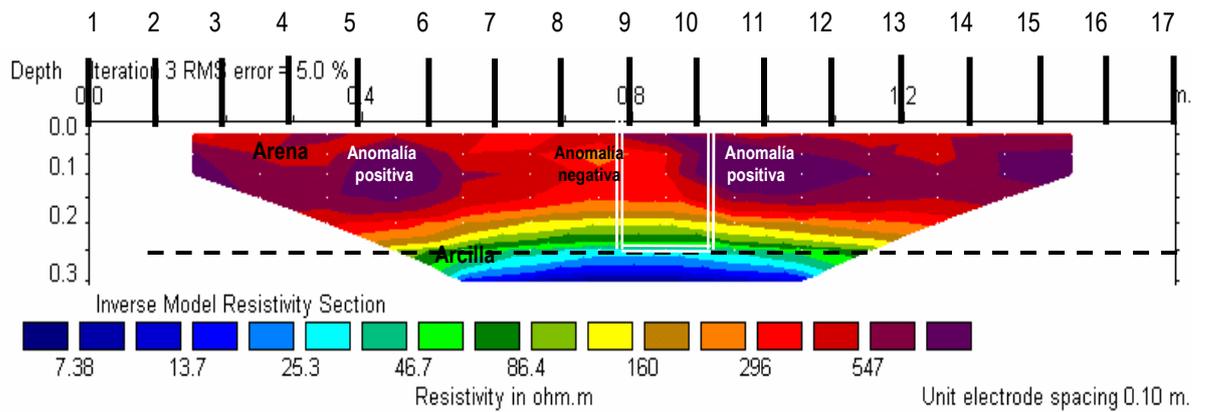
El tubo de hierro esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº8 y nº9. El tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa que aparece desplazada en el perfil 10 cm hacia la izquierda.

Por otro lado, en el ensayo 10-e- de la experiencia 10 se demostró que la presencia de dichas variaciones de resistividad en el estrato de arena no tienen porqué estar relacionadas directamente con la presencia de objetos cercanos, sino que pueden deberse a las variaciones internas en la humedad del estrato. Esto obliga a contemplar la posibilidad de que dicha anomalía no tenga relación con la presencia del tubo de hierro vertical.

Conclusiones

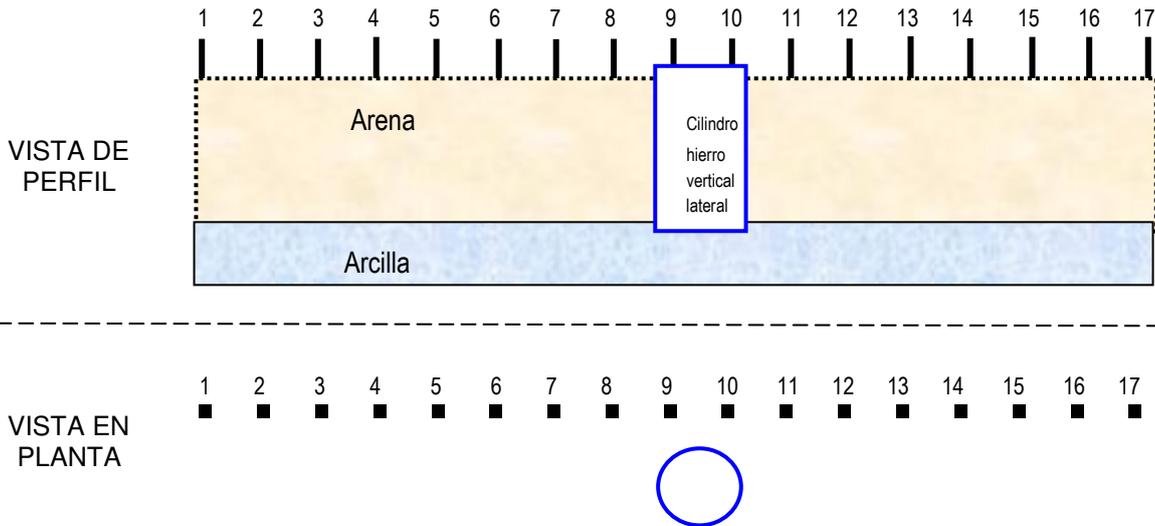
1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 15 cm de distancia. El resultado no es definitivo porque la anomalía negativa se encuentra desplazada a 10 cm hacia la izquierda, si bien próximos experimentos desvelarán si está relacionado ese desplazamiento con la distancia tubo-perfil.

2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena y que, en cierto modo, la anomalía negativa tiene una anchura proporcional al diámetro real del tubo.



5.3.14.2 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 8 cm

Se describe aquí el ensayo 12-b- de la experiencia 12: Tubo de hierro vertical a distancia 8 cm del perfil. Como se ha comentado antes, en esta prueba el tubo de hierro simula el hueco con forma de pozo vertical relleno de agua situado en un lateral a 8 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del tubo con vistas en planta y perfil del modelo experimental.

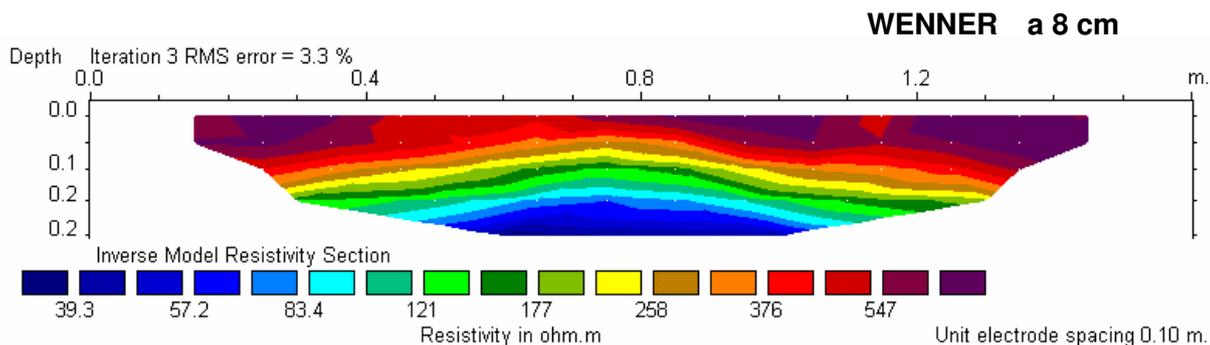


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.14.2.1 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 8 cm -Dispositivo Wenner-

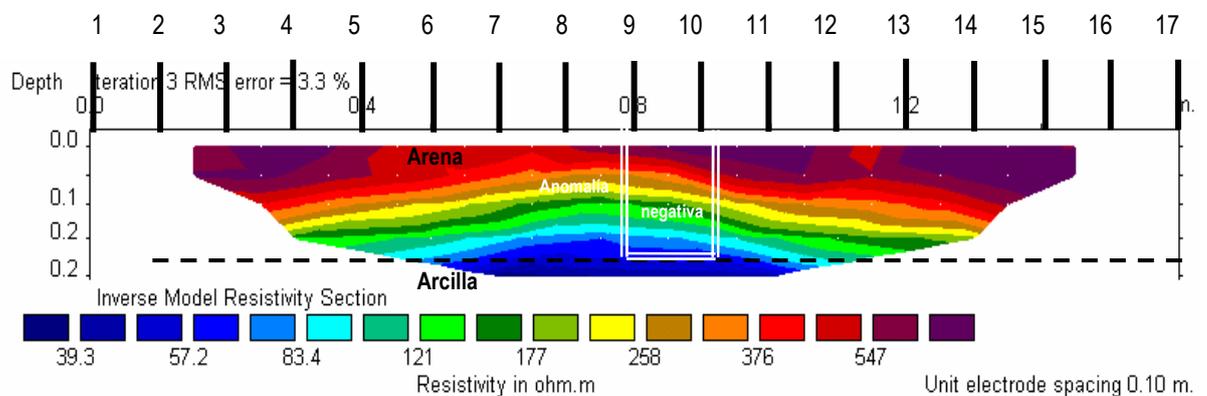
Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía clara. El contacto arena-arcilla sufre un abombamiento convexo hacia arriba que recuerda mucho al ensayo 3 -c- de la experiencia 3: Bovedilla vertical relleno agua -tras 24 horas- (apartado 5.3.5) A distancia 0,75 m y casi coincidiendo con la posición del tubo de hierro se presenta el máximo de dicha curvatura.



También es fácilmente perceptible el adelgazamiento de la capa resistiva de arena a favor de un engrosamiento de la capa conductora de arcilla. Esta imagen recuerda los casos ya vistos de solapamiento de resistividad entre el estrato de arcilla conductor y un cuerpo enterrado también conductor.

Se puede suponer, a espera de nuevas experiencias que dicha anomalía está relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil. El tubo de hierro esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº8 y nº9. Partimos de esta idea de que el tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa que aparece desplazada en el perfil 10 cm hacia la izquierda.



Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner sirve aparentemente para detectar la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 15 cm de distancia. El resultado no es definitivo porque la anomalía negativa se encuentra desplazada a 10 cm hacia la izquierda, si bien próximos experimentos desvelarán si está relacionado ese desplazamiento con la distancia tubo-perfil.



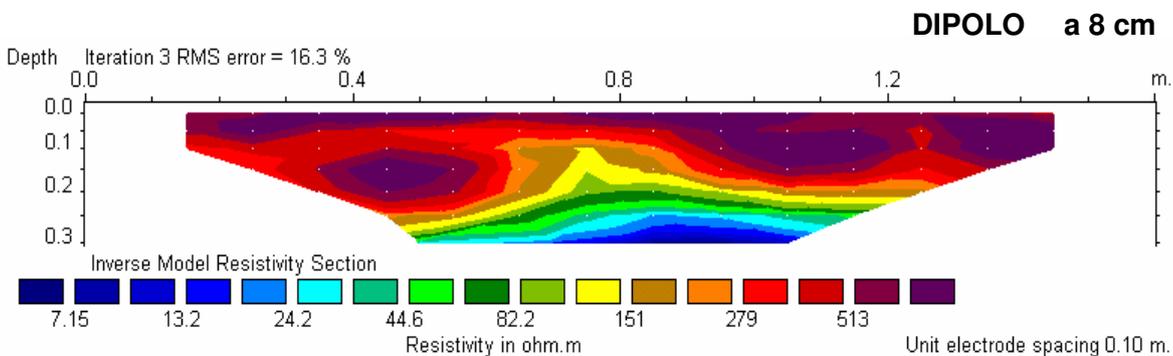
2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena y

que, en cierto modo, el abombamiento convexo hacia arriba del límite arena-arcilla indica solapamiento entre la respuesta eléctrica del tubo de hierro y el estrato de arcilla.

5.3.14.2.2 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 8 cm- -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

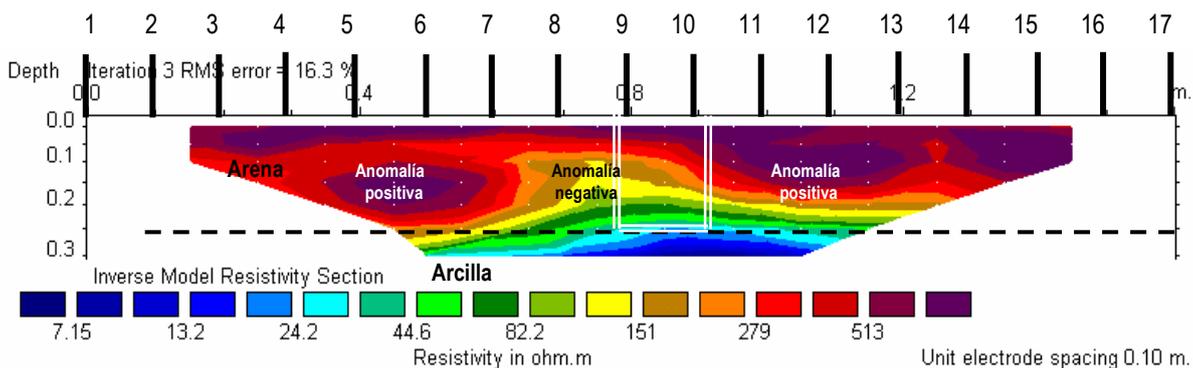
En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas muy claras de valores medios de resistividad (> de 510 ohm.m) a distancia 0,45 m y 1,05 m respectivamente y una anomalía negativa (150 ohm.m) a distancia 0,75 m. La anomalía negativa está relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, sufriendo ésta un desplazamiento hacia la izquierda similar al observado en ensayos anteriores.



El tubo de hierro esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía negativa figura en el perfil bajo los electrodos nº8 y nº9. El tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa que aparece desplazada en el perfil 10 cm hacia la izquierda.

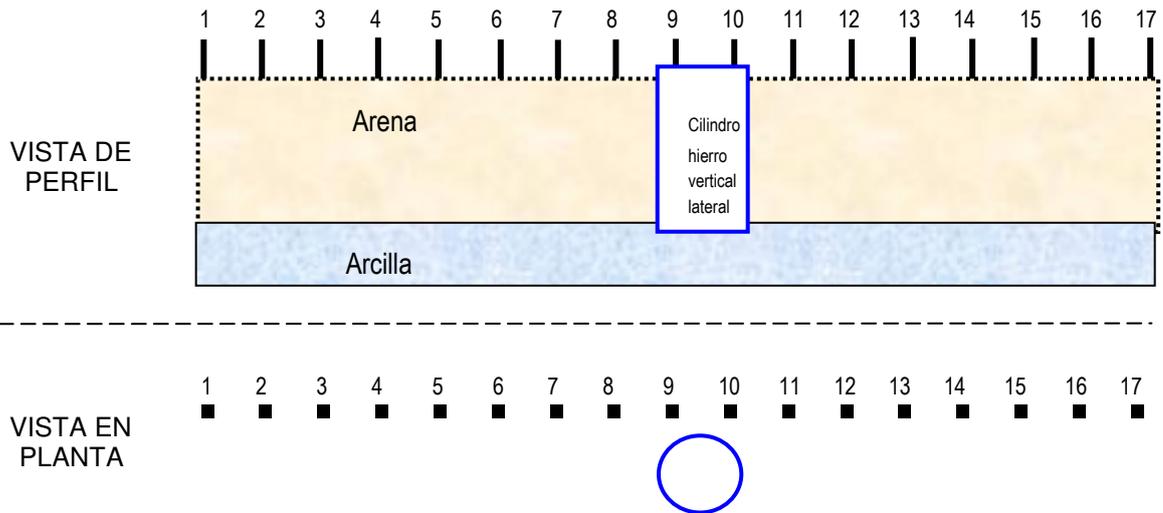
Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 8 cm de distancia. La anomalía negativa se encuentra desplazada a 10 cm hacia la izquierda. El tamaño del tubo puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil ya que tiene un diámetro de valor similar al ancho de la anomalía.



5.3.14.3 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 4 cm

Se describe aquí el ensayo 12-c- de la experiencia 12: Tubo de hierro vertical a distancia 4 cm del perfil. En esta prueba el tubo de hierro simula el hueco con forma de pozo vertical relleno de agua situado en un lateral a 4 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del tubo con vistas en planta y perfil del modelo experimental.

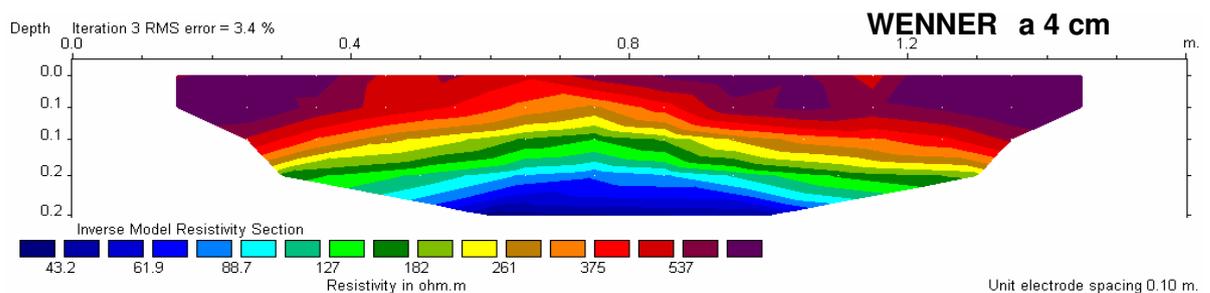


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.14.3.1 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 4 cm -Dispositivo Wenner-

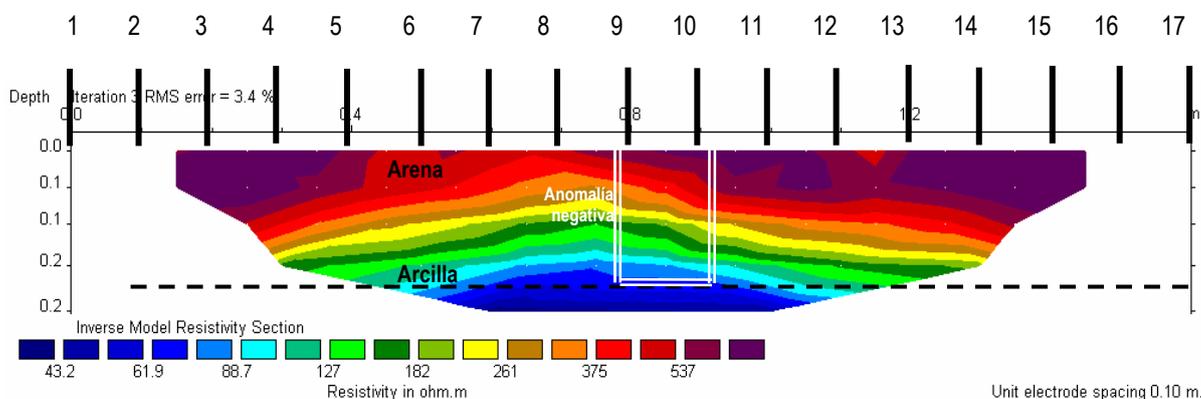
Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía clara. El contacto arena-arcilla sufre un abombamiento convexo algo más pronunciado al del ensayo anterior. A distancia 0,75 m y casi coincidiendo con la posición del tubo de hierro se presenta el máximo de dicha curvatura.



También es fácilmente perceptible el adelgazamiento de la capa resistiva de arena a favor de un engrosamiento de la capa conductora de arcilla. Esta imagen recuerda los casos ya vistos de solapamiento de resistividad entre el estrato de arcilla conductor y un cuerpo enterrado también conductor (subapartado 5.3.7.1, experiencia 5: Tubo metálico 15 cm de diámetro -Dispositivo Wenner-).

Dicha anomalía está claramente relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, ya que conforme se va acercando el perfil a la posición del tubo el abombamiento del contacto arena-arcilla es creciente. El tubo de hierro está situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº8 y nº9. Ahora ya es evidente que el tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa que aparece desplazada en el perfil 10 cm hacia la izquierda.



Conclusiones

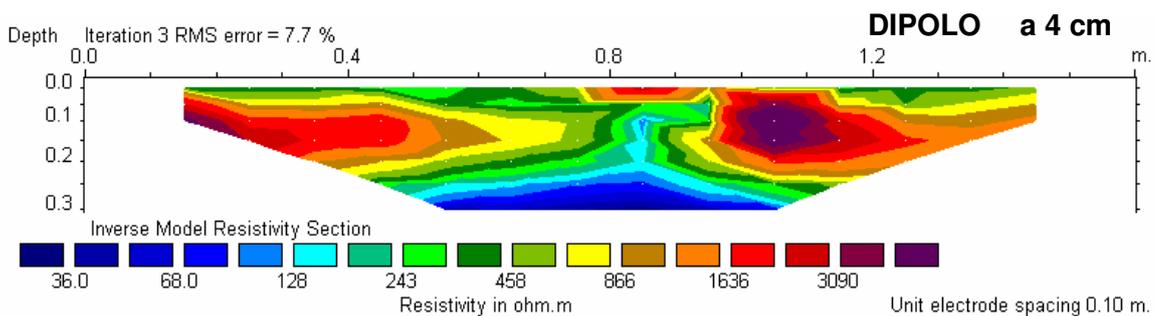
1.- El dispositivo Wenner detecta la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 4 cm de distancia. La anomalía negativa que aparece en forma de abombamiento convexo hacia arriba del contacto arena-arcilla es claramente originada por el tubo metálico, si bien aparece desplazada 10 cm hacia la izquierda de la posición real del tubo.

2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena y que, en cierto modo, el abombamiento convexo hacia arriba del límite arena-arcilla indica solapamiento entre la respuesta eléctrica del tubo de hierro y el estrato de arcilla.

5.3.14.3.2 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 4 cm -Dispositivo Dipolo-dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observan dos anomalías positivas muy claras de valores altos de resistividad ($>$ de 1.600 ohm.m) a distancia 0,30 m y 1,05 m respectivamente y una anomalía negativa (120 ohm.m) a distancia 0,85 m. La anomalía negativa está relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, quedando en este caso perfectamente localizada en su posición real.

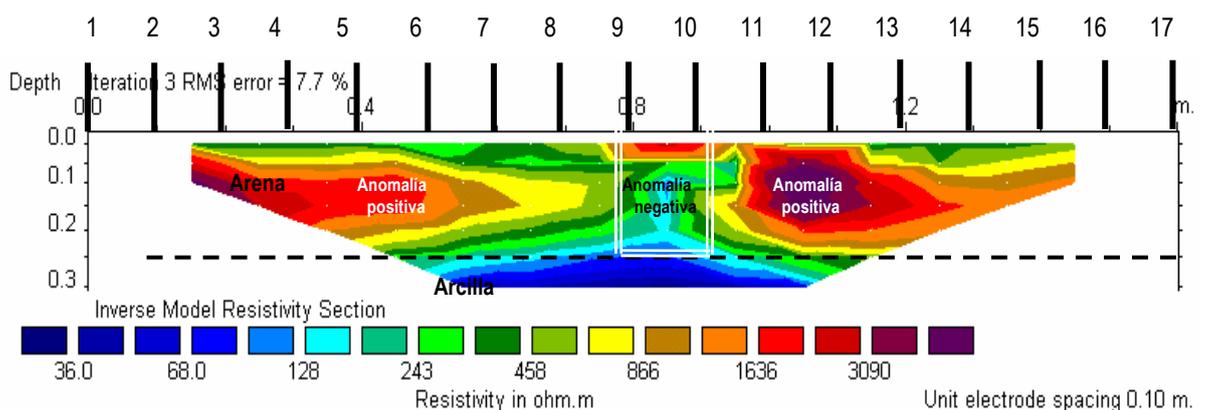


El tubo de hierro está situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía negativa figura en el perfil también bajo los electrodos nº9 y nº10. A diferencia del perfil obtenido con dispositivo Wenner, se comprueba en este ensayo que el dispositivo dipolo-dipolo detecta mucho mejor la presencia de objetos conductores situados en un lateral del perfil. Además, se observa como la anomalía negativa se va cerrando progresivamente hasta formar un recinto, como en este caso, ya cerrado. En el dispositivo Wenner el solape entre la respuesta eléctrica del tubo y el estrato de arcilla hace que se presente una imagen más confusa y difícil de interpretar.

Conclusiones

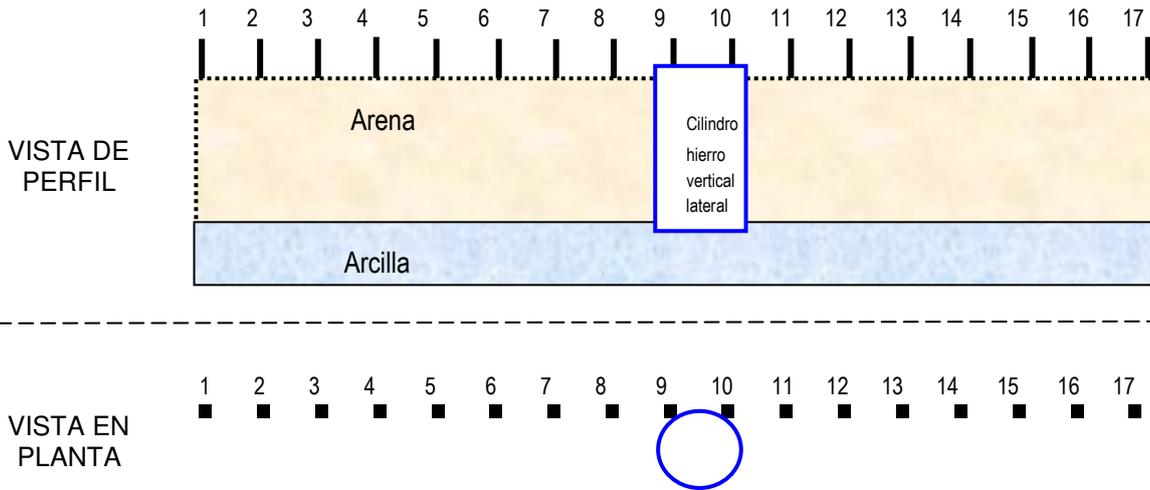
1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta muy bien la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 4 cm de distancia. La anomalía negativa se encuentra perfectamente centrada en la posición real del tubo metálico.

2.- El tamaño del tubo puede deducirse con apreciable exactitud debido a que la anomalía tiene una forma de área cerrada proporcional al diámetro del tubo metálico.



5.3.14.4 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 0 cm

Se describe aquí el ensayo 12-d- de la experiencia 12: Tubo de hierro vertical a distancia 0 cm del perfil. En esta prueba el tubo de hierro simula el hueco con forma de pozo vertical relleno de agua situado en un lateral a 0 cm del perfil de tomografía. En el dibujo adjunto se ha esquematizado la posición exacta del tubo con vistas en planta y perfil del modelo experimental.

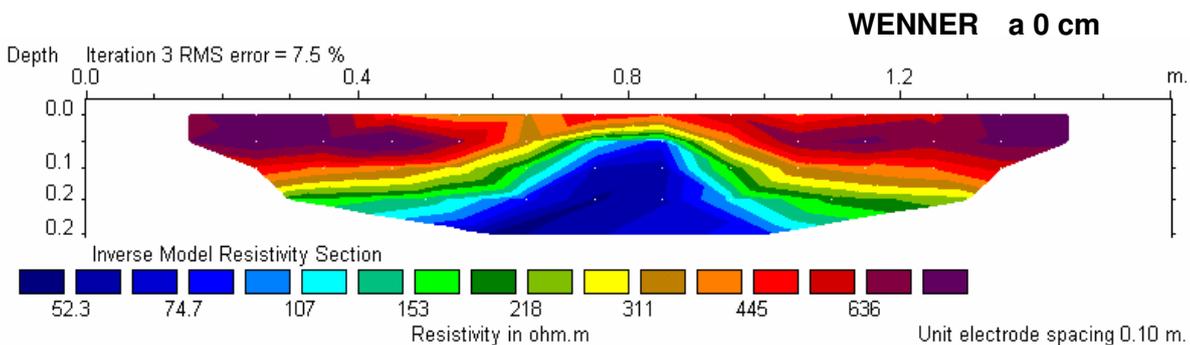


Se realizarán dos perfiles, uno con dispositivo Wenner y otro con dispositivo Dipolo-dipolo.

5.3.14.4.1 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 0 cm -Dispositivo Wenner-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía negativa muy clara. El contacto arena-arcilla sufre un abombamiento convexo muy pronunciado a distancia 0,85 m, coincidiendo exactamente con la posición del tubo de hierro en el modelo empírico.





El máximo de esa curvatura está situado entre los electrodos nº9 y nº10, donde también es apreciable un máximo adelgazamiento de la capa resistiva de arena. Esta imagen recuerda los casos ya vistos de solapamiento de resistividad entre el estrato de arcilla conductor y un cuerpo enterrado también conductor (subapartado 5.3.7.1, experiencia 5: Tubo metálico 15 cm de diámetro -Dispositivo Wenner-).

Se completa así la secuencia de perfiles de la experiencia 12, con un progresivo acercamiento del perfil al tubo de hierro vertical que tiene su clara manifestación en forma de anomalía negativa con forma de "joroba".

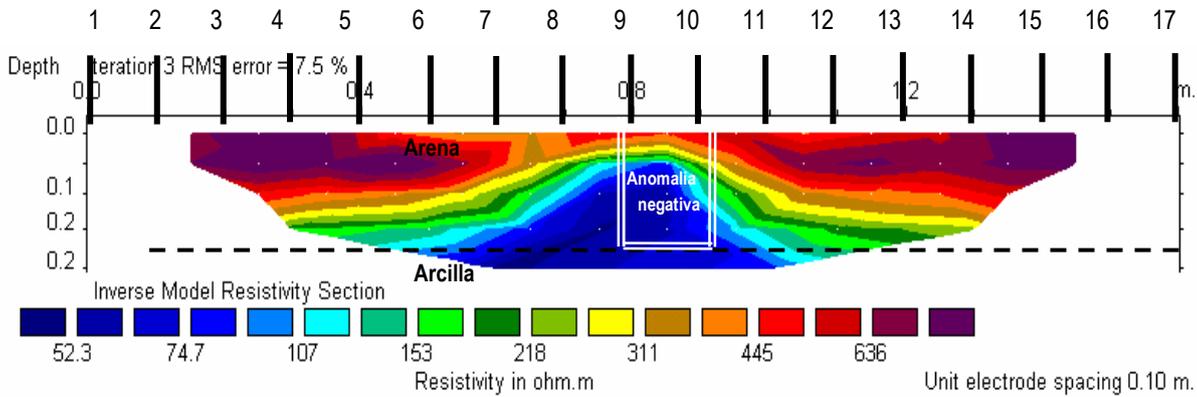
Dicha anomalía está claramente relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, ya que conforme se va acercando el perfil a la posición del tubo el abombamiento del contacto arena-arcilla es creciente. El tubo de hierro está situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº9 y nº10. Ahora ya es evidente que el tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa y en este caso no desplaza la anomalía hacia la izquierda de su posición real.

Conclusiones

1.- El dispositivo Wenner detecta la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 0 cm de distancia. La anomalía negativa que aparece tiene forma de "joroba" o abombamiento (convexo hacia arriba) del contacto arena-arcilla y tiene una clara relación con el tubo metálico. El máximo de la anomalía señala la posición exacta de ese tubo.

2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena. El abombamiento convexo hacia arriba del límite arena-arcilla indica solapamiento entre

la respuesta eléctrica del tubo de hierro y el estrato de arcilla, por cuanto podría deducirse el tamaño aproximado del tubo a partir del desdoblamiento de dicha imagen.

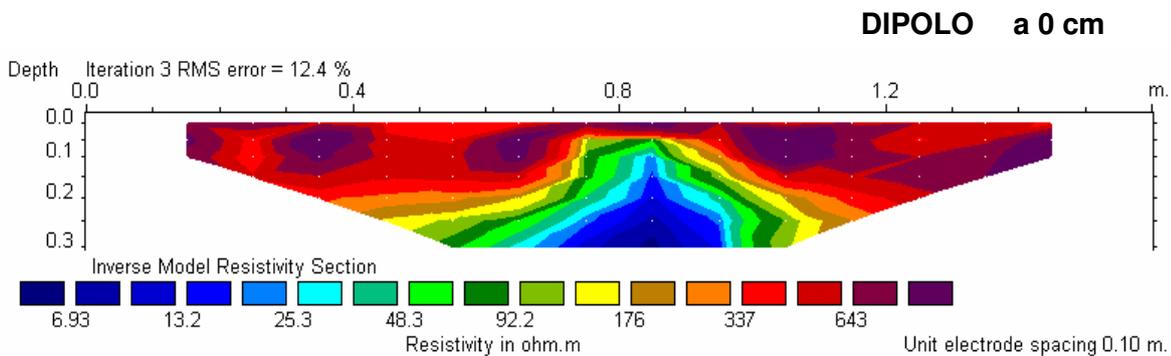


5.3.14.4.2 TUBO METÁLICO VERTICAL -a distancia 0 cm -Dispositivo Dipolo-

Resultados

En el perfil obtenido se observa una anomalía negativa muy clara. El contacto arena-arcilla sufre un abombamiento convexo muy pronunciado a distancia 0,85 m, coincidiendo exactamente con la posición del tubo de hierro en el modelo empírico.

El máximo de esa curvatura está situado entre los electrodos nº9 y nº10, donde también es apreciable un máximo adelgazamiento de la capa resistiva de arena. Esta imagen recuerda los casos ya vistos de solapamiento de resistividad entre el estrato de arcilla conductor y un cuerpo enterrado también conductor (subapartado 5.3.7.1, experiencia 5: Tubo metálico 15 cm de diámetro -Dispositivo Wenner-).



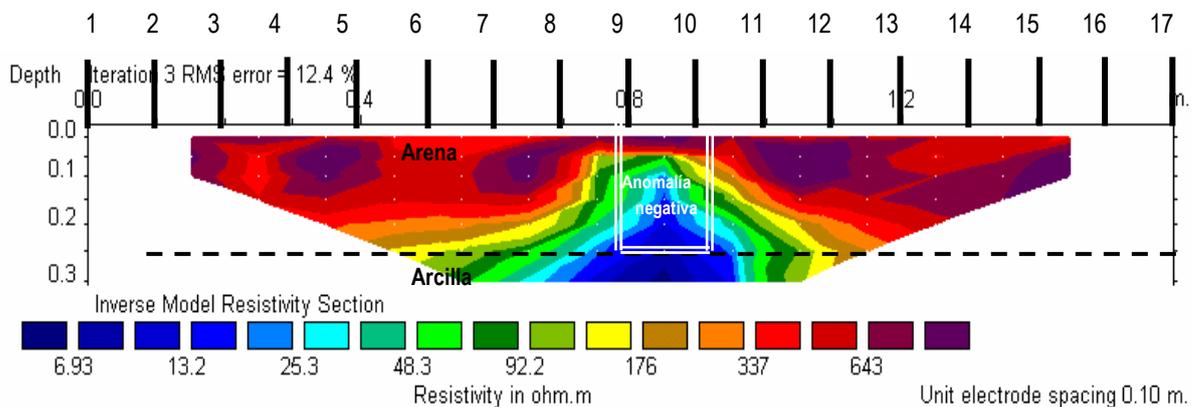
Se completa así la secuencia de perfiles de la experiencia 12, con un progresivo acercamiento del perfil al tubo de hierro vertical que tiene su clara manifestación en forma de anomalía negativa con forma de "joroba".

Dicha anomalía está claramente relacionada con la presencia del tubo de hierro en un lateral del perfil, ya que conforme se va acercando el perfil a la posición del tubo el abombamiento del contacto arena-arcilla es creciente. El tubo de hierro esta situado en un lateral a la altura de los electrodos nº9 y nº10, y la anomalía figura en el perfil bajo los electrodos nº9 y nº10. Es evidente que el tubo de hierro del lateral provoca una anomalía negativa y en este caso no desplaza la anomalía hacia la izquierda de su posición real.

Conclusiones

1.- El dispositivo Dipolo-dipolo detecta la presencia de un tubo de hierro vertical de 15 cm de diámetro y situado en un lateral a 0 cm de distancia. La anomalía negativa que aparece tiene forma de "joroba" o abombamiento (convexo hacia arriba) del contacto arena-arcilla y tiene una clara relación con el tubo metálico. El máximo de la anomalía señala la posición exacta de ese tubo.

2.- El tamaño del tubo no puede deducirse del estudio de las imágenes del perfil, si bien se puede decir que la anomalía afecta a todo el espesor del estrato de arena. El abombamiento convexo hacia arriba del límite arena-arcilla indica solapamiento entre la respuesta eléctrica del tubo de hierro y el estrato de arcilla, por cuanto podría deducirse el tamaño aproximado del tubo a partir del desdoblamiento de dicha imagen.



5.4 EXPERIMENTACIÓN EN TRABAJOS A ESCALA REAL

5.4.1 OBJETIVO DE LOS TRABAJOS

Hasta ahora se ha experimentado en condiciones controladas sobre modelos empíricos a escala reducida, pudiendo demostrar la variación en la respuesta eléctrica producida por huecos con diferente tamaño, relleno y profundidad. En este capítulo se analizará la respuesta eléctrica de huecos en trabajos a escala real con idéntico fin. Se seleccionaron diversos trabajos sobre huecos cuya situación, tamaño y relleno eran bien conocidos.

Se han realizado dos tipos de trabajos fácilmente diferenciables por el factor escala. Un primer grupo abarca trabajos realizados sobre objetivos de pequeño tamaño, tales como tuberías, conductos o ladrillos, mientras que un segundo grupo incluye trabajos sobre oquedades de tamaño grande, galerías, túneles o karst. De estos trabajos se espera obtener una corroboración definitiva de los resultados derivados del subcapítulo 5.3 en modelos reducidos, así como un criterio claro para abordar la investigación aplicada al yacimiento arqueológico de Clunia que se desarrollará en el capítulo 6.

RESULTADO DE LAS EXPERIENCIAS

Se han seleccionado diversos objetivos de forma y tamaño variables en condiciones reales de trabajo. Se presenta un listado de los mismos:

Trabajo 0: Tubo de hormigón diámetro 20 cm - relleno de aire

Trabajo 1: Tubo de hormigón diámetro 20 cm - 1/2 relleno de agua

Trabajo 2: Tubo de PVC diámetro 16 cm

Trabajo 3: Pequeño muro de ladrillo enterrado

Trabajo 4: Búsqueda de túneles y galerías mineras en Mina Gallarta (Vizcaya).

Trabajo 5: Búsqueda de posibles huecos bajo el trazado de una carretera en Comillas (Cantabria)

Trabajo 6: Localización de canalizaciones metálicas

Trabajo 7: Determinación de espesores y fracturas

Trabajo 8: Campaña de prospección para la localización de un complejo de galerías mineras a distintas profundidades: La Arboleda (Vizcaya)

5.4.2 TRABAJO 0: TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- RELLENO DE AIRE

El objetivo de este trabajo consiste en detectar desde la superficie un tubo de hormigón de 20 cm de diámetro cuyo interior está relleno únicamente por aire. El tubo es una canalización de evacuación de aguas ahora abandonada.

Se sabe que el tubo está construido en hormigón y que tiene un diámetro de 20 cm y se sabe con certeza que está enterrado a una profundidad de 20 cm (ésta es la distancia que separa la cresta del tubo de la superficie) ya que se ha excavado una zanja hasta alcanzar el tubo para tomar medidas de su posición exacta. Considerando tal profundidad y dicho diámetro de hueco se ha diseñado para su localización una prospección de 5 perfiles de tomografía en los que se probarán diversos espaciados para dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo.

El objetivo último de estos trabajos es determinar el dispositivo y espaciado óptimos que habrían de ser utilizados para obtener los mejores resultados en este caso concreto.

5.4.2.1 TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- RELLENO DE AIRE – Dispositivo Wenner

Se han diseñado 2 perfiles con dispositivo Wenner. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 15 cm ($D_{ei}=15\text{cm}$) que tomará 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. El segundo combinará 18 electrodos con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{ei}=20\text{cm}$) y una adquisición de 45 datos repartidos en 5 niveles de profundidad. Para el primer perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1,5/2 es decir, la separación interelectródica es 3/4 del diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1/1, ya que la Distancia entre electrodos es la misma que el Diámetro del hueco (20/20).

Profundidades alcanzadas

La profundidad a que se encuentra el tubo es $P=20$ cm, por lo tanto su relación con respecto al diámetro del hueco será $P = D_h (20/20)$. Ya que el objetivo a localizar se encuentra situado a una profundidad de 20 cm será suficiente un perfil de 0,5 m de profundidad. El primer perfil, con separación interelectródica 15 cm alcanzará una profundidad de 0,50 m y el segundo perfil con separación de 20 cm profundizará hasta 0,60 m de investigación.

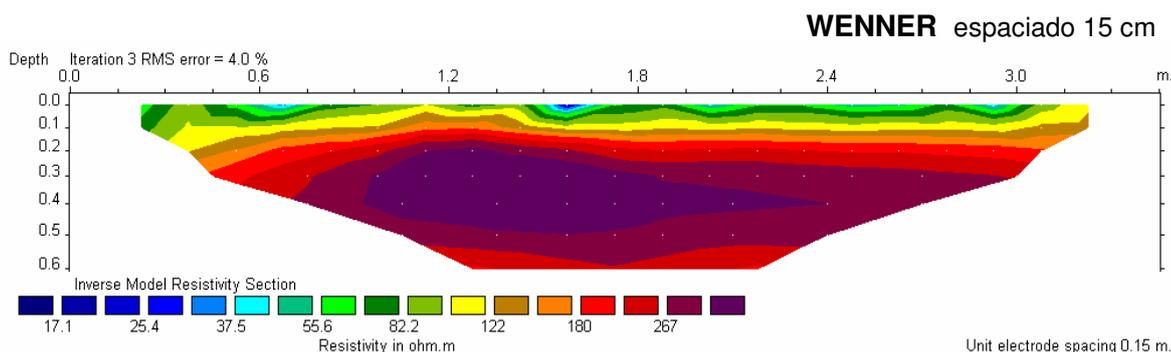
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno limo-arenoso en el que se encuentra ubicado el tubo de

hormigón. Se espera un perfil que presente dos niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel inferior seco y resistivo correspondiente al nivel de arenas-limosas.

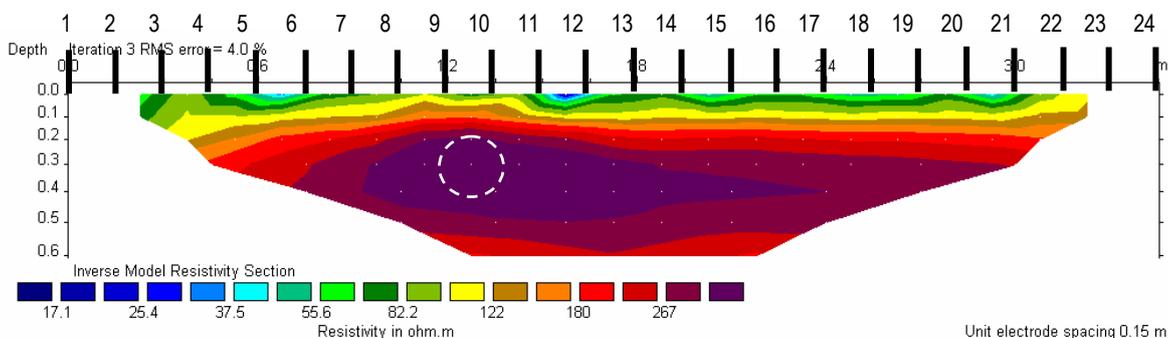
5.4.2.1.1 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 15 cm

En el perfil Wenner de espaciado 15 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (< de 80 ohm.m) que incluye los primeros 10 cm y una banda de valores altos (> de 200 ohm.m) que incluye al resto del perfil.



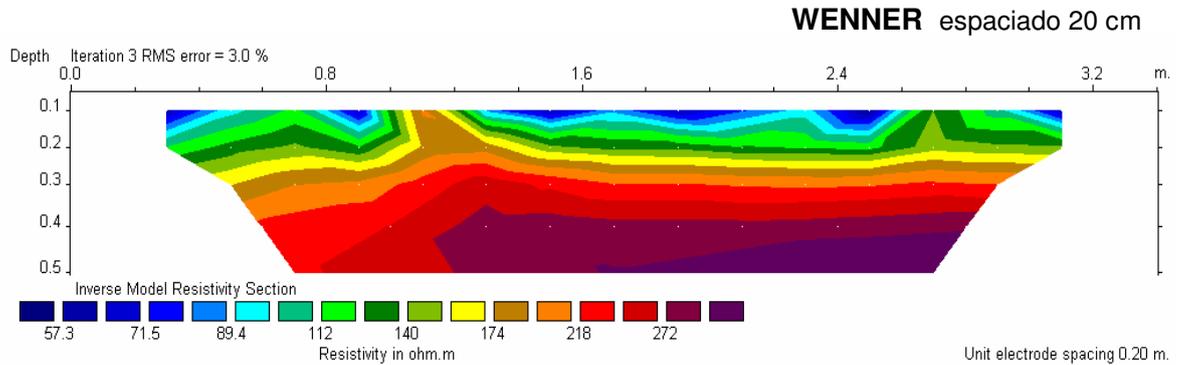
El perfil no muestra anomalías de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco. Los mayores valores de resistividad (aprox. 300 ohm.m) se concentran en el núcleo del nivel resistivo infrayacente, pero su forma es alargada y asimétrica puede ser debida a una heterogénea distribución de la humedad.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 20 cm bajo los electrodos nº9 y nº10, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo. Tan solo cabe mencionar que el nivel superficial de baja resistividad tiene su máximo adelgazamiento justo entre los electrodos nº9 y nº10. En relación con esto también es coincidente con esa posición el máximo engrosamiento del nivel resistivo de valores superiores a 260 ohm.m. Podría anotarse esta coincidencia como señal indicativa de la presencia de huecos superficiales para dispositivos Wenner.



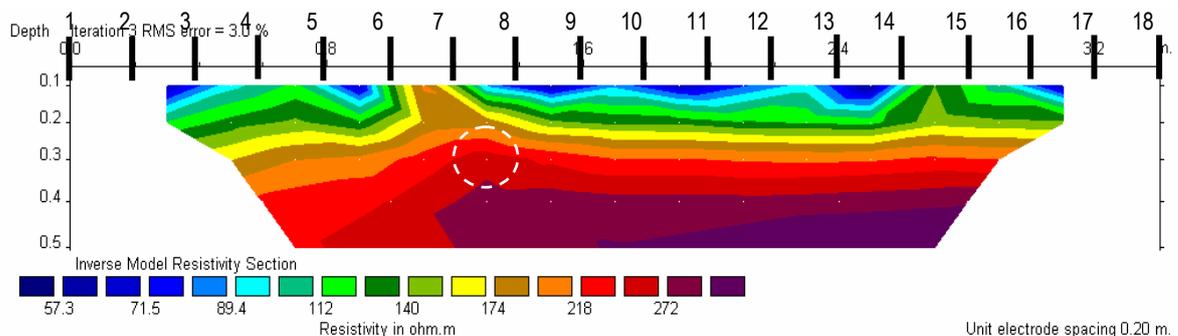
5.4.2.1.2 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 20 cm

En el perfil Wenner de espaciado 20 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (< de 80 ohm.m) que incluye los primeros 15 cm y una banda de valores altos (> de 200 ohm.m) que incluye al resto del perfil.



El perfil no muestra anomalías de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco. Los mayores valores de resistividad (aprox. 300 ohm.m) se hayan en el nivel más profundo a 0,5 m.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 20 cm bajo los electrodos nº7 y nº8, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo.



Conclusiones

El dispositivo Wenner no es capaz de detectar la presencia de un tubo hueco de diámetro 20 cm enterrado a una profundidad de 0,2 m. Utilizando un espaciado entre electrodos de 20 cm ($D_{el}/D_h = 1/1$) el resultado es nulo, pero si dicha distancia interelectrónica se reduce a 15 cm ($D_{el}/D_h = 3/4$) el resultado, sin ser bueno, si que proporciona unos indicios de la presencia del hueco. La posición del tubo coincide con el lugar de máximo espesor del nivel de mayor resistividad, que tiene forma lenticular, punto que ha de coincidir con la posición de máximo adelgazamiento del nivel superficial de baja resistividad.

5.4.2.2 TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- RELLENO DE AIRE – Dispositivo Dipolo-dipolo

Se han diseñado 3 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 15 cm ($D_{el}=15\text{cm}$) que tomará 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El segundo combinará 18 electrodos con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{el}=20\text{cm}$) y una adquisición de 99 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El tercer perfil combinará 12 electrodos separados 30 cm ($D_{el}=30\text{cm}$) y adquirirá 45 datos de resistividad.

Para el primer perfil el ratio D_{el}/D_h será 1,5/2 es decir, la separación interelectródica es 3/4 del diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{el}/D_h será 1/1, ya que la Distancia entre electrodos es la misma que el Diámetro del hueco (20/20), y el tercer perfil tendrá una relación D_{el}/D_h de 3/2

Profundidades alcanzadas

La profundidad a que se encuentra el tubo es $P=20$ cm, por lo tanto su relación con respecto al diámetro del hueco será $P = D_h$ (20/20). El primer perfil, con separación interelectródica 15 cm alcanzará una profundidad de 0,40 m, el segundo perfil con separación de 20 cm profundizará hasta 0,50 m y el último de espaciado 30 cm tomará los datos más profundos a 80 cm, si bien la mayor parte de datos se sitúan en los primeros 60 cm de perfil.

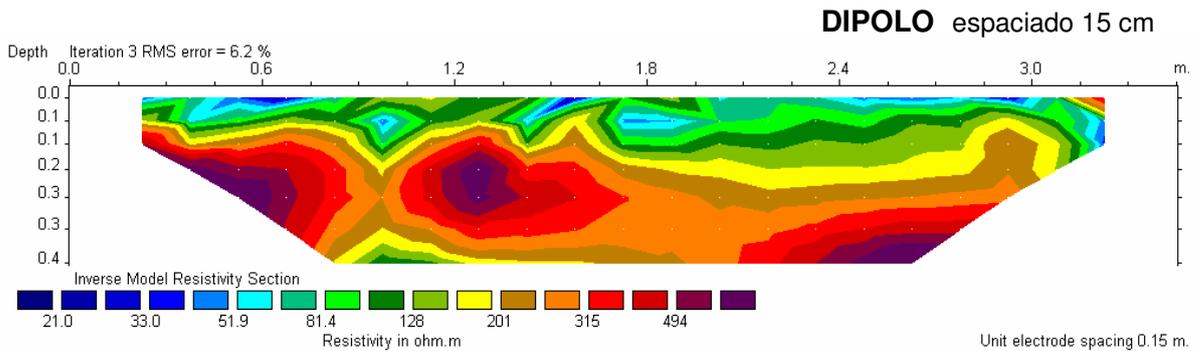
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno limo-arenoso en el que se encuentra ubicado el tubo de hormigón. Se espera un perfil que presente dos niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel inferior seco y resistivo correspondiente al nivel de arenas-limosas.



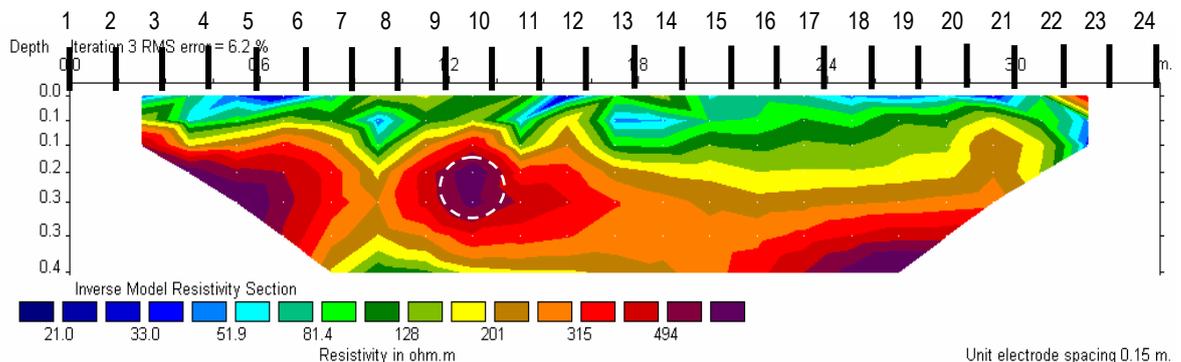
5.4.2.2.1 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 15 cm

En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 15 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (< de 80 ohm.m) que incluye los primeros 15 cm y una banda de valores altos (> de 200 ohm.m) que incluye al resto del perfil.



Se detecta una clarísima anomalía positiva en el nivel inferior a distancia 1,27 m y profundidad 18 cm. Dicha anomalía tiene un valor alto de resistividad (> de 490 ohm.m) y su forma es perfectamente circular, con un tamaño que se ajusta al diámetro del tubo enterrado.

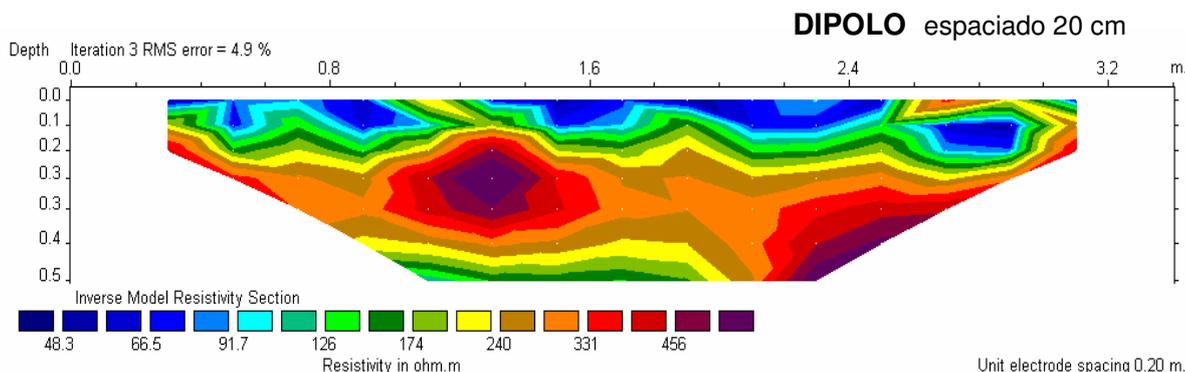
En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 20 cm bajo los electrodos nº9 y nº10, y que el dispositivo lo ha detectado con gran exactitud, ya que error de 2 cm sobre la profundidad (la anomalía aparece a 18 cm y en la zanja excavada se midieron 20 cm) puede ser considerado despreciable y podría relacionarse con la variación del espesor de recubrimiento o con la profundidad de hincado de los electrodos en el terreno.



Cabe decir que el ratio $D_{el}/D_h = 3/4$ que se ensaya en este primer trabajo se presenta como muy adecuado para la detección de huecos rellenos de aire, proporcionando un resultado que podría ser clasificado como muy óptimo.

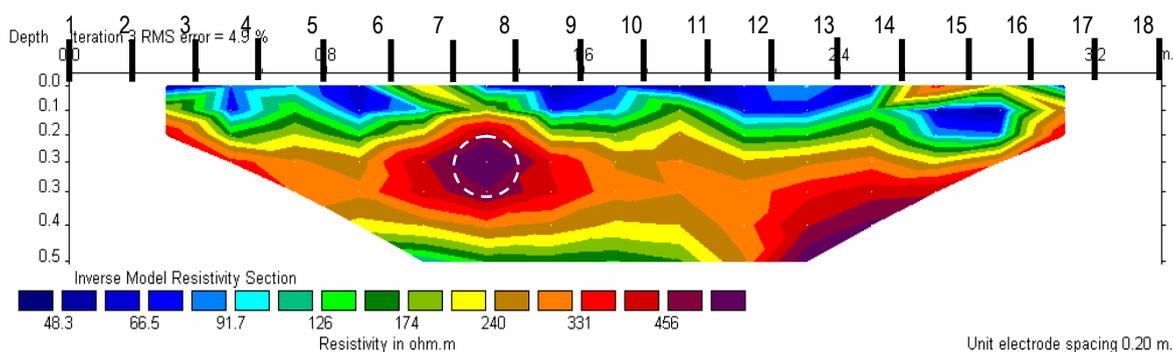
5.4.2.2 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 20 cm

En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 20 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (< de 80 ohm.m) que incluye los primeros 15 cm y una banda de valores altos (> de 200 ohm.m) que incluye al resto del perfil.



Se detecta una clarísima anomalía positiva en el nivel inferior a distancia 1,30 m y profundidad 18 cm. Dicha anomalía tiene un valor alto de resistividad (> de 490 ohm.m), su forma es circular con un ligero achatamiento en el eje vertical, y su tamaño se ajusta al diámetro del tubo enterrado.

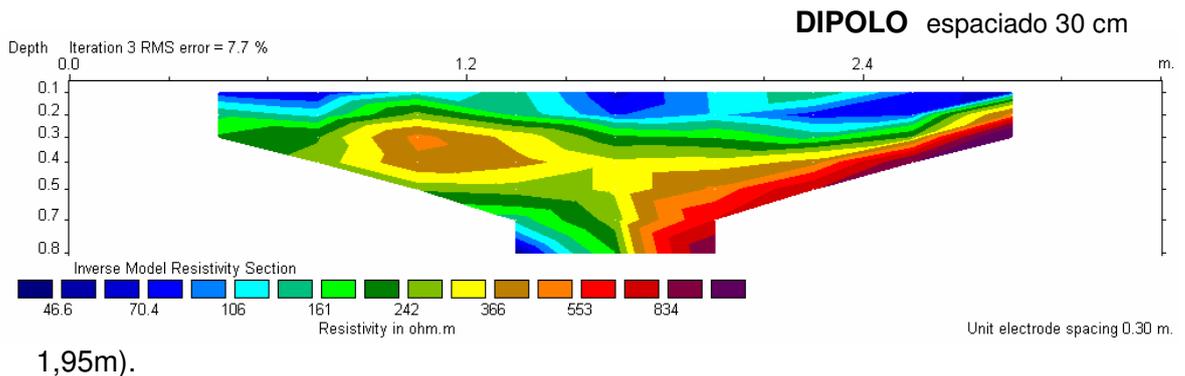
En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 18 cm bajo los electrodos nº7 y nº8, y que el dispositivo lo ha detectado con gran exactitud.



El ratio $D_{el}/D_h=1$ que se ensaya en este primer trabajo se presenta como adecuado para la detección de huecos rellenos de aire, proporcionando un resultado que podría ser clasificado como óptimo.

5.4.2.2.3 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 30 cm

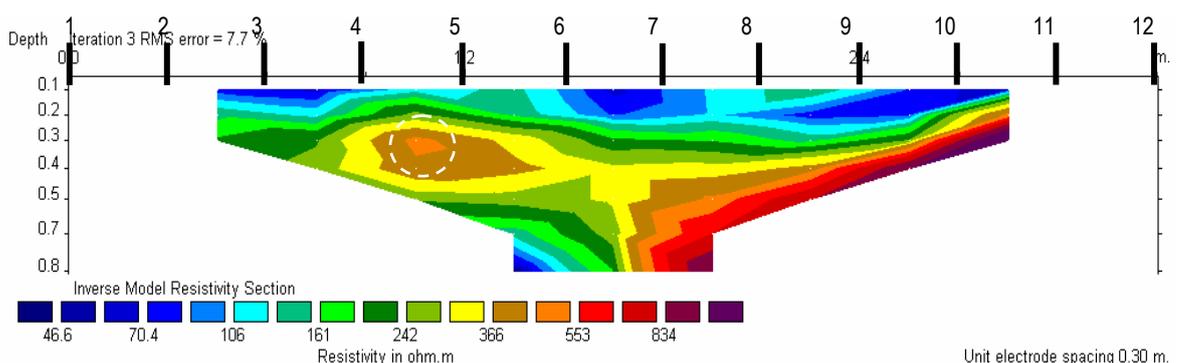
En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 30 cm se observa una franja superficial de valores bajos de resistividad (< de 100 ohm.m) que incluye los primeros 15 a 20 cm y una zona inferior con distribución de resistividad heterogénea, ya que en su base, a profundidad 0,80 m aparece una gradación de valores muy bajos a la izquierda (70 ohm.m a distancia 1,35m) hasta muy altos a la derecha (800 ohm.m a distancia



El perfil muestra una anomalía positiva a distancia 1,05 m y profundidad 25 cm. Dicha anomalía tiene el mismo valor de resistividad (entre 400 y 500 ohm.m) que se ha obtenido en los trabajos anteriores. En esta ocasión su forma es ovalada asimétrica con achatamiento en el eje vertical. El eje menor del óvalo se ajusta al diámetro del tubo, pero el eje mayor duplica su verdadera dimensión.

En la figura adjunta se ha señalado la posición del tubo y de los electrodos sobre el perfil. Se puede comprobar como la anomalía también es imprecisa en cuanto a su profundidad, ya que la anomalía aparece a una profundidad de 25 cm de profundidad (medición siempre tomada desde la cresta de la anomalía hasta la superficie), mientras que realmente el tubo se encuentra 20 cm. Donde sí comprobamos una total exactitud es en la distancia horizontal, ya que la anomalía aparece correctamente situada a 1,05 m, y la posición de su centro.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad



de 20 cm bajo los electrodos nº7 y nº8, y que la anomalía tiene su centro coincidente con el del hueco, aunque su asimetría le confiere cierta imprecisión.

Conclusiones

El dispositivo Dipolo-dipolo detecta con gran precisión la presencia de un tubo hueco de diámetro 20 cm enterrado a una profundidad de 0,2 m. Se ha comprobado que el espaciado entre electrodos más adecuado es 15 cm, es decir el que tiene un ratio $D_{el}/D_h = 3/4$. También da buen resultado la distancia interelectrónica de 20 cm ($D_{el}/D_h = 1$) donde se ha obtenido un resultado óptimo. Las imprecisiones se han detectado en el tercer ensayo, con una separación entre electrodos de 30 cm, donde el ratio $D_{el}/D_h = 3/2$. Al aumentar la distancia interelectrónica disminuye la resolución del perfil.

Otro parámetro a tener en cuenta es la profundidad, ya que la experiencia 4 del capítulo 5.3.6 demostró que, con el aumento de la profundidad, disminuye la resolución de los perfiles.

Finalmente se ha comprobado que en unas condiciones de trabajo reales el dispositivo Dipolo-dipolo se muestra superior en eficacia y resolución al dispositivo Wenner.



5.4.3 TRABAJO 1: TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- RELLENO MITAD DE AGUA

El objetivo de este trabajo consiste en detectar desde la superficie un tubo de hormigón de 20 cm de diámetro cuyo interior está parcialmente relleno de agua. El tubo es una canalización de evacuación de aguas que está en uso y tiene la mitad de su sección rellena de agua y la otra mitad por aire.

Se sabe que el tubo está construido en hormigón y que tiene un diámetro de 20 cm y se tiene la certeza de que está enterrado a una profundidad de 40 cm (ésta es la distancia que separa la cresta del tubo de la superficie) ya que el perfil de tomografía se ha realizado cerca de una arqueta de registro de la canalización, donde se puede comprobar su diámetro, profundidad y relleno. Considerando tal profundidad y dicho diámetro de hueco se ha diseñado para su localización una prospección de 5 perfiles de tomografía en los que se probarán diversos espaciados para dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo.

El objetivo último de estos trabajos es determinar el dispositivo y espaciado óptimos que habrían de ser utilizados para obtener los mejores resultados en este caso concreto de un hueco conductor a profundidad media.

5.4.3.1 TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- MITAD RELLENO DE AGUA – Dispositivo Wenner

Se han diseñado 2 perfiles con dispositivo Wenner. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 15 cm ($D_{ei}=15\text{cm}$) que tomará 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. El segundo combinará 19 electrodos con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{ei}=20\text{cm}$) y una adquisición de 51 datos repartidos en 6 niveles de profundidad. Para el primer perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1,5/2 es decir, la separación interelectródica es 3/4 del diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1/1, ya que la Distancia entre electrodos es la misma que el Diámetro del hueco (20/20).

Profundidades alcanzadas

Ya que el objetivo a localizar se encuentra situado a una profundidad de 40 cm se han diseñado unos perfiles de 0,6 m de profundidad. La profundidad es $P=40$ cm, por lo tanto su relación con respecto al diámetro del hueco será $P = 2D_h$ (20/20).

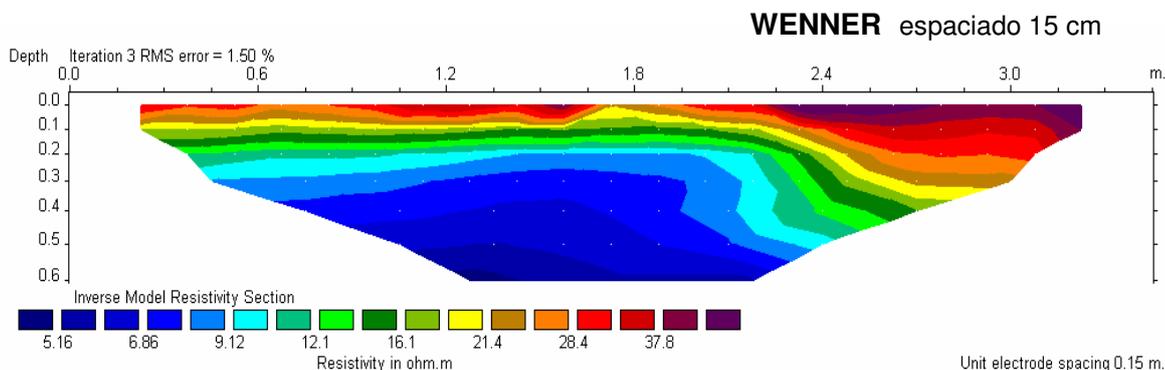
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno arcilloso en el que se encuentra ubicado el tubo de

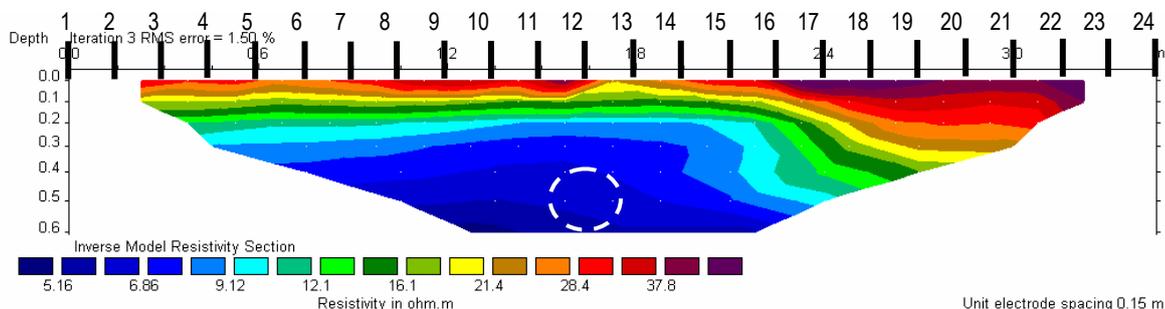
hormigón. Se espera un perfil que presente tres niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel intermedio de resistividad media correspondiente al nivel de arcilla poco húmeda, y un nivel inferior de baja resistividad debido a la arcilla con alta humedad debida a la filtración del agua del tubo hacia el terreno. El resultado habría de ser similar a las imágenes de la experiencia 5 (capítulo 5.3.7) donde el solapamiento de la respuesta eléctrica del tubo y del sustrato arcilloso generaba una anomalía negativa con forma de "joroba", una curvatura convexa hacia arriba.

5.4.3.1.1 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 15 cm

En el perfil Wenner de espaciado 15 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (entre 20 y 40 ohm.m) que incluye los primeros 10 cm (30 cm a la derecha ya que tiene forma asimétrica) y una banda de valores muy bajos (< de 9 ohm.m) que toma colores azules e incluye al resto del perfil.



El perfil no muestra anomalías de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco, ya sea conductor o resistivo. Llama la atención la resistividad tan baja del terreno, con valores muy bajos próximos al de agua continental (subcapítulo 4.4). El nivel de colores azules correspondiente a arcillas parece estar extremadamente húmedo a juzgar por su alta conductividad.

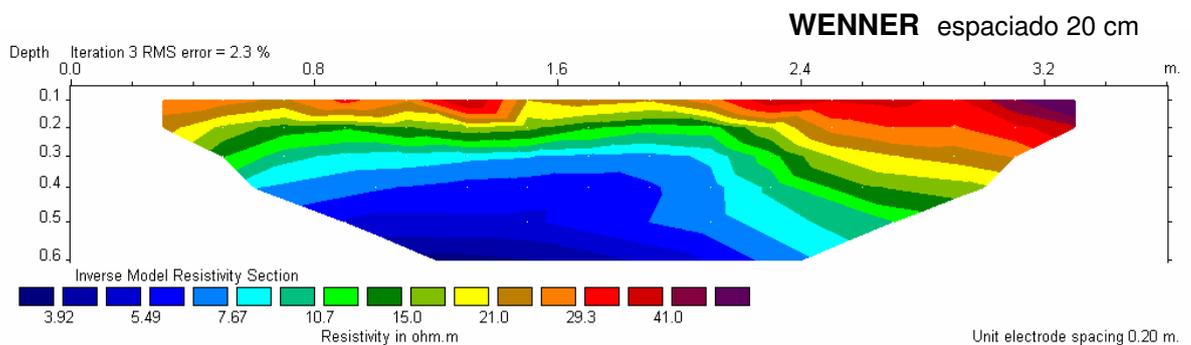


En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 40 cm bajo el electrodo nº12, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo. En

general si que presenta un aspecto de sustrato con forma convexa hacia arriba a modo de "joroba", pero no tiene un máximo que señale con claridad la posición del tubo.

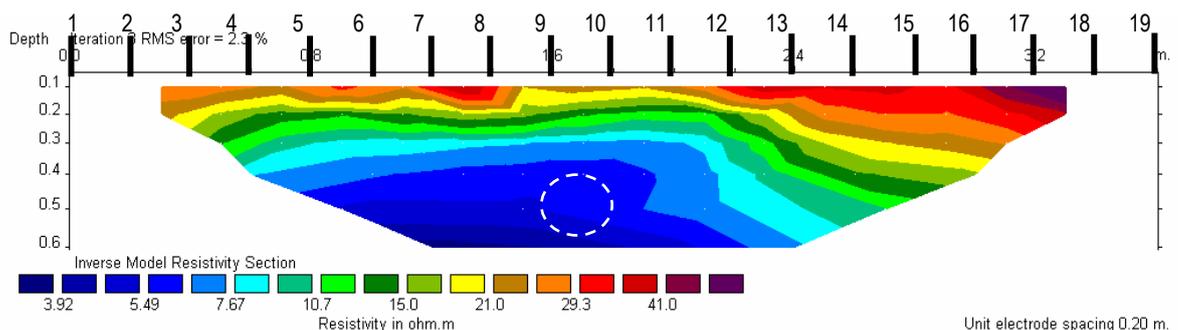
5.4.3.1.2 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 20 cm

En el perfil Wenner de espaciado 20 cm es idéntico al perfil anterior, con espaciado 15 cm. Se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (entre 20 y 40 ohm.m) que incluye los primeros 10 cm (30 cm a la derecha ya que tiene forma asimétrica) y una banda de valores muy bajos (< de 7 ohm.m) que toma colores azules e incluye al resto del perfil.



El perfil no muestra anomalías de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco, ya sea conductor o resistivo. Llama la atención la resistividad tan baja del terreno, con valores muy bajos próximos al de agua continental. El nivel de colores azules correspondiente a arcillas parece estar extremadamente húmedo a juzgar por su alta conductividad.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 40 cm bajo el electrodo nº9, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo. En general si que presenta un aspecto de sustrato con forma convexa hacia arriba a modo de "joroba", pero no tiene un máximo que señale con claridad la posición del tubo.



Conclusiones

El dispositivo Wenner no es capaz de detectar la presencia de un tubo parcialmente relleno de agua, con diámetro 20 cm y enterrado a una profundidad de 0,4 m. Utilizando un espaciado entre electrodos de 20 cm ($D_{ei}/D_h = 1/1$) el resultado es nulo, y el resultado no cambia si se reduce dicha distancia interelectródica a 15 cm ($D_{ei}/D_h = 3/4$) el resultado, sin ser bueno, si que proporciona unos indicios de la presencia del hueco.

El perfil presenta unos valores de resistividad extremadamente bajos, lo cual es indicativo de que el suelo tiene mucha humedad. Se plantea la posibilidad de que la canalización esté rota y filtre mucha agua al terreno, que al ser arcilloso estaría en un punto de humedad cercano a la saturación. Al finalizar la adquisición de datos se procederá a excavar el terreno para comprobar la verdadera profundidad y el estado del tubo.

5.4.3.2 TUBO DE HORMIGÓN DIÁMETRO 20 cm- MITAD RELLENO DE AGUA – Dispositivo Dipolo-dipolo

Se han diseñado 3 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 15 cm ($D_{ei}=15\text{cm}$) que tomará 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El segundo combinará 19 electrodos con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{ei}=20\text{cm}$) y una adquisición de 108 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El tercer perfil combinará 13 electrodos separados 30 cm ($D_{ei}=30\text{cm}$) y adquirirá 54 datos de resistividad en 9 niveles.

Para el primer perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1,5/2 es decir, la separación interelectródica es 3/4 del diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{ei}/D_h será 1/1, ya que la Distancia entre electrodos es la misma que el Diámetro del hueco (20/20), y el tercer perfil tendrá una relación D_{ei}/D_h de 3/2

Profundidades alcanzadas

El primer perfil, con separación interelectródica 15 cm alcanzará una profundidad de 0,40 m, el segundo perfil con separación de 20 cm profundizará hasta 0,50 m y el último de espaciado 30 cm tomará los datos más profundos a 0,80 m.

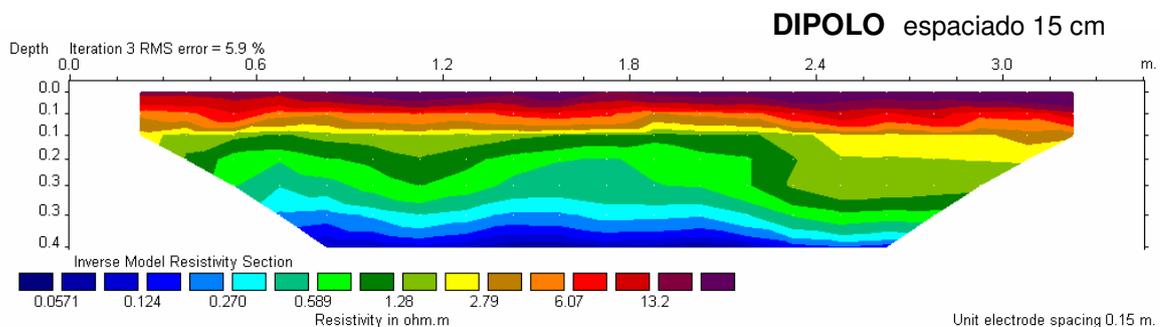
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno arcilloso en el que se encuentra ubicado el tubo de hormigón. Se espera un perfil que presente tres niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel

intermedio de resistividad media correspondiente al nivel de arcilla poco húmeda, y un nivel inferior de baja resistividad debido a la arcilla con alta humedad debida a la filtración del agua del tubo hacia el terreno. El resultado habría de ser similar a las imágenes de la experiencia 5 (apartado 5.3.7) donde el solapamiento de las respuestas eléctricas de tubo y sustrato arcilloso generaba una anomalía negativa con forma de "joroba", una curvatura convexa hacia arriba..

5.4.3.2.1 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 15 cm

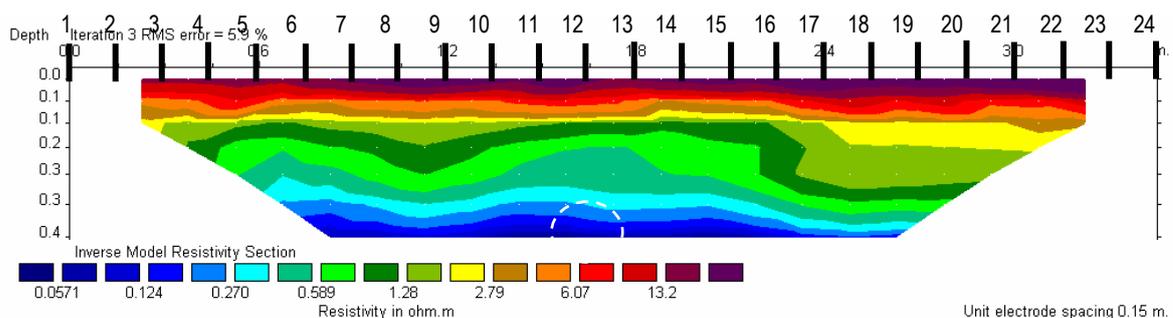
En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 15 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores muy bajos (entre 6 y 20 ohm.m) que incluye los primeros 15 cm y una banda de valores extremadamente bajos (de 2 a 0,05 ohm.m) que abarca al resto del perfil.



No se detectan anomalías, y el perfil presenta una estratificación horizontal con sucesión gradual de bandas hacia resistividades menores en profundidad.

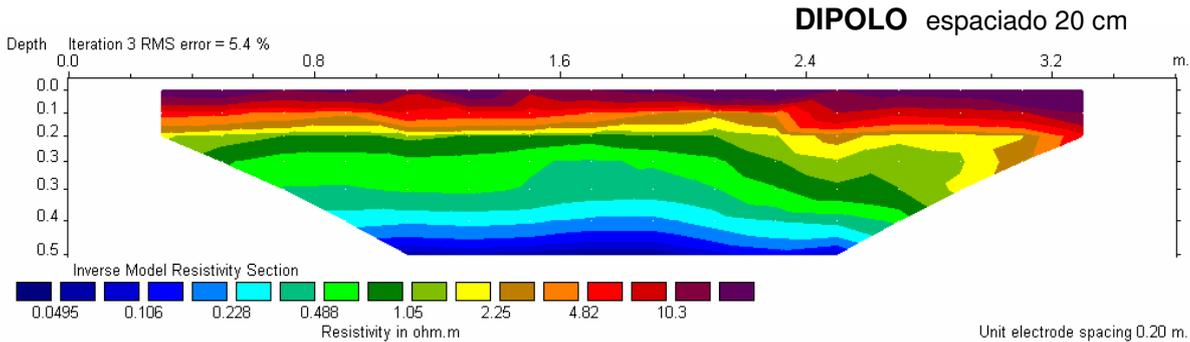
En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 40 cm bajo el electrodo nº12, y que el dispositivo no lo ha detectado.

Cabe decir que el ratio $D_{el}/D_h = 3/4$ que se ensaya en este primer trabajo con dispositivo Dipolo-dipolo se presenta como insuficiente para la detección de huecos rellenos de agua en un terreno muy conductor.



5.4.3.2.2 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO **espaciado 20 cm**

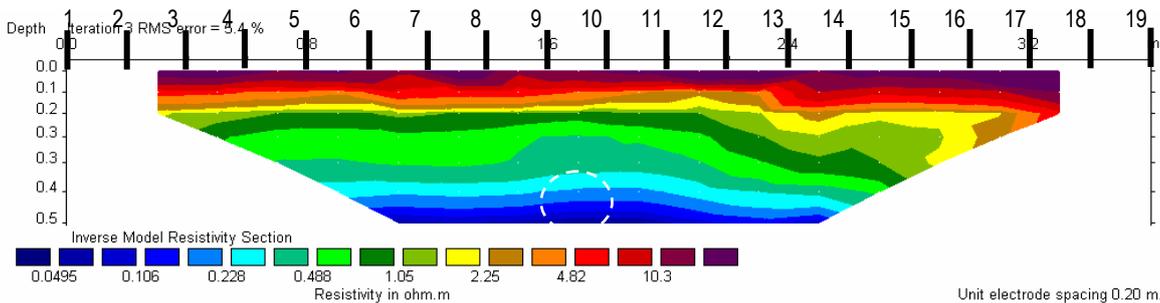
El perfil Dipolo-dipolo de espaciado 20 cm es idéntico al perfil anterior, donde se utilizó un espaciado de 15 cm. Se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores muy bajos (entre 5 y 20 ohm.m) que incluye los primeros 15 cm y una banda de valores extremadamente bajos (de 2 a 0,04 ohm.m) que abarca al resto del perfil.



No se detectan anomalías, y el perfil presenta una estratificación horizontal con sucesión gradual de bandas hacia resistividades menores en profundidad.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 40 cm bajo el electrodo nº12, y que el dispositivo no lo ha detectado.

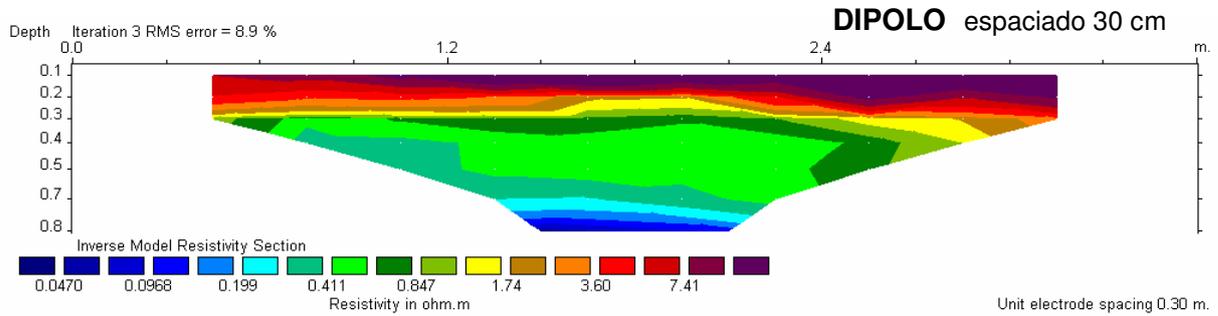
Cabe decir que el ratio $D_{el}/D_n = 1/1$ que se ensaya en este segundo trabajo con dispositivo Dipolo-dipolo se presenta como insuficiente para la detección de huecos rellenos de agua en un terreno muy conductor.



5.4.3.2.3 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO **espaciado 30 cm**

El perfil Dipolo-dipolo de espaciado 30 cm es idéntico a los perfiles anteriores, donde fueron empleados espaciados de 15 y 20 cm. Se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores muy bajos (entre 1 y 9 ohm.m) que

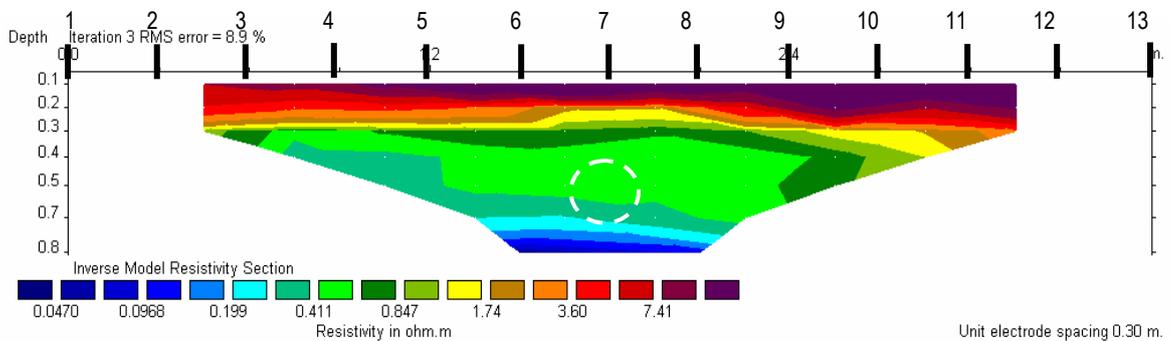
incluye los primeros 30 cm y una banda de valores extremadamente bajos (de 1 a 0,04 ohm.m) que abarca al resto del perfil.



No se detectan anomalías, y el perfil presenta una estratificación horizontal con sucesión gradual de bandas hacia resistividades menores en profundidad.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 40 cm bajo el electrodo nº7, y que el dispositivo no lo ha detectado.

Cabe decir que el ratio $D_{el}/D_h = 3/2$ que se ensaya en este trabajo con dispositivo Dipolo-dipolo se presenta como insuficiente para la detección de huecos rellenos de agua en un terreno muy conductor.



Conclusiones

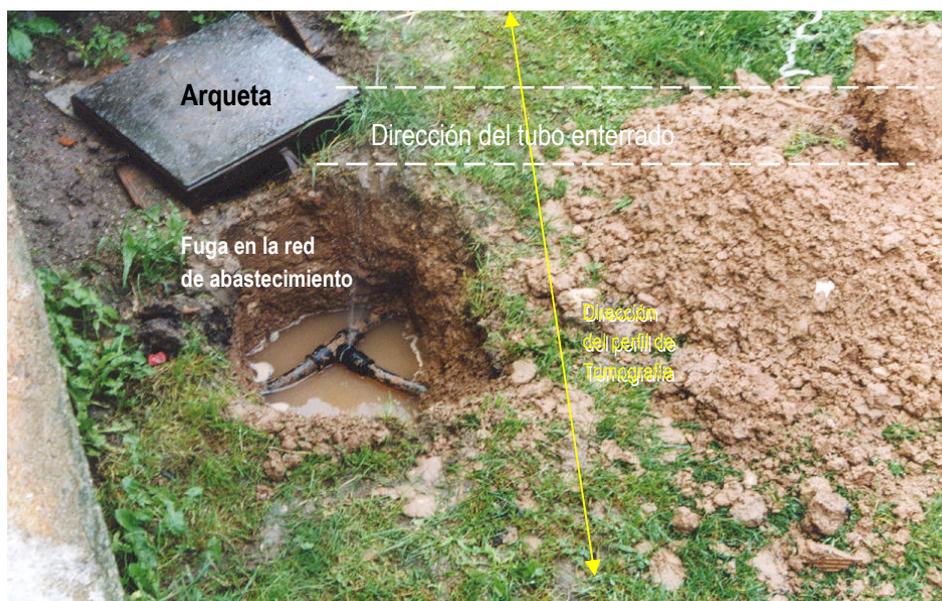
El dispositivo Dipolo-dipolo no detecta la presencia de un tubo semirelleno de agua de diámetro 20 cm y enterrado a una profundidad de 0,4 m en un terreno de comportamiento eléctrico muy conductor. Se ha comprobado que la reducción del espaciado entre electrodos no incide en un aumento de la resolución, y que los diferentes ratios $D_{el}/D_h = 3/4$, $D_{el}/D_h = 1$ y $D_{el}/D_h = 3/2$ proporcionan los mismos resultados.

Los parámetros influyen que en los malos resultados de estos trabajos son la humedad del terreno y la profundidad del hueco. A mayor profundidad peor resolución, como se pudo comprobar en la experiencia 4 del apartado 5.3.6. Y según vemos en

este trabajo cuando el terreno es muy conductor la presencia de un hueco también conductor pasa desapercibida.

Finalmente se ha comprobado que en unas condiciones de trabajo reales ninguno de los dos dispositivos Dipolo-dipolo o Wenner es capaz de localizar un hueco con estas características. Para comprobar el estado del tubo y descartar factores secundarios se procedió a la excavación del terreno para comprobar su posición y conservación de cara a posibles roturas por las que pudiera filtrar el agua al terreno. Durante la excavación de vio que la arcilla estaba en estado muy plástico y que había una fuente de agua. Así se pudo localizar una fuga en la red de abastecimiento de agua muy próxima al tubo y que es la responsable de la elevada conductividad que presenta el terreno (ver fotografía).

Se puede concluir también que un hueco conductor en un terreno también conductor no es detectable mediante tomografía eléctrica debido a que no existe suficiente contraste de resistividades.



5.4.4 TRABAJO 2: TUBO DE PVC de diámetro 16 cm

El objetivo de este trabajo consiste en detectar desde la superficie un tubo de PVC de 16 cm de diámetro. El tubo pertenece a una red de alcantarillado de un terreno particular. Se conoce aproximadamente su posición y profundidad, pero no la situación exacta. La idea es intentar localizarlo mediante perfiles de tomografía para posteriormente comprobar su situación excavando el terreno en el lugar donde el perfil de tomografía señale mediante una anomalía.

Se sabe que el tubo está construido en PVC y que tiene un diámetro de 16 cm y, al comienzo del trabajo tan sólo se sabía que está enterrado a una profundidad de entre 10 y 20 cm (distancia que separa la cresta del tubo de la superficie). Al finalizar las medidas se procedió a la excavación del terreno allá donde el perfil presentaba la anomalía, y el resultado fue perfecto. El tubo se encontraba exactamente a 12 cm de profundidad. Considerando la profundidad y el diámetro de hueco se diseñó una prospección de 6 perfiles de tomografía en los que se probaron diversos espaciados para dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo.

El objetivo último de estos trabajos es determinar el dispositivo y espaciado óptimos que habrían de ser utilizados para obtener los mejores resultados en este caso concreto.



5.4.4.1 TUBO DE PVC DIÁMETRO 16 cm – Dispositivo Wenner

Se diseñaron 3 perfiles con dispositivo Wenner. El primero combinó 24 electrodos con una separación de electrodos de 7 cm ($D_{ei}=7$ cm) y tomó 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. El segundo también combinó 24 electrodos, pero con una separación de electrodos de 10 cm ($D_{ei}=10$ cm) y tomó 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. El segundo combinó 15 electrodos con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{ei}=20$ cm) y una adquisición de 30 datos repartidos en 4 niveles de profundidad. Para el primer perfil el ratio D_{ei}/D_h será 7/16 es decir, la separación interelectródica es 0,44 veces el diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{ei}/D_h será 10/16, es decir casi 2/3 (0,6), y para el último D_{ei}/D_h será 20/16 (1,25).

Profundidades alcanzadas

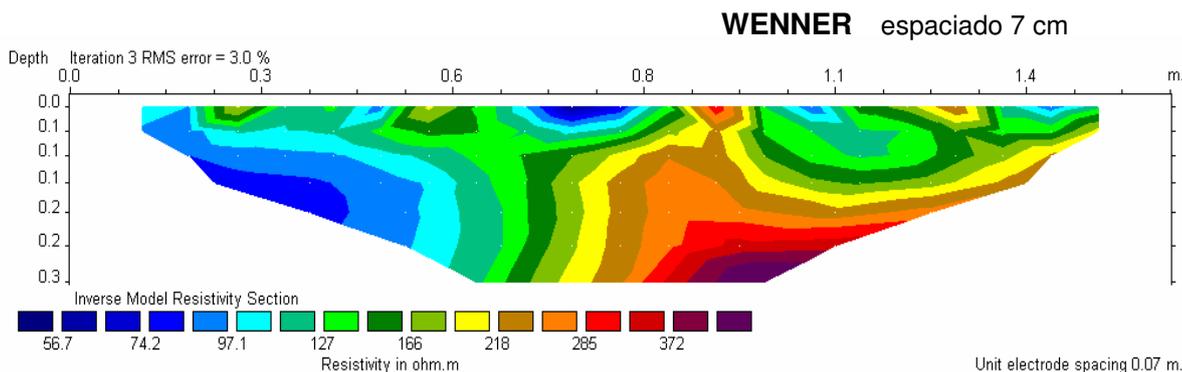
Después de la excavación se supo que el objetivo a localizar se encuentra situado a una profundidad de 12 cm ($P=0,75D_h$) será suficiente un perfil de 0,5 m de profundidad. El primer perfil, con separación interelectródica 7 cm alcanzará una profundidad de 0,35 m, el segundo perfil con separación de 10 cm profundizará hasta 0,40 m de investigación el último con separación de 20 cm profundizará hasta 0,50 m.

Materiales

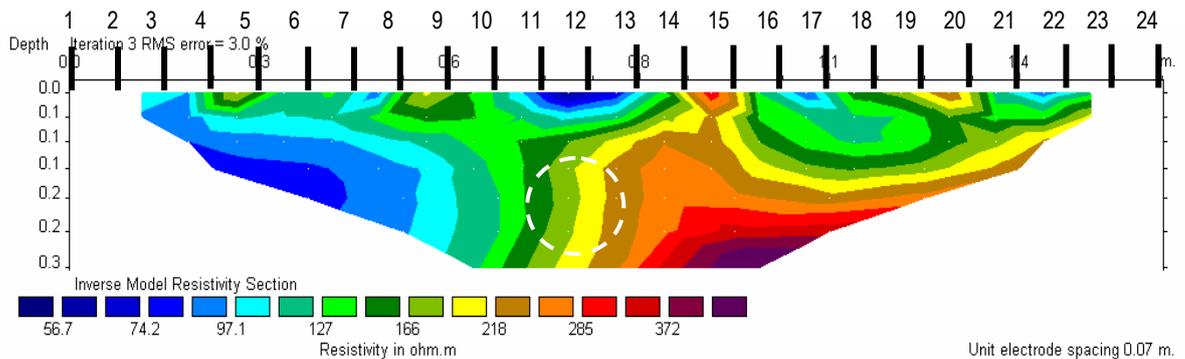
El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno limo-arenoso en el que se encuentra ubicado el tubo. Se espera un perfil que presente dos niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel inferior seco y resistivo correspondiente al nivel de arenas-limosas.

5.4.4.1.1 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 7 cm

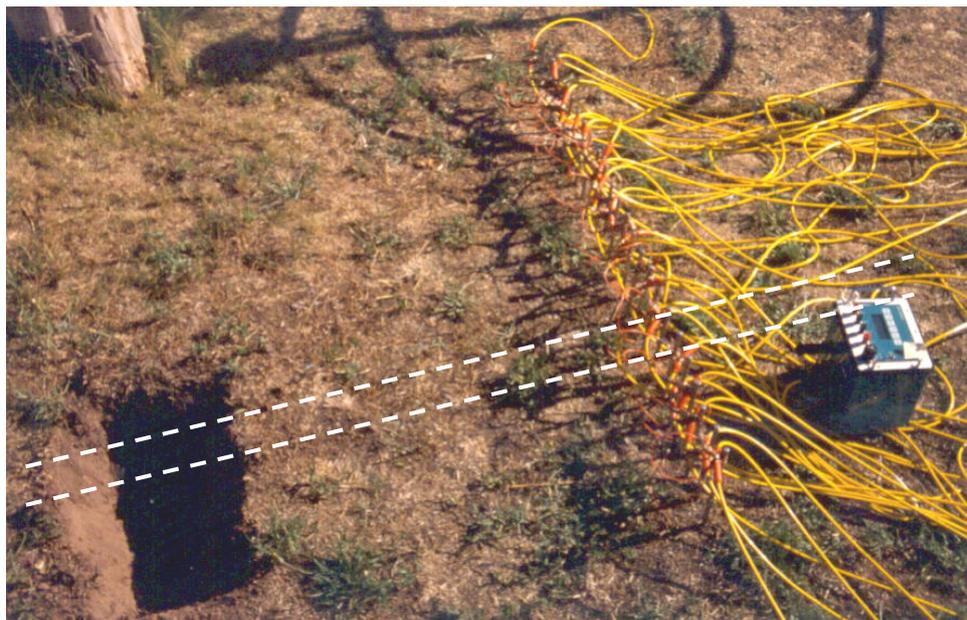
En el perfil Wenner de espaciado 7 cm no se observa una anomalía clara. La distribución de los valores de resistividad es diversa y dispersa. La base del extremo izquierdo tiene valores bajos de resistividad (< de 100 ohm.m) y la base del extremo derecho valores medios (> de 370 ohm.m)



El perfil no muestra anomalías de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco. Los mayores valores de resistividad ($>$ de 300 ohm.m) se concentran bajo los electrodos nº10 y nº11, pero su forma no delata con claridad una cavidad, ya que dicha variación de resistividad puede estar relacionada con una variable distribución de la humedad en el terreno.

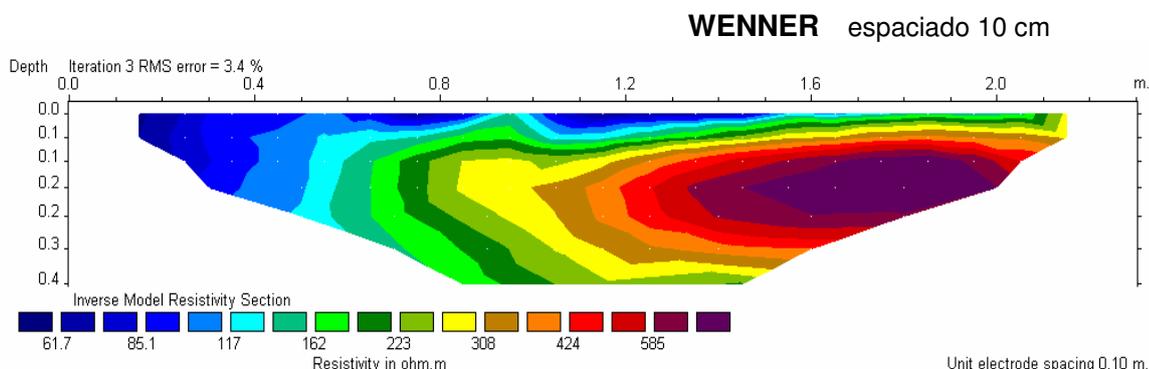


En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo, conocida una vez realizada la excavación, y la posición de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 12 cm bajo los electrodos nº11 y nº12, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo. Tan solo cabe mencionar que el nivel profundo de resistividad media que hay bajo los electrodos nº13 y nº15 tiene aparece deformado hacia arriba con forma de joroba, pero esa curvatura no coincide con la posición del tubo, por cuanto es probable que se deba a variaciones locales en el contenido de humedad del suelo.

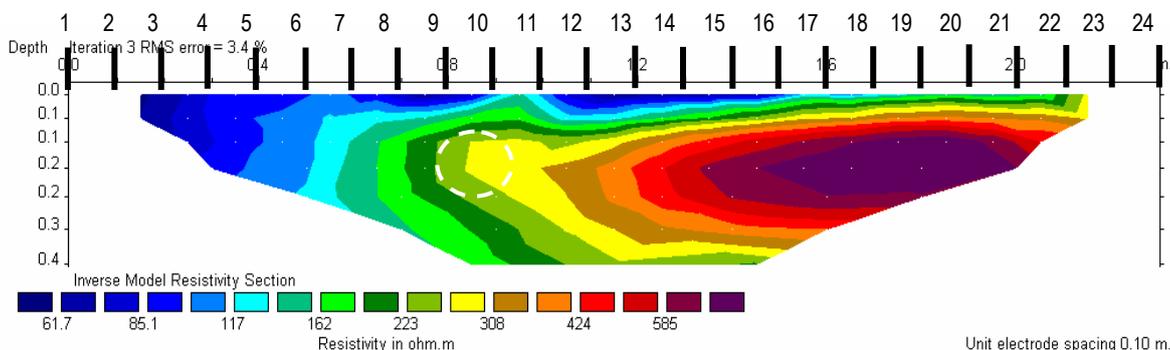


5.4.4.1.2 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 10 cm

En el perfil Wenner de espaciado 10 cm se observa un fino nivel superior de baja resistividad (< de 117 ohm.m) con forma de cuña que tiene su máximo engrosamiento a la izquierda del perfil, bajo los electrodos nº3 a nº9. A la derecha del perfil queda un núcleo aislado de valores altos de resistividad (> de 500 ohm.m) con forma ovalada en posición horizontal que abarca desde el electrodo nº14 hasta el nº20. Sin embargo, esta anomalía positiva no está relacionada con el tubo de PVC ya que éste se encuentra situado bajo los electrodos nº9 y nº10.

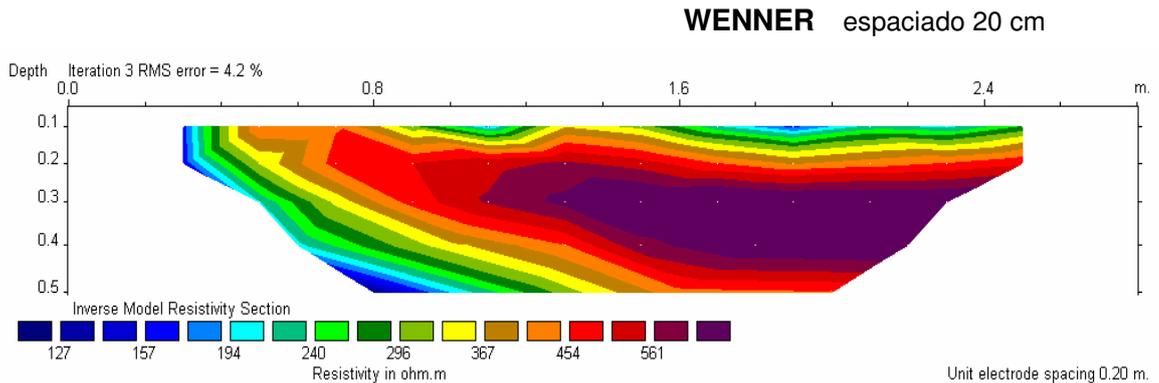


El perfil no muestra anomalías claras de resistividad que puedan señalar la presencia de un hueco. En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 12 cm bajo los electrodos nº9 y nº10, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo. Únicamente muestra un indicio de forma, ya que del óvalo resistivo sale una forma de protuberancia de media resistividad (300 ohm.m) que coincide con la posición del tubo.

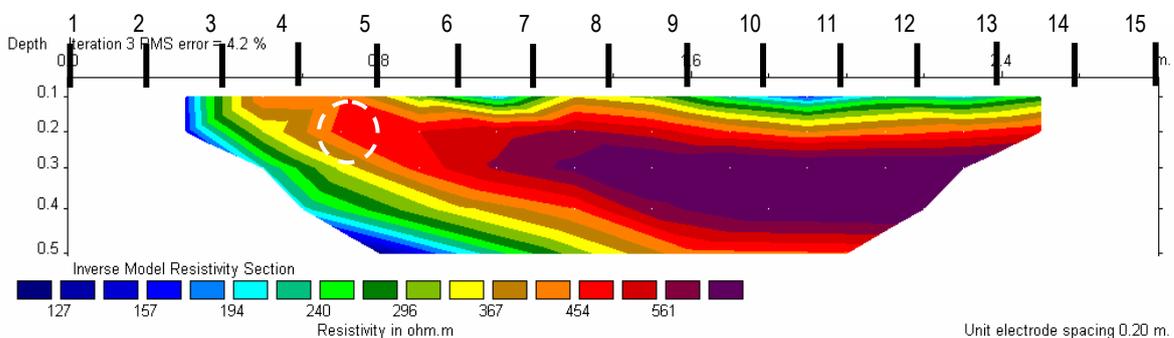


5.4.4.1.3 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 20 cm

En el perfil Wenner de espaciado 20 cm es muy similar al anterior con espaciado 10 cm ya que no se observan anomalías indicativas de la presencia de huecos. Destaca la presencia de un nivel resistivo ($>$ de 450 ohm.m) que recorre casi todo el perfil y que se acuña hasta llegar al electrodo nº3. La zona de la izquierda tiene en su base un nivel conductor ($<$ de 150 ohm.m).



En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 12 cm bajo los electrodos nº4 y nº5, pero el dispositivo no ha sido capaz de detectarlo.



Conclusiones

El dispositivo Wenner no es capaz de detectar la presencia de un tubo de PVC de diámetro 16 cm enterrado a una profundidad de 0,16 m. El resultado es nulo, independientemente del espaciado utilizado, si bien al reducir la distancia interelectródica el resultado, proporciona vagos indicios de su presencia. Cuando la distancia entre electrodos es de 10 cm ($D_{el}/D_h = 10/16$) La posición del tubo coincide aproximadamente con el lugar de la protuberancia resistiva que sale de la anomalía de alta resistividad con forma de óvalo, y para el caso de distancia interelectródica de 7 cm ($D_{el}/D_h = 7/16$) el hueco podría estar relacionado con la forma de "joroba" de la anomalía positiva.

5.4.4.2 TUBO DE PVC DIÁMETRO 16 cm – Dispositivo Dipolo-dipolo

Se han diseñado 3 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 7cm ($D_{el}=7$ cm) que tomará 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El segundo combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 10 cm ($D_{el}=10$ cm) y una adquisición de 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El tercer perfil combinará 15 electrodos separados 20 cm ($D_{el}=20$ cm) y adquirirá 72 datos de resistividad.

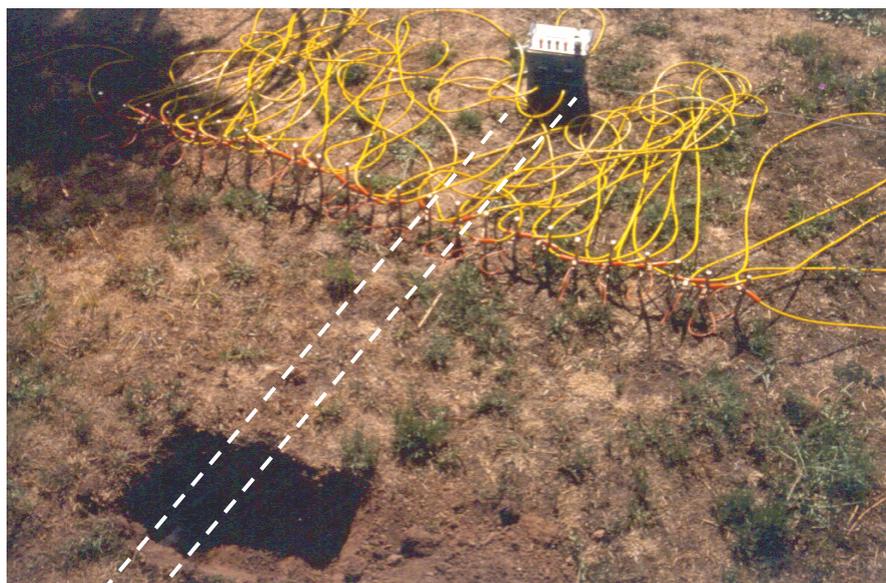
Para el primer perfil el ratio D_{el}/D_h será 7/16 es decir, la separación interelectrónica es 0,44 veces el diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{el}/D_h será 10/16, es decir casi 2/3 (0,6), y para el último D_{el}/D_h será 20/16 (1,25).

Profundidades alcanzadas

Como ya se ha visto $P=0,75D_h$ ($P=12$ cm). El primer perfil, con separación interelectrónica 7 cm alcanzará una profundidad máxima de 0,25 m, el segundo perfil con separación de 10 cm profundizará hasta 0,30 m de investigación el último con separación de 20 cm profundizará hasta 0,50 m.

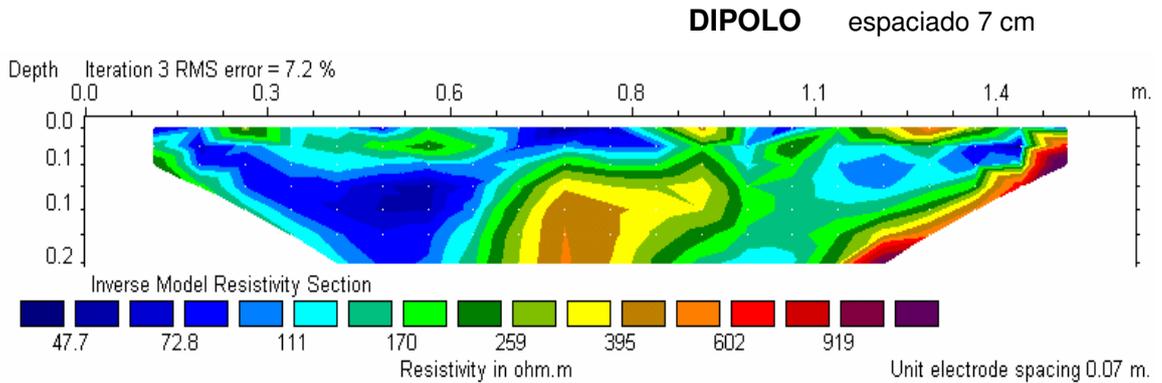
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno limo-arenoso en el que se encuentra ubicado el tubo de hormigón. Se espera un perfil que presente dos niveles de resistividad, uno superficial de baja resistividad coincidiendo con el estrato humedecido de césped y un nivel inferior seco y resistivo correspondiente al nivel de arenas-limosas.



5.4.4.2.1 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 7 cm

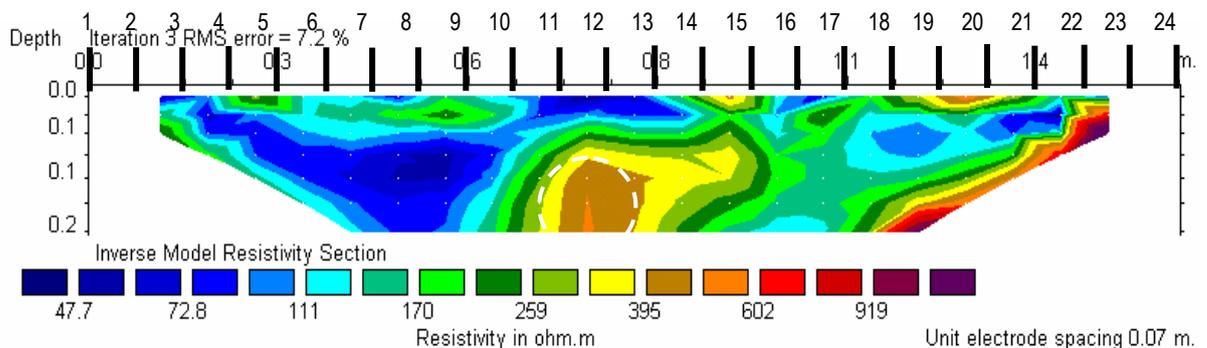
En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 7 cm se observa una anomalía central con forma de domo resistivo (400 ohm.m) rodeado por áreas de baja resistividad (< de 170 ohm.m) en colores azules.



Esta clara anomalía positiva tiene su cresta a distancia 0,77 m y profundidad 12 cm y su forma y tamaño se ajustan bien al diámetro del tubo enterrado.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 12 cm bajo los electrodos nº11 y nº12, y que el dispositivo lo ha detectado con exactitud.

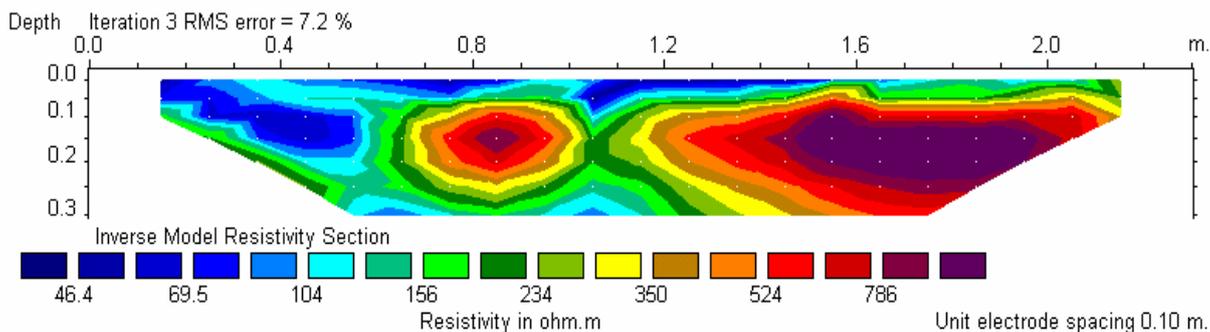
Cabe decir que el ratio $D_{el}/D_h = 7/16$ que se ensaya en este primer trabajo con dispositivo Dipolo-dipolo se presenta como adecuado para la detección de huecos rellenos de aire, proporcionando uno resultado que podría ser considerado como óptimo.



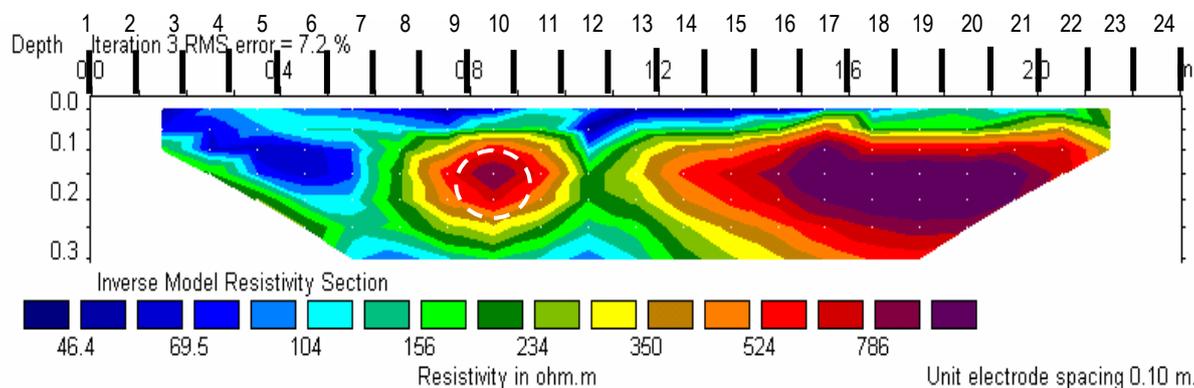
5.4.4.2.2 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 10 cm

En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 10 cm se observa una clara anomalía con forma circular bajo los electrodos nº9 y nº10. El área circular tiene unos valores de resistividad altos (> de 700 ohm.m) y su forma es fiel reflejo del tamaño y posición del tubo enterrado de PVC.

DIPOLO espaciado 10 cm



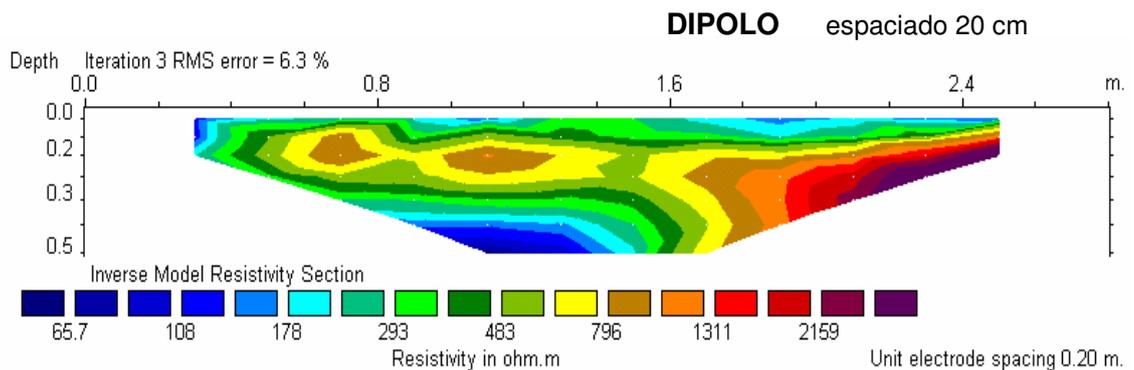
En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del tubo y de los electrodos. Se puede comprobar que el tubo se encuentra situado a una profundidad de 12 cm bajo los electrodos nº9 y nº10, y que el dispositivo lo ha detectado con gran exactitud.



El ratio $D_{el}/D_h = 10/16$ que se ensaya en este primer trabajo se presenta como muy adecuado para la detección de huecos rellenos de aire, proporcionando un resultado que podría ser considerado como muy óptimo.

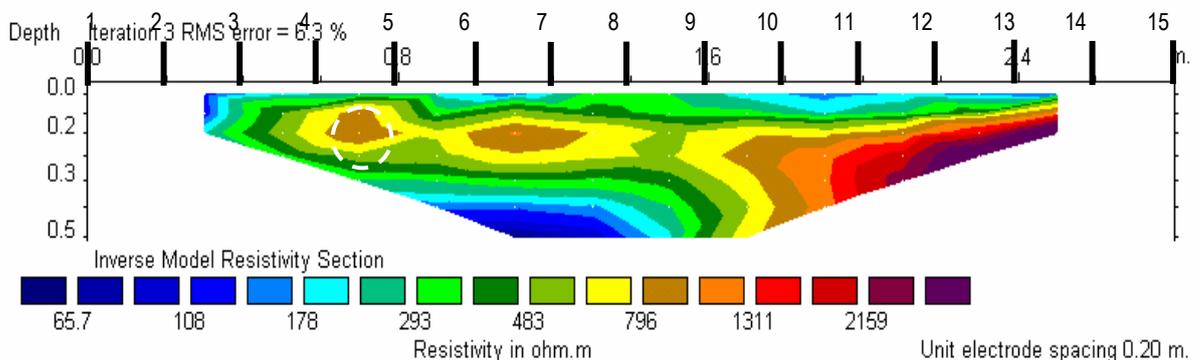
5.4.4.2.3 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 20 cm

En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 20 cm se observan una franja superficial y otra profunda de valores bajos de resistividad (< de 200 ohm.m) y una zona intermedia con distribución de resistividad media-alta un tanto heterogénea. En la base del perfil, a profundidad 0,40 m aparece una gradación de valores muy bajos a la izquierda (70 ohm.m a distancia 1,10 m) hasta muy altos a la derecha (2.000 ohm.m a distancia 2,05m y profundidad 0,30 m).



El perfil muestra dos anomalías positivas poco pronunciadas, la primera a distancia 0,70 m y profundidad 15 cm, y la segunda a distancia 1,10 m y profundidad 20 cm. Dichas anomalías tienen el mismo valor de resistividad (800 ohm.m) que en los trabajos anteriores. La primera anomalía coincide en tamaño y posición con la posición del tubo, y únicamente delata una relación con dicho hueco por su forma circular.

Lo cierto es que visto el perfil, no podría asegurarse con rotundidad cual de las dos anomalías es producida por la presencia del tubo y cual es debida a la sequedad del suelo, ya que como se ha visto en el subcapítulo 5.3 un objeto cilíndrico induce, generalmente, anomalías con forma ovalada y su eje mayor en posición horizontal.



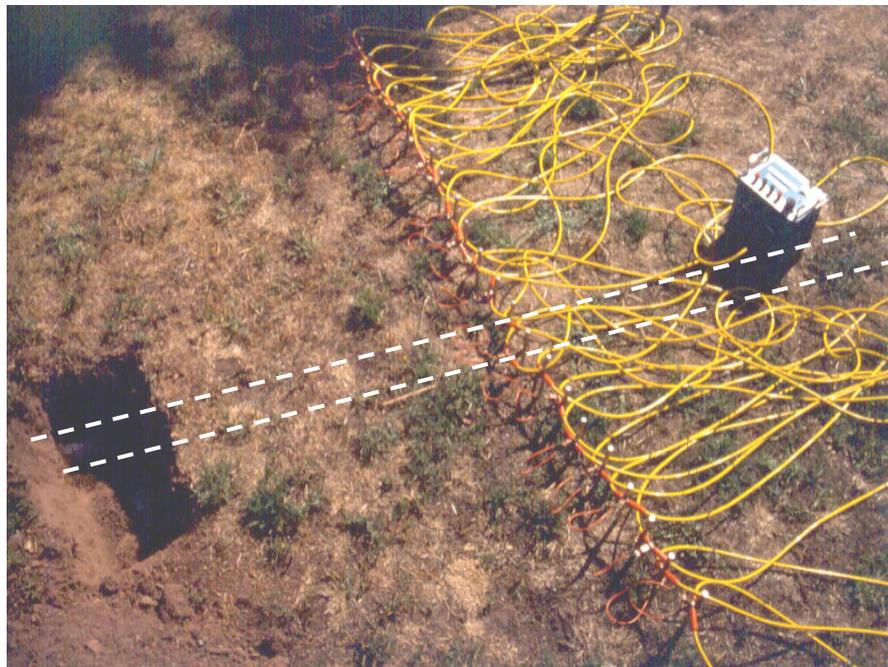
En la figura adjunta se ha señalado la posición del tubo y de los electrodos sobre el perfil. Se puede comprobar como la anomalía es algo imprecisa en cuanto a su profundidad, ya que la anomalía aparece a una profundidad algo más superficial de la

real de tubo (medición siempre tomada desde la cresta de la anomalía hasta la superficie). Donde sí comprobamos una total exactitud es en la distancia horizontal, ya que la anomalía aparece correctamente situada a 0,70 m.

Conclusiones

El dispositivo Dipolo-dipolo detecta con gran precisión la presencia de un tubo hueco de diámetro 20 cm enterrado a una profundidad de 0,2 m. Se ha comprobado que el espaciado entre electrodos más adecuado es 10 cm, es decir el que tiene un ratio $D_{el}/D_h = 10/16$. También da buen resultado la distancia interelectródica de 7 cm ($D_{el}/D_h = 7/16$) donde se ha obtenido un resultado óptimo. Las imprecisiones se han detectado en el tercer ensayo, con una separación entre electrodos de 20 cm, donde el ratio $D_{el}/D_h = 20/16$. Al aumentar la distancia interelectródica disminuye la resolución del perfil.

Finalmente se ha comprobado que en unas condiciones de trabajo reales el dispositivo Dipolo-dipolo se muestra superior en eficacia y resolución al dispositivo Wenner.



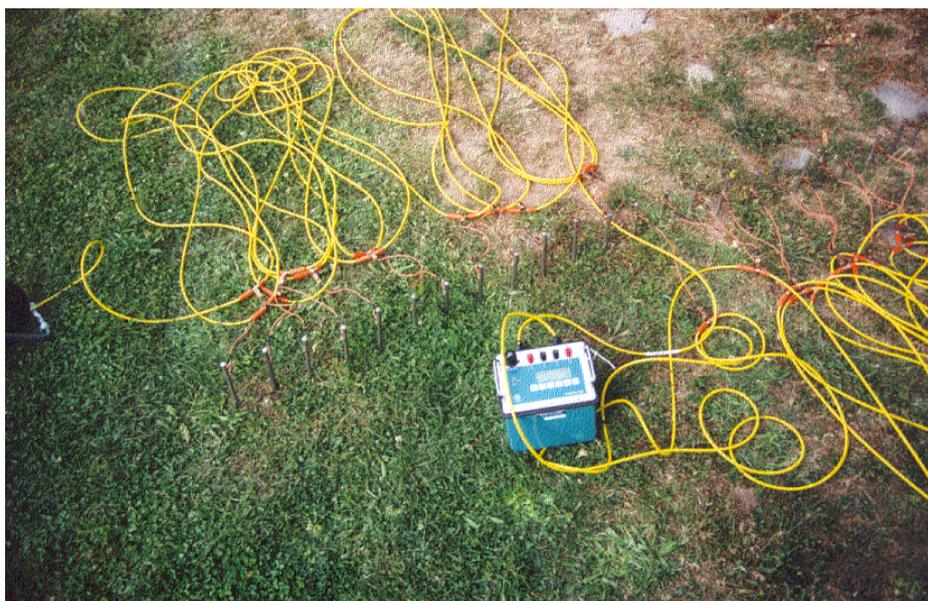
5.4.5 TRABAJO 3: PEQUEÑO MURO DE LADRILLO ENTERRADO

El objetivo de este trabajo consiste en detectar desde superficie un pequeño muro que se sabe existía en un terreno y que ahora se encuentra enterrado a poca profundidad. Este trabajo servirá de estudio previo a la aplicación de la tomografía eléctrica en el yacimiento de Colonia Clunia Sulpicia (capítulo 6), donde se espera aplicar con éxito la tomografía eléctrica a objetivos geológicos y arqueológicos.

El pequeño muro que se pretende localizar en este trabajo se sabe que está formado por una fila de ladrillo tipo doble cerámico, y tuvo como finalidad la delimitación del perímetro de una zona ajardinada. Se tiene una aproximación de la posición y profundidad a la que se encuentra y una vez finalizado el trabajo se procederá a excavar el terreno en el lugar que señale la anomalía.

Se sabe que el muro está construido en ladrillo cerámico con una base de mortero. Sus dimensiones son de 11 cm de alto por 8 cm de ancho. No se conoce su profundidad pero se sabe que es muy superficial. Considerando tal profundidad y dicho diámetro de hueco se ha diseñado para su localización una prospección de 4 perfiles de tomografía, dos con dispositivo Wenner y dos con Dipolo-dipolo, utilizando espaciados de 10 y 20 cm respectivamente.

El objetivo último de estos trabajos es determinar el dispositivo y espaciado óptimos que habrían de ser utilizados para obtener los mejores resultados en este caso concreto.



5.4.5.1 PEQUEÑO MURO DE LADRILLO ENTERRADO – Dispositivo Wenner

Se han diseñado 2 perfiles con dispositivo Wenner. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 10 cm ($D_{ei}=10\text{cm}$) que tomará 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. El segundo también combinará 24 electrodos pero con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{ei}=20\text{cm}$) que tomará una adquisición de 84 datos repartidos en 7 niveles de profundidad. Para el primer perfil el ratio D_{ei}/D_h será aproximadamente de 1/1 es decir, la separación interelectródica es similar al diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{ei}/D_h será 2/1, ya que la distancia entre electrodos es casi el doble del diámetro del objeto enterrado (20/10).

Profundidades alcanzadas

Ya que el objetivo a localizar se encuentra situado a muy poca profundidad serán suficientes perfiles de 0,5 m de profundidad. El primer perfil, con separación interelectródica 10 cm alcanzará una profundidad de 0,40 m y el segundo perfil con separación de 20 cm profundizará hasta 0,60 m de investigación.

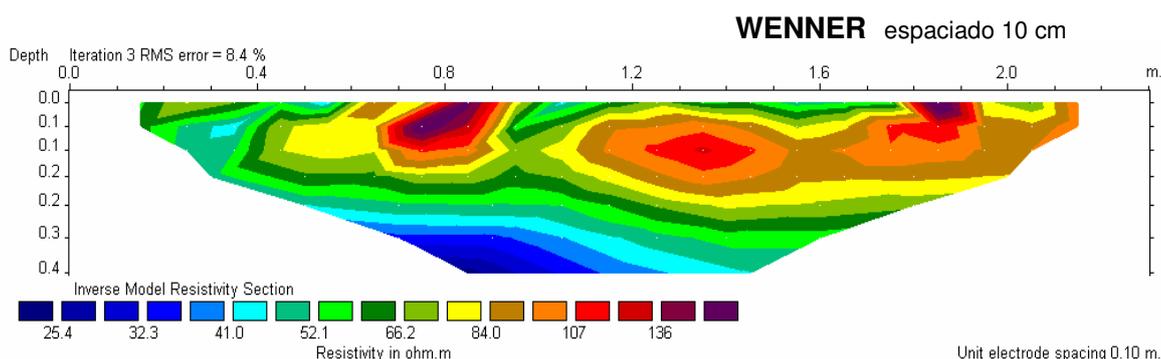
La excavación posterior determinó que el muro de ladrillo se encontraba situado a $P=10\text{ cm}$, por cuanto $P=D_h$.

Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno arcilloso. El muro queda encajado en el nivel superficial de humus. Se espera un perfil que presente una anomalía superficial de mayor resistividad que la capa de humus y materia orgánica. La respuesta eléctrica del nivel inferior de arcilla se prevé de baja resistividad debido a la alta humedad del terreno.

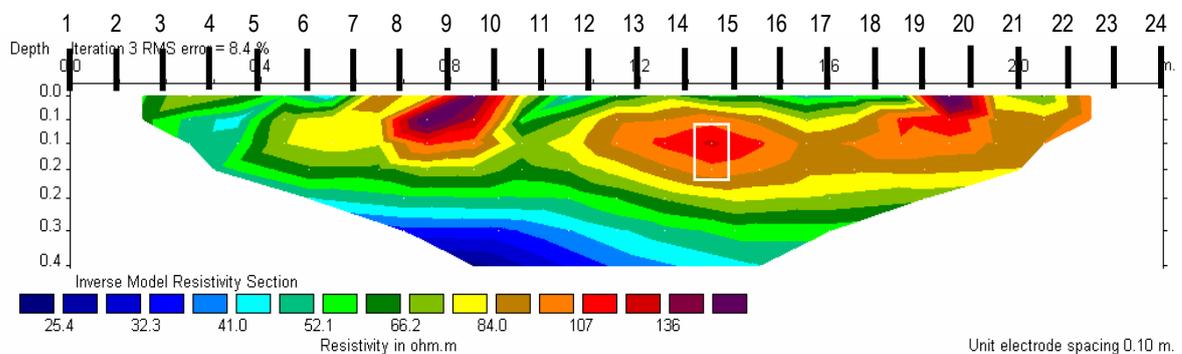
5.4.5.1.1 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 10 cm

En el perfil Wenner de espaciado 10 cm se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (de 77 a 120 ohm.m) que incluye los primeros 25 cm y una banda de valores muy bajos (< de 50 ohm.m) en su base.



El perfil presenta tres claras anomalías positivas de resistividad (> de 100 ohm.m) en el nivel superior resistivo del perfil. Las anomalías laterales situadas bajo los electrodos nº9 y nº10 y electrodos nº19 y nº20 aparecen exageradas en su valor y dimensión por un mal contacto del electrodo con el terreno, ya que tales anomalías tienen un aspecto propio de ese defecto de ejecución, puesto que son superficiales y afectan a parejas de electrodos. Descartando éstas queda como anomalía mayor la que aparece en el centro situada bajo los electrodos nº14 y nº15, de forma ovalada, con su eje mayor en posición horizontal y su tamaño coincide aproximadamente en altura con la del muro que se busca.

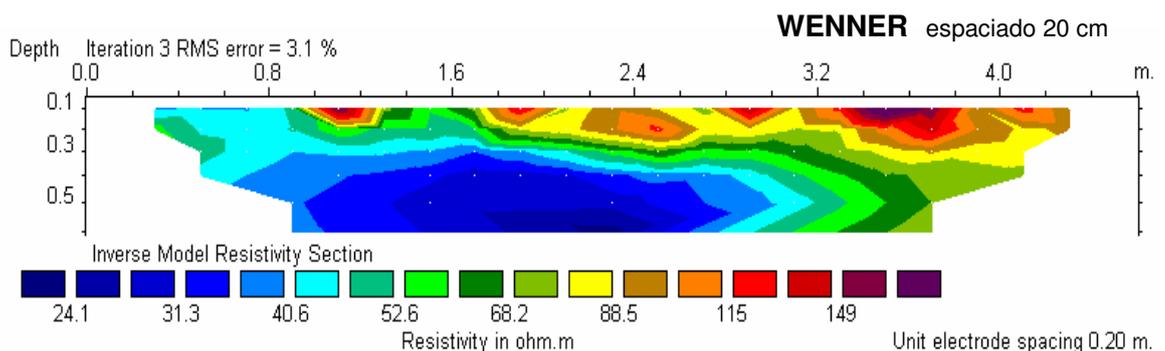
En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición de los electrodos de corriente y la posición del muro (ya conocida después de la excavación). Se puede comprobar que el muro se encuentra situado a una profundidad de 8 cm bajo los electrodos nº14 y nº15, y que el dispositivo lo ha detectado correctamente.



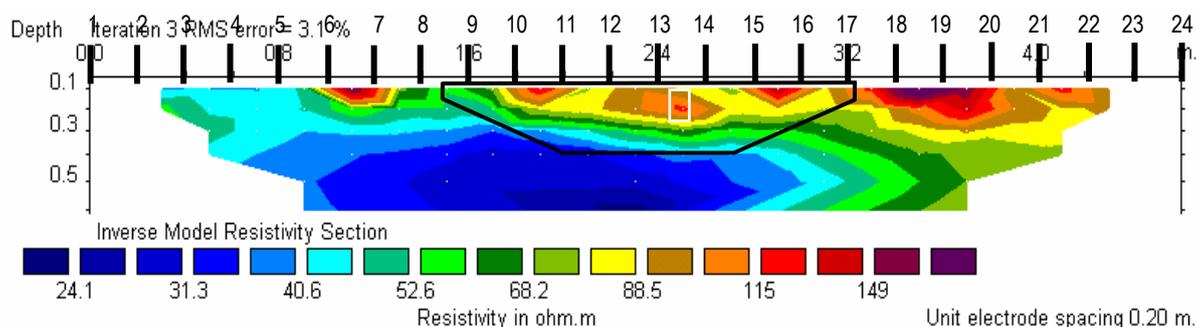
5.4.5.1.2 RESULTADOS DEL PERFIL WENNER espaciado 20 cm

En el perfil Wenner de espaciado 20 cm es muy similar al obtenido anteriormente con espaciado 10 cm. Se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos (< de 80 a 150 ohm.m) que incluye los primeros 20 cm y una banda de valores muy bajos (< de 50 ohm.m) en su base.

El perfil muestra un grupo de anomalías positivas superficiales que concentran los mayores valores de resistividad, pero la mayor parte de ellos se deben a un mal contacto entre el electrodo y el terreno, al igual que ocurre en el perfil anterior.



En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del muro, de los electrodos y de la silueta del perfil de espaciado 10 cm. Se puede comprobar que las tres anomalías centrales son exactamente las que aparecen en el perfil anterior, pero que aparecen algo más difusas debido al aumento en la distancia de espaciado. El muro está situado en esta ocasión entre los electrodos nº13 y nº14, a 8 cm de profundidad.



Conclusiones

El dispositivo Wenner detecta correctamente la presencia de un antiguo muro de diámetro medio 10 cm enterrado a una profundidad de 8 cm. Utilizando un espaciado entre electrodos de 20 cm ($D_{el}/D_h=2/1$) el resultado es confuso, pero si dicha distancia interelectródica se reduce a 10 cm ($D_{el}/D_h=1/1$) el resultado es bueno. La posición del muro coincide con el lugar de la anomalía positiva de resistividad, de forma ovalada, y su altura es la dimensión de su eje menor.

5.4.5.2 PEQUEÑO MURO DE LADRILLO ENTERRADO – Dispositivo Dipolo-dipolo

Se han diseñado 2 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo. El primero combinará 24 electrodos con una separación de electrodos de 10 cm ($D_{el}=10\text{cm}$) que tomará 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad. El segundo también combinará 24 electrodos pero con una separación de electrodos de 20 cm ($D_{el}=20\text{cm}$) y una adquisición de 153 datos repartidos en 9 niveles de profundidad.

Para el primer perfil el ratio D_{el}/D_h será aproximadamente 1/1 es decir, la separación interelectródica es similar al diámetro del hueco. Para el segundo perfil el ratio D_{el}/D_h será 2/1, es decir, que la distancia entre electrodos es el doble del diámetro del objeto a detectar (20/10)

Profundidades alcanzadas

El primer perfil, con separación interelectródica 10 cm alcanzará una profundidad de 0,30 m, el segundo perfil con separación de 20 cm profundizará hasta 0,50 m.

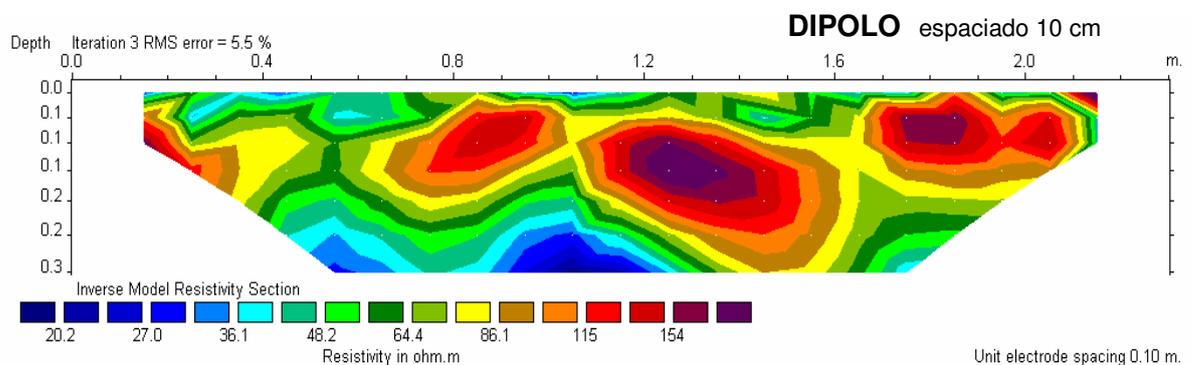
Materiales

El perfil del terreno se compone de un nivel superficial de humus y materia orgánica apoyado sobre un terreno arcilloso. El muro queda encajado en el nivel superficial de humus. Se espera un perfil que presente una anomalía superficial de mayor resistividad que la capa de humus y materia orgánica. La respuesta eléctrica del nivel inferior de arcilla se prevé de baja resistividad debido a la alta humedad del terreno.



5.4.5.2.1 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 10 cm

En el perfil Dipolo-dipolo de espaciado 10 cm se observan tres anomalías positivas muy claras. La anomalía más importante se tiene unos valores de resistividad de 154 ohm.m, y se sitúa a distancia 1,25 m y profundidad 10 cm.

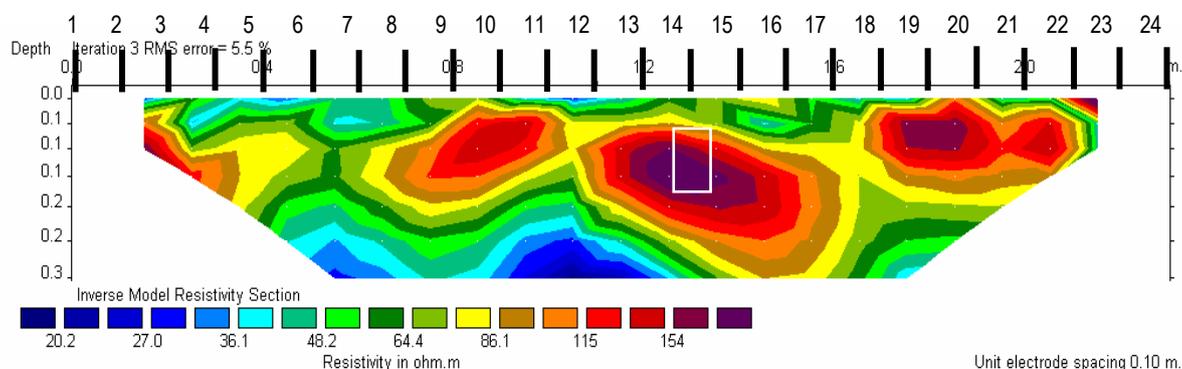


Las anomalías laterales situadas bajo los electrodos nº9 y nº10 y electrodos nº19 y nº20 coinciden con las vistas en el perfil Wenner de espaciado 10 cm. A diferencia de ese perfil, en esta ocasión se han clavado adecuadamente los electrodos en el terreno

para que tuvieran buen contacto eléctrico y ha desaparecido la perturbación generada por ese defecto. Se comprueba aquí que la anomalía más importante es la del centro, situada bajo el electrodo nº14, de forma ovalada con su eje mayor en posición inclinada y su tamaño coincide aproximadamente el tamaño del muro que se busca.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición de los electrodos de corriente y la posición del muro (ya conocida después de la excavación). Se puede comprobar que el muro se encuentra situado a una profundidad de 8 cm bajo el electrodo nº14, y que el dispositivo lo ha detectado correctamente.

El ratio $D_{el}/D_h = 1/1$ se presenta como muy adecuado para la detección de antiguos muros enterrados, proporcionando uno resultado que podría ser clasificado como de muy óptimo.



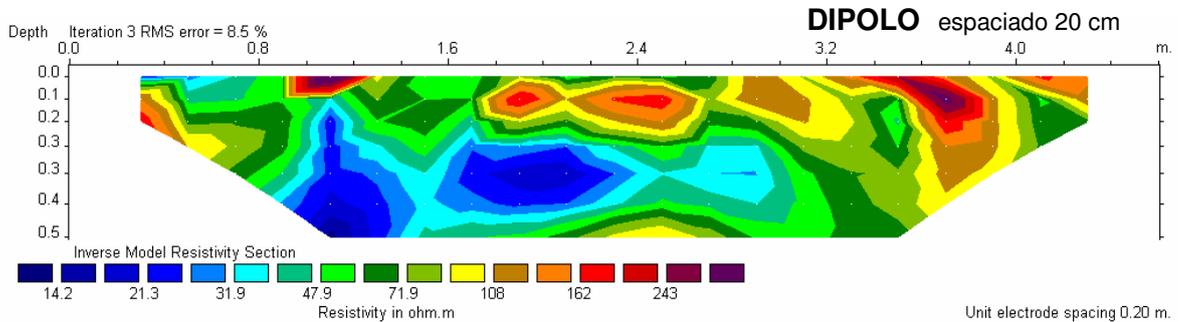
5.4.5.1.2 RESULTADOS DEL PERFIL DIPOLO-DIPOLO espaciado 20 cm

El perfil Dipolo-dipolo de espaciado 20 cm presenta un aspecto general heterogéneo, pero a grandes rasgos tiene una distribución de resistividades similar a las vistas en el perfil anterior de espaciado 10 cm. Se observan dos franjas de resistividad diferente, una superficial de valores bajos-medios (< de 80 a 200 ohm.m) que incluye los primeros 20 cm y una banda de valores muy bajos (< de 50 ohm.m) en su base.

El perfil muestra un grupo de anomalías positivas superficiales que concentran los mayores valores de resistividad, pero las anomalías situadas bajo los electrodos nº6 y nº7 y electrodos nº18 y nº19 aparecen exageradas ya que su origen no se debe a objetos enterrados, sino que se deben a un mal contacto entre el electrodo y el terreno, al igual que ocurre en el perfil anterior.

En la figura adjunta se ha señalado sobre el perfil la posición del muro, de los electrodos y de la silueta del perfil de espaciado 10 cm. Se puede comprobar que las tres anomalías centrales son exactamente las que aparecen en el perfil anterior, pero que aparecen algo más difusas debido al aumento de 10 a 20 cm en la distancia de

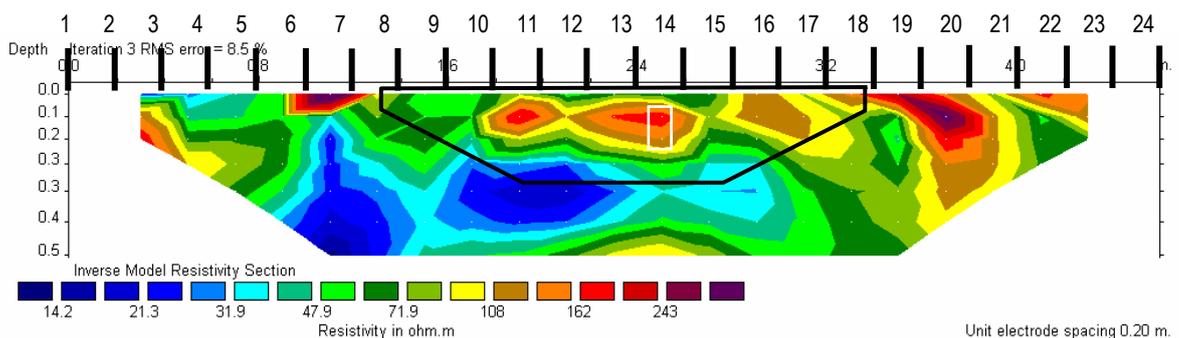
espaciado. El muro enterrado se encuentra a 8 cm de profundidad entre los electrodos nº13 y nº14.



El ratio $D_{el}/D_h=1$ que se ensaya en este primer trabajo se presenta como adecuado para la detección de huecos rellenos de aire, proporcionando un resultado que podría ser clasificado de óptimo.

Conclusiones

El dispositivo Dipolo-dipolo detecta correctamente la presencia de un antiguo muro de diámetro medio 10 cm enterrado a una profundidad de 8 cm. Utilizando un espaciado entre electrodos de 20 cm ($D_{el}/D_h=2/1$) el resultado es confuso, ya que no proporciona imágenes que permitan diferenciar la anomalía inducida por el muro de otras anomalías no relacionadas. Si dicha distancia interelectródica se reduce a 10 cm ($D_{el}/D_h=1/1$) el resultado es bueno. La posición del muro coincide con el lugar de la anomalía positiva de resistividad, de forma ovalada, y su altura es la dimensión de su eje menor.



5.4.6 TRABAJO 4: BÚSQUEDA DE TÚNELES Y GALERÍAS MINERAS EN MINA GALLARTA (Vizcaya)

En los trabajos anteriores se ha visto que el método es útil en aplicaciones sobre huecos a escasa profundidad. Se procede ahora a comprobar la utilidad del método sobre un caso real a mayor escala. Para llevarlo a cabo se ha escogido un antiguo túnel minero en mina Gallarta. Desde la superficie se pretende detectar una galería minera cuyas dimensiones son 3 m de ancho por 4 m de alto, y que se encuentra a una profundidad de entre 8 y 10 m. El diámetro medio del hueco será $D_h = (4+3)/2 = 3,5$ m. $D_{el} = 5$ m. $D_h = 3,5$ m. $D_{el}/D_h = 5/3,5$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 9$ m, por lo que $P = 2,5D_h$.

Profundidades alcanzadas

Para este trabajo se empleará el equipo SYSCAL R1 Switch72, más potente que el hasta ahora utilizado SYSCAL KID Switch24 ya que permite combinar hasta 72 electrodos y tomar más de 1500 medidas. Además se utilizará el dispositivo Schlumberger-Wenner, que permite adquisiciones con mayor densidad de datos para cada nivel de profundización, lo que repercute en un aumento en la resolución de los perfiles con respecto al dispositivo Wenner. Se ha diseñado un único perfil de longitud 175 m, utilizando 36 electrodos separados 5 m.

Materiales

El perfil presenta una cierta homogeneidad en cuanto a distribución y relleno de los materiales ya que consta de cuatro tipos de materiales. Un material infrayacente en la base con valores de resistividad mayores de 300 ohm.m (color verdoso a ocre en este perfil), que corresponden a los materiales que forman el substrato rocoso. La morfología de esta unidad se presenta un tanto distorsionada en este perfil debido a la presencia de una anomalía verticalizada con un valor resistivo en la parte central. Esta anomalía es generada por la presencia del antiguo túnel objeto de este trabajo.

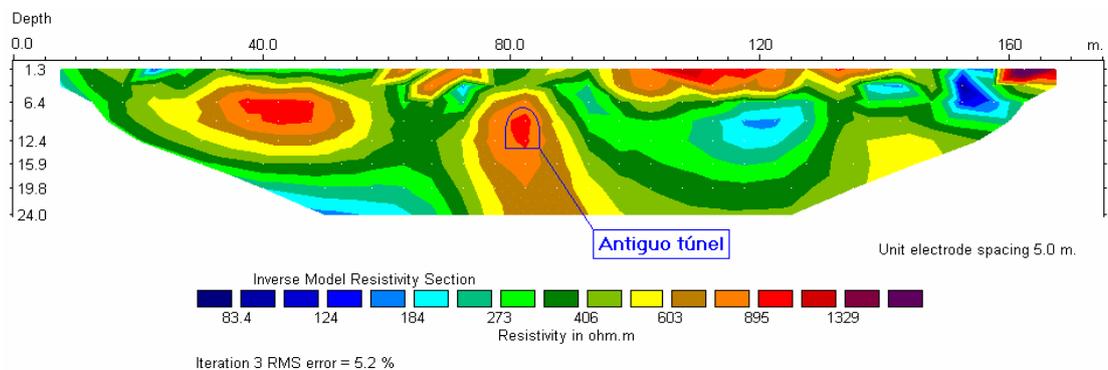
Por encima de este nivel rocoso se sitúa otro material, más conductor, que presenta una variación de valores de resistividad desde cercanos a 100 ohm.m hasta 200 ohm.m (colores azules y verdosos) lo cual indica que podría corresponder a una masa piedra machacada mezclada con tierras arcillosas (denominado todo-uno).

Por encima de estos materiales se encuentran, con un desarrollo irregular en extensión y espesores, los depósitos que se han atribuido a piedras y bloques sueltos, sin cohesión. Estos depósitos son más abundantes (espesores cercanos a los 6 m) hacia la parte derecha del perfil y disminuyen de espesor hacia la izquierda del mismo.

Resultados

En el centro del perfil, a distancia 80 m y profundidad 8 ó 9 m se observa una anomalía positiva muy clara, con forma circular o ligeramente ovalada con su eje mayor en posición vertical. Los valores altos de resistividad de su perímetro se solapan con los valores del sustrato profundo, también resistivo, tomando un aspecto de domo alargado procedente del muro.

En la figura adjunta se ha señalado la posición de la galería, y se comprueba que la anomalía coincide perfectamente con dicha posición. Se ha conseguido, por lo tanto, localizar la galería minera abandonada con gran precisión. Del análisis del perfil obtenido se estima que la galería está a una profundidad de entre 9 m (la clave) y 12 m (la solera). La sección que se deduce del perfil es de 4 por 4 m.



Conclusiones

Se observa que con una sección menor a la separación interelectródica ($D_{el}/D_h = 1,4$) y situada a una profundidad mayor ($P = 2,5D_h$) que la propia de la sección se ha podido detectar esta cavidad (rellena de aire) utilizando un dispositivo mixto Schlumberger-Wenner.

Sin embargo, los valores de resistividad de esta cavidad, aun siendo altos ($>$ de 1.300 ohm.m) no son muy elevados, debido a que el tamaño del hueco (menor a la separación entre electrodos) y la profundidad (más del doble del diámetro del hueco) aminoran los efectos que el hueco puede tener sobre las líneas corriente eléctrica y sus superficies equipotenciales.

El dispositivo Schlumberger-Wenner detecta correctamente la presencia de una galería de diámetro medio 4 m enterrado a una profundidad de 9 m (distancia de la clave a la superficie). Utilizando un espaciado entre electrodos de 5 m ($D_{el}/D_h = 5/3,5$) el resultado es bueno, si bien la imagen tiene un aspecto algo difuso ya que dicho ratio D_{el}/D_h no es el espaciado óptimo. Aun así, los resultados son aceptables ya que las imágenes proporcionadas permiten identificar la anomalía inducida por el hueco y diferenciarla de otras anomalías no relacionadas.

5.4.7 TRABAJO 5: BÚSQUEDA DE POSIBLES HUECOS BAJO EL TRAZADO DE UNA CARRETERA EN COMILLAS (Cantabria)

Se da en este trabajo un paso más hacia el camino de la comprensión de la tomografía eléctrica como herramienta útil en la detección y caracterización de huecos y, más concretamente, en su aplicación al yacimiento arqueológico de Colonia Clunia Sulpicia (capítulo 6), ya que el medio y el objetivo son muy similares a los que allí se encontrarán.

En este trabajo se tiene como objetivo la localización de cavidades naturales en un terreno calizo karstificado, exactamente el mismo tipo de formaciones que se pretenden detectar en el subsuelo de la ciudad romana.

5.4.7.1. TRABAJO 5.1 DOLINA EN CARRETERA COMILLAS (Cantabria)

Se ha detectado un hundimiento por colapso de una cavidad en las inmediaciones de una carretera en el término municipal de Comillas y mediante un perfil longitudinal a la misma se pretende determinar si existen otras cavidades en el subsuelo que puedan poner en peligro el funcionamiento de la obra.

Como referencia en la interpretación y calibración del método se conoce la existencia de una dolina próxima a la carretera. La dolina se generó por un antiguo hundimiento y actualmente se encuentra rellena por arcilla hasta su colmatación.

Profundidades alcanzadas

Se ha diseñado un único perfil de longitud 355 m, en el que se combinan 72 electrodos separados 5 m, lo que consigue una profundidad de 52,4 metros. Este perfil está realizado con dirección E-O y al sur de la carretera con el fin de ver si existen o no evidencias de desarrollo de anomalías o de huecos en ese sector.

Materiales

Los materiales analizados en este perfil presentan una tendencia de relleno subhorizontal y con una continuidad lateral importante lo cual es indicativo de materiales que no indican inestabilidades manifiestas. Se presentan agrupados en tres capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión localizada a la derecha del perfil, geoelectricamente resistiva, atribuible a una alternancia de niveles de calizas y niveles de margas presentes en los afloramientos rocosos cercanos a la casa vecina a la curva.

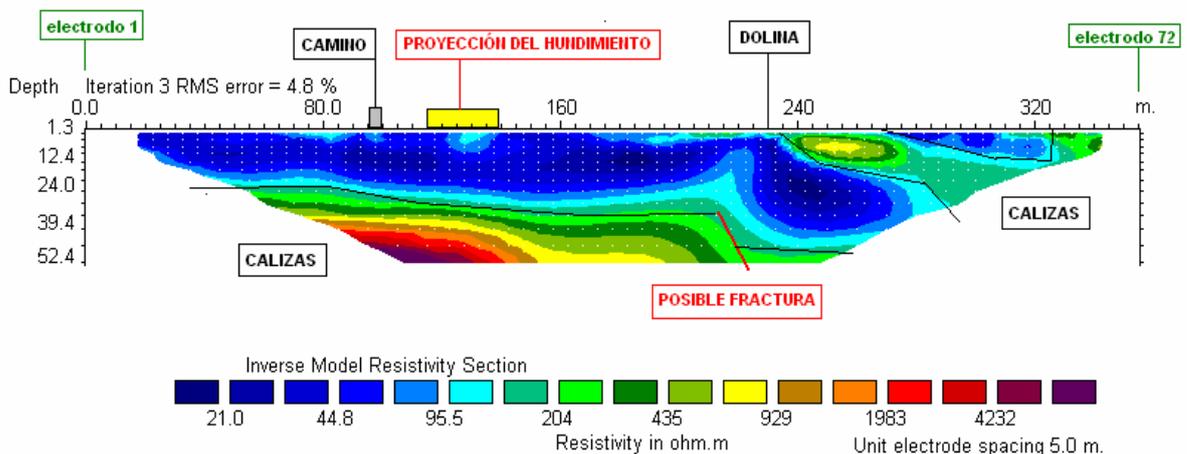
Una segunda capa, geoelectricamente conductora, atribuible a materiales de naturaleza fundamentalmente arcillosa y margosa.

Una tercera capa, la capa inferior, de características geoelectricas resistivas, correspondería a una capa atribuible a calizas compactas que va inclinando su tendencia hacia la derecha de la figura. Estas capas corresponden a los materiales rocosos propios de la zona de estudio, es decir, la alternancia de tramos de calizas y margas.

Resultados

Se ve como en el lugar donde aflora la dolina, a distancia 240 m, aparece una pequeña anomalía positiva con forma tabular y valores de 430 ohm.m a 920 ohm.m. También en ese lugar el nivel de baja resistividad (< de 95 ohm.m) compuesto por arcillas se deforma ocupando y rellenando mayores profundidades. El perímetro de esa anomalía marca la forma interna de la cavidad que está rellena de arcilla, y a techo el nivel resistivo tabular es el techo de esa caverna. Las dimensiones de esa cavidad son 40 m de largo por 25 m de alto y se sitúa a una profundidad de 12 m.

Al ser las calizas el material más rígido, es ahí donde se manifiestan las fracturas, como así puede verse, aunque de forma relativamente poco acusada. Sólo hay una manifestación de un tramo marcado por la inestabilidad y es a la altura de la dolina.



Conclusiones

El dispositivo Schlumberger-Wenner ha detectado bien la presencia de una gran cavidad rellena de arcilla en terrenos calizos, si bien no se conoce realmente si las dimensiones deducidas a partir de los datos obtenidos son las reales. Por la

experiencia hasta ahora acumulada cabe suponer que 40 x 25 m es una buena aproximación. El diámetro medio del hueco será $D_h = (40+25)/2 = 32,5$ m. $D_{el} = 5$ m. $D_h = 32,5$ m. $D_{el}/D_h = 5/32,5$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 12$ m, por lo que $P = 0,37D_h$ (12/32,5)

El perfil no ha conseguido profundizar lo suficiente como para saber la respuesta geoelectrica de las calizas que hay por debajo del estrato arcilloso-margoso, ya que se esperaba encontrar un espesor de recubrimiento mucho menor. Por ello no se ha detectado la posible existencia de huecos en el sustrato infrayacente de caliza. Tampoco se han detectado huecos a la altura del hundimiento reciente, probablemente porque dichas cavidades no se encuentran bajo la traza del perfil.

Por el contrario sí ha sido posible localizar una dolina cuya abertura en superficie es visible y que se agranda en profundidad. Se puede determinar con claridad que dicha cavidad se encuentra rellena de arcilla.

5.4.7.2. TRABAJO 5.2 HUNDIMIENTO EN COMILLAS

En esta ocasión la traza del perfil cruza sobre la carretera en la zona exacta del hundimiento, colocando a éste justo centrado en el perfil. El colapso del techo de una cavidad ha producido un cráter en superficie de 3 m de diámetro. Se trata por tanto de un hueco relleno de arcilla y se pretende determinar si existen otras cavidades en el subsuelo.

Para la interpretación y calibración del método se utilizará como referencia la anomalía que presente el perfil en la zona del hundimiento.

Profundidades alcanzadas

Se ha diseñado un único perfil de longitud 355 m, en el que se combinan 72 electrodos separados 5 m, lo que consigue una profundidad de 52,4 metros. Este perfil está realizado con dirección E-O y al sur de la carretera con el fin de ver si existen o no evidencias de desarrollo de anomalías o de huecos en ese sector.

Materiales

Los materiales analizados en este perfil presentan una tendencia de relleno subhorizontal y con una relativa continuidad lateral. Se presentan agrupados en tres capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión muy localizada a la derecha del perfil, geoelectricamente resistiva, atribuible a una alternancia de niveles de calizas y margas

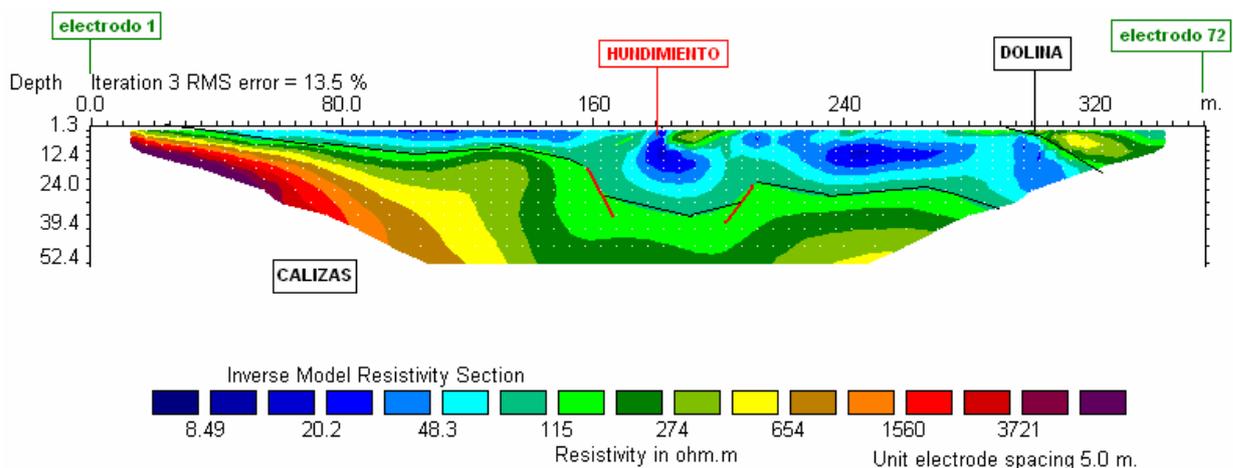
que se presenta en forma de afloramientos rocosos y son predominantes entre los electrodos nº60 y nº72, a distancia 320 m.

Una segunda capa, geoelectricamente conductora, atribuible a materiales de naturaleza fundamentalmente arcillosa y margosa.

Una tercera capa, la capa inferior, de características geoelectricas resistivas, correspondería a una capa atribuible a calizas compactas que va inclinando su tendencia hacia la derecha del perfil. Estas capas corresponden a los materiales rocosos propios de la zona de estudio, es decir, la alternancia de tramos de calizas y margas. Además hay materiales correspondientes al relleno del valle mediante tongadas que, al tener una naturaleza predominantemente arcillosa, su respuesta en la tomografía eléctrica es difícilmente separable de la correspondiente a los materiales margosos sobre los que se apoya. Tienen un carácter geoelectrico conductor salvo las capas correspondientes a tongadas con bolos y bloques mezclados con arcilla que dan una respuesta más resistiva.

Resultados

Se ve como en el lugar del hundimiento, a distancia 180 m, aparece una anomalía negativa con forma circular y valores de resistividad muy bajos (< de 48 ohm.m) debido al comportamiento conductor de la arcilla que rellena el hueco que ha colapsado. El perímetro de esa anomalía marca la forma interna de la cavidad que ahora aparece rellena de arcilla, y se le pueden atribuir unas dimensiones internas de 15 m de largo por 9 m de alto y su bóveda situada a 9 m de profundidad.



Al ser las calizas el material más rígido, ahí es donde se pueden manifestar mejor las fracturas, como así puede verse justo a la altura de la zona que ha sufrido el hundimiento lo cual podría efectivamente interpretarse como un colapso de una cavidad presente en las calizas localizadas por debajo. Estos hundimientos parecen

estar ya estabilizadas puesto que no se observan señales atribuibles a nuevos huecos importantes por debajo de superficie.

Conclusiones

El dispositivo Schlumberger-Wenner ha detectado bien la presencia de una cavidad rellena de arcilla en terrenos calizos. No se conoce realmente si las dimensiones deducidas a partir de los datos obtenidos son las reales ya que habría que contrastarlo con sondeos o con otro método geofísico, pero por la experiencia hasta ahora acumulada cabe suponer que 15x9 m es una buena aproximación.

El diámetro medio del hueco será $D_h = (15+9)/2 = 12$ m. $D_{el} = 5$ m. $D_h = 12$ m. $D_{el}/D_h = 5/12$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 9$ m, por lo que $P = 0,75D_h$ (9/12)

Si existieran cavidades con un desarrollo importante se observarían niveles con altos valores de resistividad, lo cual indicaría la susceptibilidad a un posible hundimiento dado que existen huecos bajo superficie y bajo el colapso observable en superficie.

5.4.8 TRABAJO 6: LOCALIZACIÓN DE CANALIZACIONES METÁLICAS

Este trabajo sirve para conocer la respuesta eléctrica de una tubería metálica de gran diámetro a profundidad considerable. En la experiencia 5 del apartado 5.3.7 se pudo ver como un tubo metálico enterrado induce en el perfil de tomografía una respuesta eléctrica negativa que, para el caso del dispositivo Wenner, presentaba un solape en su respuesta eléctrica con la del nivel arcilloso inferior, que se traducía en una anomalía negativa con forma de domo o joroba.

Este trabajo pretende determinar la posición de dos conducciones metálicas que se encuentran bajo una zona ajardinada en las proximidades de un aparcamiento, pero cuya posición exacta es desconocida.

Profundidades alcanzadas

Se ha diseñado un único perfil de longitud 175 m, en el que se combinan 36 electrodos separados 5 m, lo que consigue una profundidad máxima de 24 metros.

Materiales

Los materiales que aparecen en este perfil presentan una tendencia de relleno bastante horizontalizada y con una continuidad lateral importante. Se presentan agrupados en tres capas que son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial atribuible a materiales de relleno procedentes de vertidos mezclados con materiales terrosos del ajardinamiento, con extensión a lo largo de todo el perfil. Una segunda capa de materiales de naturaleza fundamentalmente arcillosa que se supone tendrá un comportamiento geoelectricamente conductor, y una tercera capa, la capa inferior, correspondiente a una capa de arenas compactadas cuyo comportamiento geoelectrico se prevé resistivo.

Resultados obtenidos

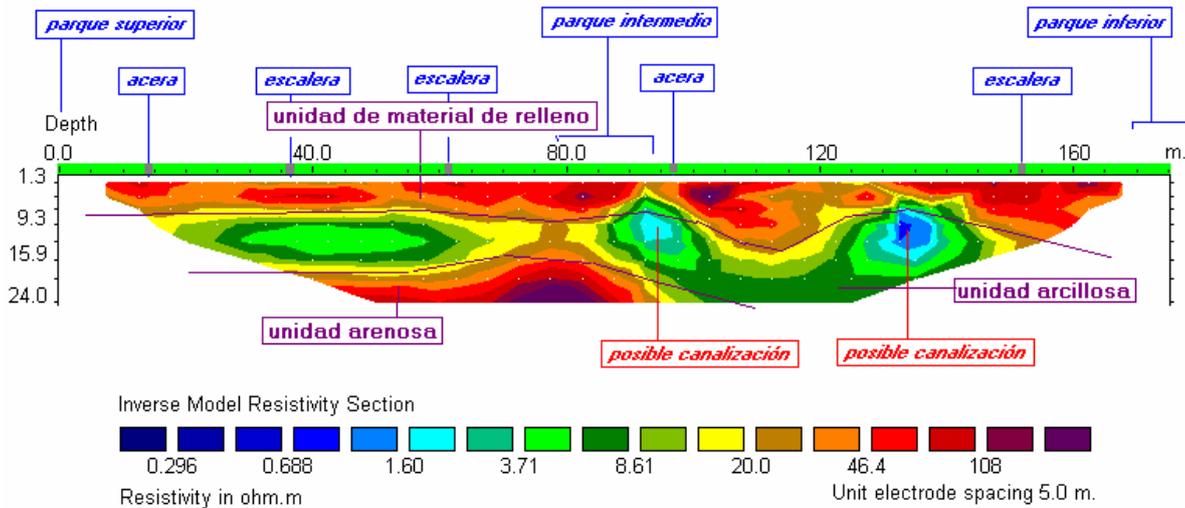
La capa superficial es geoelectricamente muy resistiva cuyo contacto con la capa infrayacente es variable, y que en general se sitúa en torno a 6 m de profundidad aunque en algunos sectores del perfil llega a alcanzar los 12 m de profundidad.

La capa más profunda presenta en el metro 75 desde el inicio del perfil se identifica un pequeño sector con valores altos de resistividad que indicarían materiales probablemente correspondientes a arenas muy limpias, con ausencia de arcilla o agua.

El nivel intermedio contiene valores de resistividad extremadamente bajos localizados en dos anomalías circulares que son, con toda seguridad, originadas por la existencia del material metálico de las canalizaciones que se pretende localizar. Dichas anomalías se sitúan a la distancia 95 m y 135 m desde el inicio del perfil, y a una profundidad de 7,5 m. El diámetro de las tuberías metálicas que se deduce de este perfil es de 2 m. El contacto de esta capa arcillosa con la capa infrayacente varía entre 18 y más de 24 m.

Conclusiones

El dispositivo Schlumberger-Wenner ha detectado bien la presencia de tuberías metálicas de diámetro 2 m enterradas en un terreno arcilloso a 7,5 m de profundidad (distancia de la cresta a la superficie). Utilizando un espaciado entre electrodos de 5 m ($D_e/D_h = 5/2$) el resultado es muy bueno para este caso de un hueco conductor. $P = 7,5m$, por lo que $P = 3,75D_h$.



5.4.9 TRABAJO 7: DETERMINACIÓN DE ESPESORES Y FRACTURAS

Se pretende con estos trabajos conocer la posibilidad de detectar variaciones de espesor en las capas así como de localización de fracturas. Ambas cuestiones servirán como antecedentes propios para hacer frente a la parte de esta investigación aplicada al yacimiento arqueológico de Colonia Clunia Sulpicia (capítulo 6), donde la determinación de espesores y fracturas tiene una importancia primordial.

Para ello se han realizado dos trabajos, uno aplicado a la determinación de espesores de material de relleno y otro para la localización de fracturas en granitos.

5.4.9.1 TRABAJO 7.1 DETERMINACIÓN DE ESPESORES

Se realizó un perfil de gran detalle en una zona costera sobre materiales de relleno antrópico que se depositaron para nivelar y elevar la cota del terreno natural. Para contrastar los resultados del perfil con datos verídicos se realizaron tres catas que confirmaron posteriormente los resultados deducidos.

Profundidades alcanzadas

Se ha diseñado un único perfil de longitud 37,6 m, en el que se combinan 48 electrodos separados 0,8 m, lo que consigue una profundidad máxima de 24 metros.

Materiales

Presenta una gran homogeneidad en cuanto a la tendencia de relleno de los materiales ya que consta, a primera vista, de tres capas diferenciadas:

Una capa superior conductora, correspondiente a los materiales de precarga, relativamente homogénea. El contacto con la capa infrayacente (lo que podría considerarse como el espesor) varía entre 1.0 y 1.3 m, de norte a sur (de derecha a izquierda en el perfil).

Una capa intermedia resistiva, correspondiente a la capa de bloques de dolomía. El contacto con el terreno natural que varía entre 1.75 m al norte y 2.5 m al sur.

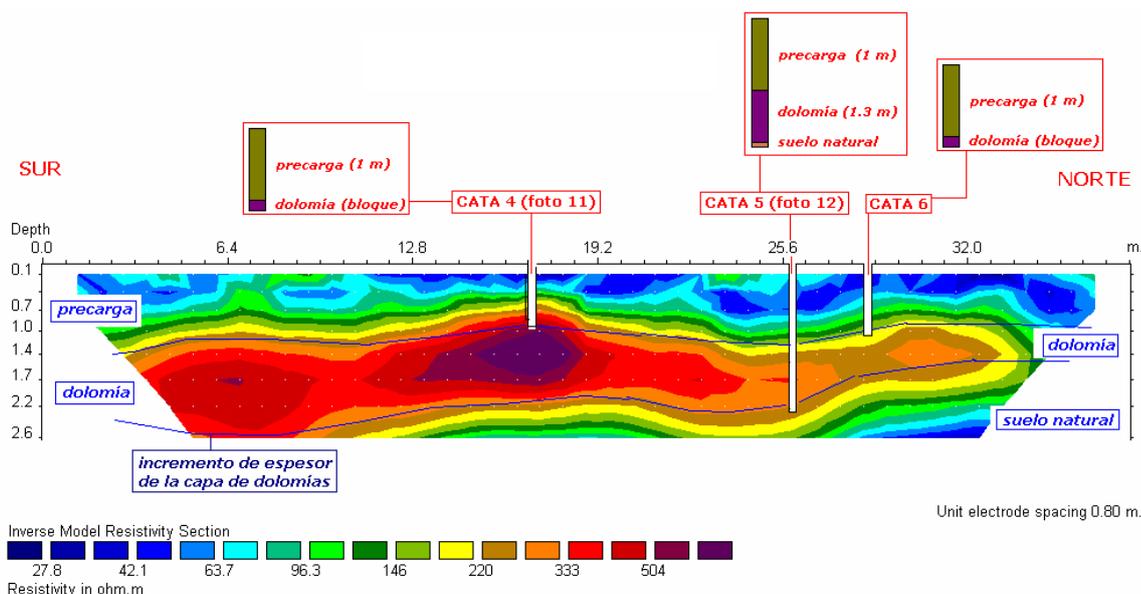
Una capa inferior, correspondiente al terreno natural, con tendencia a conductora hacia mayor profundidad, y cuya superficie está inclinada 3-4º hacia el sur.

Catas

Se realizaron tres catas en este perfil que se denominan cata 4, cata 5 y cata 6, en las que se alcanzó el techo de la capa de dolomías a 1 m de profundidad, por debajo de una capa de material de precarga muy arcilloso. La base de las mismas sólo se pudo identificar en la cata 5 ya que en las catas 4 y 6 no fue posible eliminar los bloques de dolomía por su gran tamaño. La localización de esos contactos en el perfil coincidieron con el mismo valor de resistividad en ambos puntos lo que refuerza las interpretaciones realizadas.

Resultados obtenidos

Se aprecia un incremento de espesor del material de relleno (precarga+bloques dolomía) hacia el sur (hacia el inicio del perfil). Al norte, a distancia 32 m se localiza la zona de menor recubrimiento, ya que se distingue una capa superior de material de precarga de 1 m de espesor sobre una capa de 0.8 m de bloques dolomíticos, lo que totaliza 1.8 m de espesor de relleno por debajo de la superficie.



5.4.9.2 TRABAJO 7.2 DETERMINACIÓN DE ESPESORES Y FRACTURAS

En este trabajo se combina la determinación de ambas formas, tanto espesores como fracturas. Al tratarse de un área de granitos existe gran contraste de resistividad entre el jabre de alteración que recubre la roca sana y la altísima resistividad del granito no alterado. La situación es similar a la que se presenta en el yacimiento arqueológico de Clunia, donde existe un recubrimiento compuesto por arcilla y escombros sobre la roca caliza. También comparte este trabajo con Clunia el aspecto

de las fracturas, ya que en la ciudad romana la evolución del karst y su sistema de galerías está condicionado por el sistema de fracturas.

Profundidades alcanzadas

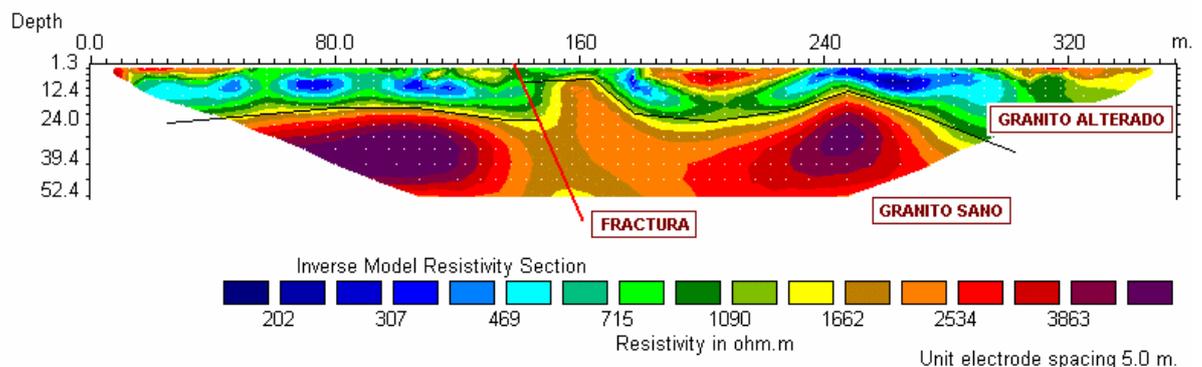
Se ha diseñado un único perfil de longitud 355 m, en el que se combinan 72 electrodos separados 5 m, lo que consigue una profundidad máxima de 52,4 metros. Se empleará un dispositivo Schlumberger-Wenner.

Materiales

La unidad profunda de granito sano, con altos valores de resistividad, presenta una extensión que ocupa prácticamente todo el perfil por debajo de los 15-20 m de profundidad. Por encima se encuentra una estrecha banda de granitos alterados de espesor variable.

Resultados obtenidos

Se aprecia la existencia de una fractura que trunca la tendencia homogénea de la importante masa de granito sano, dividiéndolo en dos bloques. Esta fractura se localiza a 140 m (electrodo 29) desde el inicio del perfil y presenta un escaso desarrollo lateral por lo que se puede considerar una fractura bastante neta. La orientación de la fractura es hacia el norte, con un buzamiento cercano a los 70°.



Conclusiones

Se ha comprobado que el dispositivo Schlumberger-Wenner detecta con gran eficacia variaciones en el espesor de recubrimiento de rocas sólidas, ya sea relleno artificial o manto de alteración natural.

También se ha visto que mediante perfiles de tomografía eléctrica es posible determinar la presencia y orientación de fracturas con gran precisión.

5.4.10 TRABAJO 8: CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN COMPLEJO DE GALERÍAS MINERAS A DISTINTAS PROFUNDIDADES: LA ARBOLEDA (Vizcaya)

Se realizó una campaña de prospección geofísica en las proximidades de la localidad de La Arboleda (provincia de Vizcaya) Se trata de un terreno perteneciente a una antigua explotación minera y que tiene en el subsuelo un entramado de galerías de pequeña sección y situación desconocida. La función de estas galerías era recoger y canalizar el agua de drenaje y el procedente de los lavaderos próximos para así evacuarla del área de movimiento de tierras y estériles. Muchas de esas galerías quedaron cubiertas durante la explotación de la mina por escombreras y rellenos de tierras.

El propósito del presente trabajo es la identificación de esas galerías y, en la medida de lo posible, definir el estado en que se encuentran.

Metodología de trabajo realizado en La Arboleda

Los resultados de los perfiles pueden variar mucho dependiendo de la relación existente entre profundidad de investigación y poder de resolución. Como ya se ha visto en la experiencia 4 del apartado 5.3.6, con el aumento de la profundidad disminuye la resolución de los perfiles, razón por la cual hubo que hacer un trabajo de procesado casi en tiempo real de los datos para ir diseñando el dispositivo de medida de acuerdo con las anomalías que se iban identificando en el subsuelo.

El trabajo desarrollado ha consistido en realizar una serie de perfiles de tomografía eléctrica con configuraciones y dispositivos diferentes para obtener la mejor relación entre resolución y profundidad de investigación.

En las experiencias sobre modelos reducidos del subcapítulo 5.3 se pudo concluir que el dispositivo Dipolo-dipolo resulta más adecuado para la localización de cavidades, especialmente si tienen un comportamiento conductor (relleno de agua o arcilla). En este trabajo se medirán perfiles con dos dispositivos, Dipolo-dipolo y Schlumberger-Wenner.

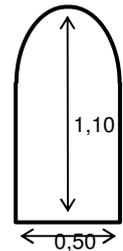
La utilización de ambos dispositivos proporcionará nueva información a la ya existente respecto de las diferencias de resolución de ambos dispositivos cuando se aplican a la detección de huecos y servirá para avanzar en el conocimiento que se tiene acerca de la interpretación de imágenes obtenidas con dispositivos distintos. Por otro lado en ocasiones se empleará únicamente el dispositivo Schlumberger-Wenner, debido a la necesidad de alcanzar grandes profundidades en el terreno manteniendo un espaciado interelectrónico pequeño (< de 1 m). El dispositivo Dipolo-dipolo profundiza menos en el subsuelo por lo que, manteniendo la separación de electrodos, se cambió en ocasiones al otro dispositivo para profundizar más.

Materiales presentes en la zona de estudio

Los materiales caracterizados por una baja resistividad (valor de resistividad comprendida entre 10 y 100 ohm.m) son materiales de naturaleza predominantemente arcillosa (suelos arcillosos naturales producto de la descalcificación de las calizas) y fangosa (materiales resultantes de los lavados de mineral). En este caso se trata de los finos que se disponen por encima de las calizas. También corresponden a este tipo de materiales menos resistivos los sectores en los que se emplaza la canalización cuando ésta está con relleno de agua (con más o menos finos).

Los materiales caracterizados por una alta resistividad (valor de resistividad comprendida entre 100 y 800 ohm.m) son materiales que corresponden a los tramos de calizas, calcarenitas y areniscas compactas, las rocas más compactas que afloran en la zona estudiada y que forman el substrato sobre el que se asientan las galerías. También se identifican en las partes altas y medias de algunos perfiles, unos valores locales de resistividad alta que corresponderían a materiales de relleno (bloques, maderas, etc.)

Las galerías buscadas tienen en general dimensiones de 1,1 m x 0,5 m, si bien en ciertas ocasiones la altura alcanza hasta 1,6 m.



El diámetro medio del hueco será para la mayoría de los casos $D_h = (1,1+0,5)/2 = 0,8$ m.

A continuación se detallan los trabajos realizados.

5.4.10.1 TRABAJO 8.1 Perfil GOLF - 1

Se presenta aquí un primer trabajo realizado sobre una galería bien localizada con la intención de conocer la respuesta eléctrica de las galerías superficiales rellenas de aire, para así calibrar los resultados y optimizar la interpretación de las imágenes obtenidas en los perfiles.

Características del perfil

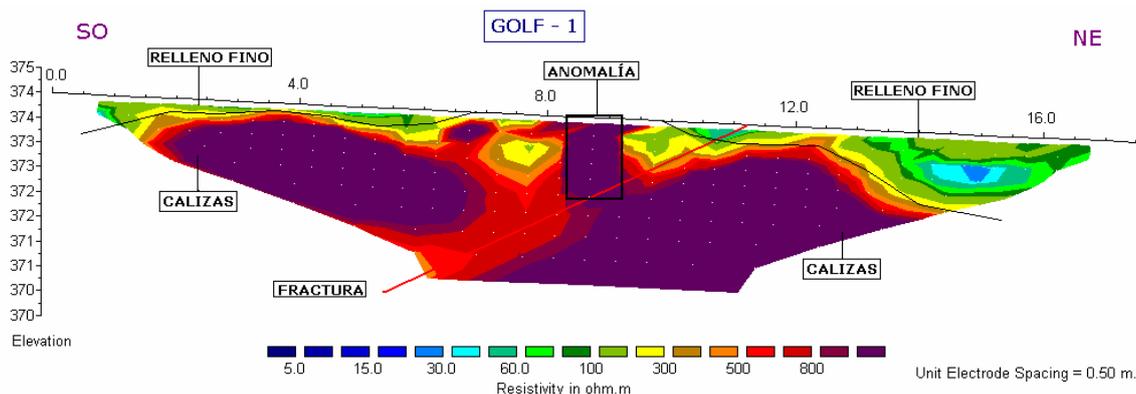
Longitud: 17.5 m. 36 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 4,5 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, aunque con un mayor desarrollo hacia el extremo final del perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que varía en torno a 1 m.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería. La atribución a calizas se debe a la generalización del término, pudiendo tratarse de calcarenitas y areniscas compactas.



Resultados

Se ha realizado una corrección topográfica ya que el terreno tiene cierta pendiente. En la parte central del perfil hay una anomalía muy resistiva, con morfología vertical, que corresponde a la galería que se ha utilizado para la calibración de dimensiones 1,1 m x 0,5 m y que apenas tiene 20 cm de recubrimiento. Se apoya sobre la caliza en una zona donde ésta está afectada por una fractura. Se ve que en los 4,5 m estudiados ese

substrato compacto está fracturado. La alta resistividad de la anomalía relacionada con la galería en este perfil indica lo que a simple vista puede verse, que no existe relleno en la galería y que sólo contiene aire, lo cual le proporciona ese carácter marcadamente dieléctrico. El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 0,5$ m. $D_{el}/D_h = 0,5/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 0,2$ m, por lo que $P = 0,25D_h$ ($0,2/0,8$)



5.4.10.2 TRABAJO 8.2 Perfil GOLF - 2

Se presenta aquí otro trabajo realizado sobre un objetivo bien conocido con la intención de conocer la respuesta eléctrica de una galería superficial, en esta ocasión parcialmente rellena de agua, para así calibrar los resultados y optimizar la interpretación de las imágenes obtenidas en los perfiles para un hueco conductor.

Características del perfil

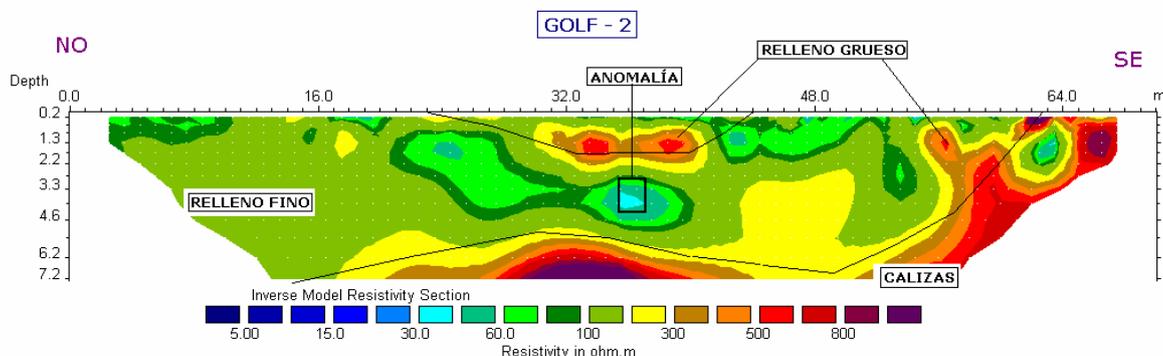
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 7,2 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, aunque con un mayor desarrollo hacia el extremo NO del perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que llega a alcanzar casi los 6 m.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería y cuya tendencia es a aflorar cerca del final del perfil (extremo SE).



Resultados

En la parte central del perfil hay una anomalía conductora, con morfología circular, que corresponde a la galería que, unos metros al SO, aflora en superficie y se observa que se dirige hacia esa posición y con esa profundidad (entre 3.5 y 4,6 m de profundidad). La baja resistividad de la anomalía indica que existe relleno de fluido con finos en la galería. De la imagen se deduce que la profundidad de la galería es 3,5 m, pero probablemente sea algo mayor puesto que los huecos conductores suelen presentar en Dipolo-dipolo una profundidad menor de la real (ver experiencias 7 y 8, apartados 5.3.9 y 5.3.10)

El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 1$ m. $D_{el}/D_h = 1/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 3,5$ m, por lo que $P = 4,4D_h$ ($3,5/0,8$)

Existe otra anomalía conductora, bajo el metro 63 desde el inicio del perfil, a una profundidad cercana a 1.5 m, cuyas características podrían permitir atribuirla a otra galería o conducción.



5.4.10.3 TRABAJO 8.3 Perfil GOLF - 3

Características del perfil

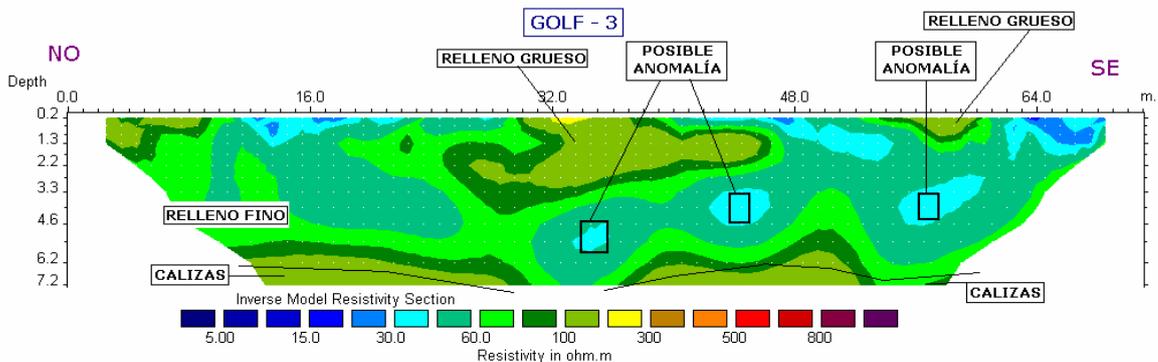
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 7,2 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que llega a alcanzar los 6 m. Las anomalías resistivas que se identifican dentro de la unidad conductora tienen una extensión localizada (entre 2 y 4 m) y se encuentran a una profundidad de 0.5 a 2 m. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.

Una segunda capa, la capa inferior, que apenas se detecta y que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería.



Resultados

Se observan tres anomalías que podrían atribuirse a galerías ya que su respuesta coincide con la que ofrece la supuesta misma galería en el perfil GOLF-2. Una de ellas está en la parte central (35 m desde el inicio del perfil) y las otras dos hacia el SE, una en el metro 45 y otra en el metro 57.

Probablemente las tres anomalías conductoras se corresponden con la misma galería pero que, al estar el perfil casi en línea con la trayectoria de la galería, quizás se trate del

reflejo de la misma en tres puntos. Esta galería sería la procedente de la parte central del perfil GOLF-2 y sería la que después se detecta en los perfiles 4, 5 y 9.

La anomalía de la parte central del perfil se encuentra a una profundidad de 5.7-7.2 m mientras que las otras dos anomalías se han identificado en un tramo de profundidades comprendido entre 3.5 y 5 m lo cual querría decir, de tratarse de la misma anomalía, que va hundiéndose desde el SE hacia el NO, como realmente sucede. Por lo que respecta a los bajos valores de resistividad de las anomalías, indican que podría existir relleno de fluido con finos en la galería. Las profundidades deducidas podrían ser mayores puesto que los huecos conductores suelen presentar en Dipolo-dipolo una profundidad menor de la real (ver experiencias 7 y 8, apartados 5.3.9 y 5.3.10)

El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 1$ m. $D_{el}/D_h = 1/0,8$. Las galerías se encuentran a las siguientes profundidades:

$P1 = 6,5$ m, $P1 = 8,15D_h$ (6,5/0,8)

$P2$ y $P3 = 4,2$ m, $P2-3 = 5,2D_h$ (4,2/0,8)

Siendo P1 la galería situada en el centro del perfil, y P2 – P3 respectivamente las galerías situadas hacia el SE.

5.4.10.4 TRABAJO 8.4 Perfil GOLF - 4

Características del perfil

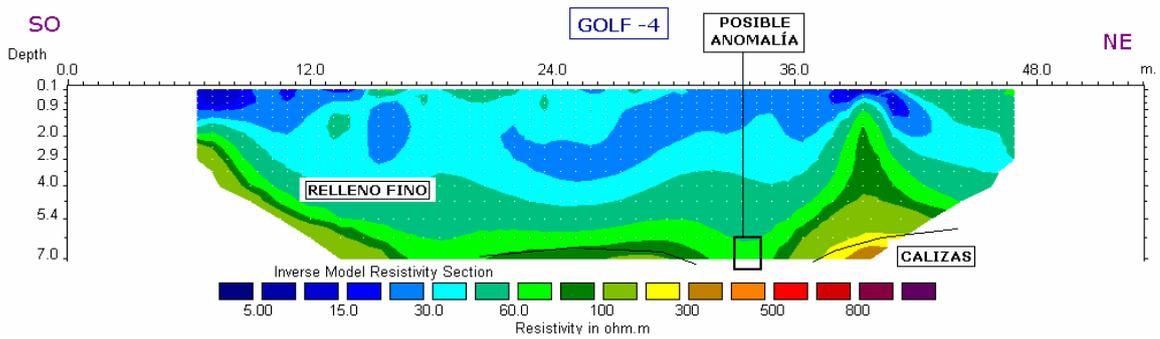
Longitud: 53.25 m. 56 electrodos separados 0.75 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 7,0 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales de las cuales la inferior apenas tiene representación. Las características de estas capas, de techo a muro, son las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que supera los 7 m.

Una segunda capa, la capa inferior, que apenas se detectan señales de su presencia aunque es visible al inicio del perfil y entre los metros 39 y 42. Esta unidad correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería.



Resultados

No se observan señales claras de presencia de galerías pero la disposición de las líneas basales de resistividad alta presenta una deflexión localizada entre los metros 33 y 35 desde el inicio del perfil. Esta “desaparición” de las líneas atribuidas a caliza en este punto se interpreta como la señal de la presencia de un cuerpo conductor en ese punto.

Este cuerpo conductor podría corresponder a la galería, tanto por tamaño, como por profundidad y, sobre todo, por la posición que ocupa, que podría ser prolongación de la detectada en perfiles situados en posiciones más meridionales (perfiles GOLF-12 y GOLF-15), que tienen una repuesta muy parecida.

5.4.10.5 TRABAJO 8.5 Perfil GOLF - 5

Características del perfil

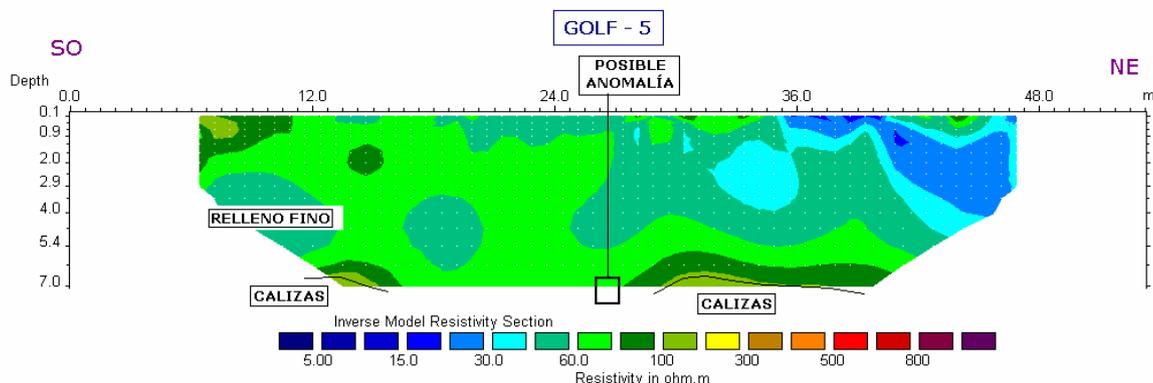
Longitud: 53.25 m. 56 electrodos separados 0.75 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 7,0 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales de las cuales la inferior apenas tiene representación. Las características de estas capas, de techo a muro, son las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que supera los 7 m.

Una segunda capa, la capa inferior, que apenas se detectan señales de su presencia aunque es visible entre los metros 12-15 y entre los metros 30-39. Esta unidad correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería.



Resultados

No se observan señales claras de presencia de galerías pero la disposición de las líneas basales de resistividad alta presenta una deflexión localizada entre los metros 26 y 28 desde el inicio del perfil. Este hundimiento de las líneas atribuidas a caliza en este punto se interpreta como la señal de la presencia de un cuerpo conductor en ese punto.

Este cuerpo conductor podría corresponder a la galería, tanto por tamaño, como por profundidad y, sobre todo, por la posición que ocupa, que podría ser prolongación de la detectada en perfiles situados en posiciones más meridionales (perfiles GOLF-4, GOLF-12 y GOLF-15), que tienen una señal muy parecida (sobre todo el perfil GOLF-4).

5.4.10.6 TRABAJO 8.6 Perfil GOLF - 6

Características del perfil

Longitud: 35.5 m. 72 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 3,6 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

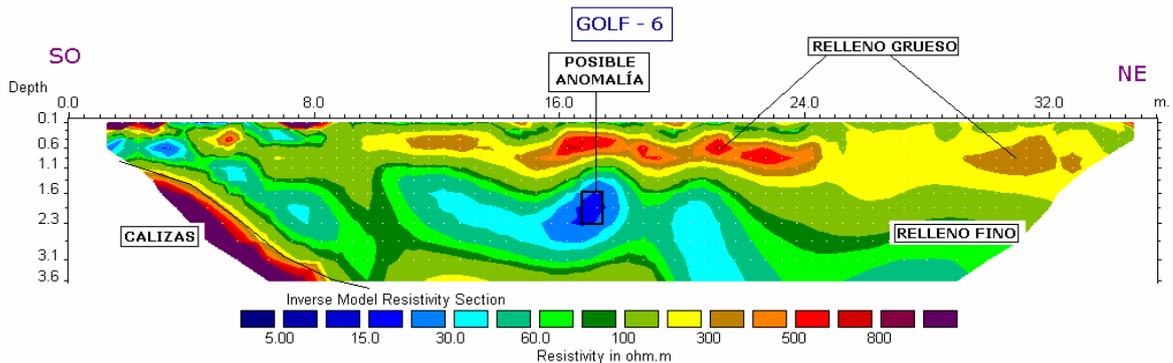
Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en tres unidades principales cuyas características son las siguientes:

Una unidad superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, concretamente desde el metro 7 desde el inicio del mismo hasta el final, donde tiene un mayor desarrollo, alcanzando casi los 2 m de espesor. Los valores superficiales de alta resistividad del tramo inicial (desde el inicio hasta el metro 3) corresponderían a la pista.

Una unidad situada por debajo de la anterior, cuya extensión ocupa prácticamente todo el perfil, aunque con un menor desarrollo hacia el extremo inicial del perfil, donde los materiales areniscos ya están cercanos a superficie, en torno a 1 m de profundidad.

Una tercera unidad, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las areniscas infrayacentes, que solo se ven en los 8 metros del extremo SO del perfil.



Resultados

En la parte central del perfil (metro 19 desde el inicio) hay una anomalía muy conductora, con morfología vertical, que corresponde a la galería que aflora en superficie. La baja resistividad de la anomalía indicaría la existencia de un relleno de agua con finos en la galería. La profundidad de esta galería estaría entre 1.5 y 2.5 m bajo superficie. Esta galería sería la que se ha detectado en el perfil 18. El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{ei} = 0,5$ m. $D_{ei}/D_h = 0,5/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 1,5$ m, por lo que $P = 1,8D_h$ ($1,5/0,8$)

5.4.10.7 TRABAJO 8.7 Perfil GOLF - 7

Características del perfil

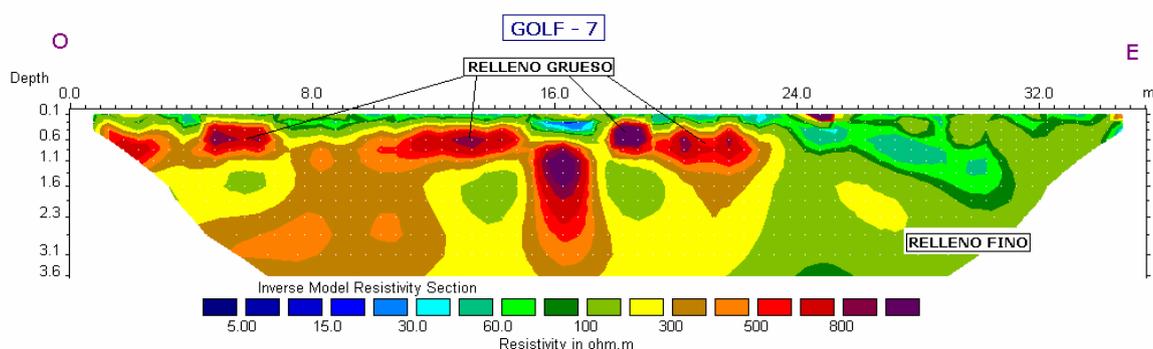
Longitud: 35.5 m. 72 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 3,6 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil no presentan una clara distribución en capas, aspecto que sí es observable en otros perfiles. Se pueden diferenciar, por tanto, las siguientes capas:

Una capa superficial, que cubre prácticamente todo el perfil, de escaso espesor (10-20 cm) salvo en la parte final, donde supera 1 m. Son materiales conductores que pueden ser atribuidos a depósitos finos de relleno.

El resto de los materiales estudiados son muy variables en el sentido de que no presentan una tendencia de distribución muy clara. Lo que sí se observa es una zona superior con materiales resistivos que corresponderían a rellenos de materiales gruesos. Al estar con esa tendencia y espesor podrían asociarse a materiales de la carretera cercana. El resto de los depósitos son mezcla entre finos y gruesos, éstos posiblemente pertenecientes a etapas de relleno de distintos hundimientos.



Resultados

En este perfil no se han detectado anomalías que puedan indicar la presencia de la galería.

5.4.10.8 TRABAJO 8.8 Perfil GOLF - 8

Características del perfil

Longitud: 35.5 m. 72 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 3,6 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

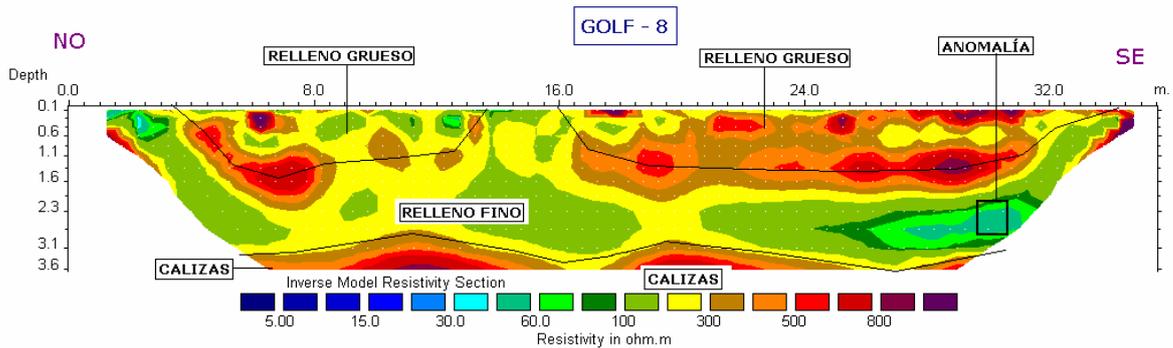
Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en tres capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, con un espesor cercano a 1.5 m. Los valores alternantes de alta y moderada

resistividad del tramo inicial podrían corresponder a materiales de relleno de granulometría variable (capas de gruesos alternando con capas de material mezclado).

Una capa intermedia, cuya extensión ocupa prácticamente todo el perfil, cuyo contacto inferior, con la unidad de calizas, se sitúa a 3 m de profundidad.

Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes.



Resultados

En el extremo final del perfil (metro 31 desde el inicio) hay una anomalía muy conductora, con morfología horizontal. La respuesta de esta anomalía con valores tan poco resistivos se debe a que hay circulación de fluidos con finos por la misma; la morfología horizontal que presenta probablemente corresponda a la presencia de fugas por alguna rotura. También podría deberse esta morfología más longitudinal a la misma galería atravesada de manera oblicua pero no parece que esta anomalía se atraviese tan oblicuamente pues parece ser que se trata de la que viene del perfil 10. La profundidad de esta galería en este perfil 8 estaría entre 2 y 3 m bajo superficie. La posición de esta anomalía coincide con la proyección de la identificada en los perfiles GOLF-10 y GOLF-16.

El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 0,5$ m. $D_{el}/D_h = 0,5/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 2,5$ m, por lo que $P = 3,1D_h$ ($2,5/0,8$)



5.4.10.9 TRABAJO 8.9 Perfil GOLF - 9

Características del perfil

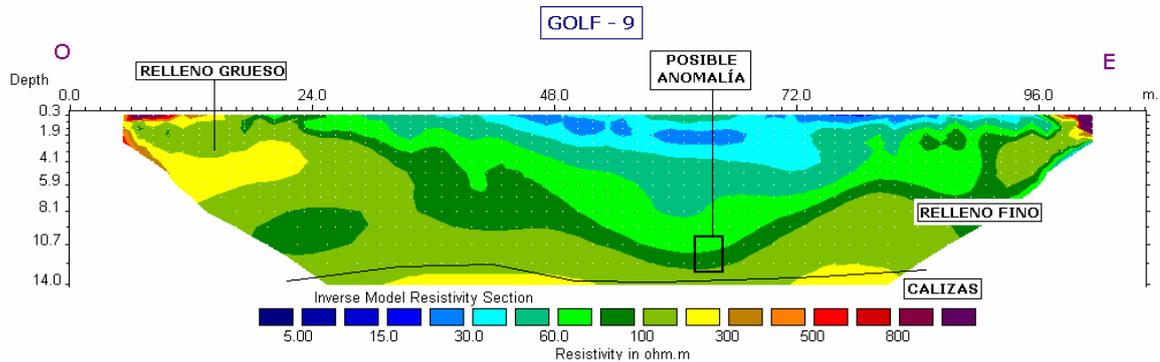
Longitud: 106.5 m. 72 electrodos separados 1.5 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 14,0 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que alcanzaría los 10 m. Tanto en el extremo inicial como en el final del perfil se observan unas anomalías más resistivas que, al presentar una cierta continuidad, se han considerado como restos de una capa intercalada de materiales de relleno gruesos, distintos de los correspondientes a los finos, que son conductores. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.

Una segunda capa, la capa inferior, que es visible en todo el perfil por debajo de los 9-10 m. Esta unidad correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes sobre las que descansa la galería.



Resultados

No se observan señales claras de presencia de galerías pero la disposición de las líneas basales de resistividad alta presenta una deflexión localizada entre los metros 61 y 63 desde el inicio del perfil. Este hundimiento de las líneas atribuidas a caliza en este punto se interpreta como la señal de la presencia de un cuerpo conductor en ese punto.

Este cuerpo conductor podría corresponder a la galería, tanto por tamaño, como por profundidad y, sobre todo, por la posición que ocupa, que coincidiría con la detectada en el perfil GOLF-4 y con la de otros perfiles situados en posiciones más meridionales (perfiles GOLF-12 y GOLF-15), que tienen una repuesta muy parecida.

El diámetro medio del hueco es supuestamente $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 1,5$ m. $D_{el}/D_h = 1,5/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 10$ m, por lo que $P = 12,5D_h$ ($10/0,8$)

5.4.10.10 TRABAJO 8.10

Perfil GOLF - 10

Características del perfil

Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

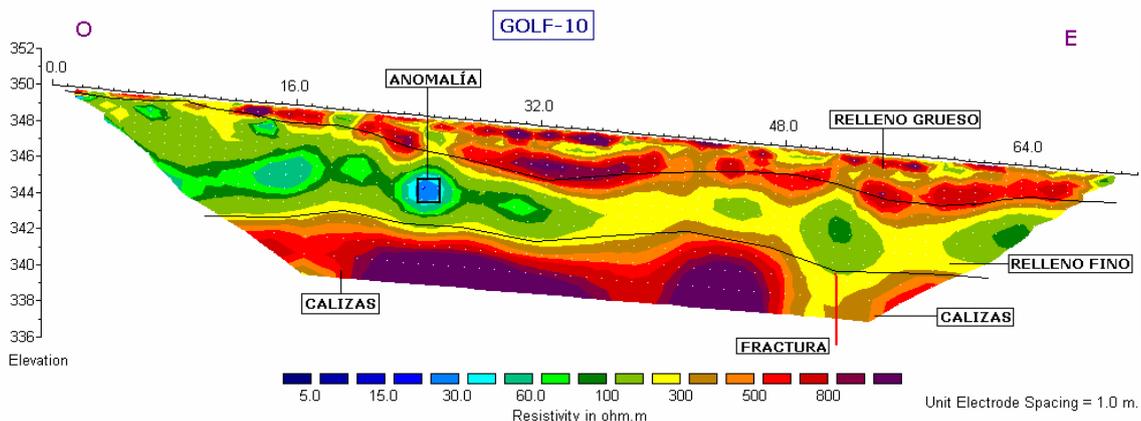
Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en tres capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, con un espesor que alcanza en algún punto los 2 m. Los valores de alta resistividad podrían corresponder a materiales de relleno de grano grueso o poco compactados.

Una capa intermedia, cuya extensión ocupa prácticamente todo el perfil, cuyo contacto inferior, con la unidad de calizas, se sitúa cercano a los 6 m de profundidad.

Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes.



Resultados

Se ha realizado la corrección topográfica ya que el terreno tiene inclinación hacia el Este. En el metro 25 desde el inicio del perfil hay una anomalía muy conductora que podría corresponder a la galería por la que hay circulación de fluidos con finos. La profundidad de esta galería estaría entre 3 y 4.5 m bajo superficie. La posición de esta anomalía coincide con la proyección de la identificada en los perfiles GOLF-8 y GOLF-16. El diámetro medio del hueco es $D_h = 0,8$ m. $D_{el} = 1$ m. $D_{el}/D_h = 1/0,8$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 3$ m, por lo que $P = 3,75D_h$ (3/0,8)

5.4.10.11 TRABAJO 8.11

Perfil GOLF - 11

Características del perfil

Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

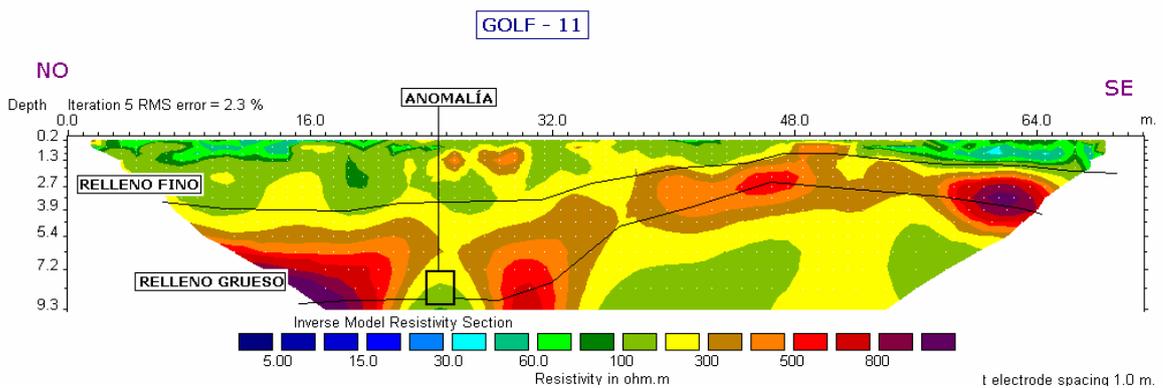
Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que superaría los 9.5 m que profundiza el perfil. Tanto en el extremo inicial como en el

final del perfil se observan unas anomalías más resistivas que, al presentar una cierta continuidad, se han considerado como una capa intercalada que se describe a continuación.

Una segunda capa, intercalada en la unidad conductora anterior, que se presenta en posiciones más elevadas en la mitad final del perfil y más hundidas en la mitad inicial del perfil. Se trataría de una capa, con un espesor de 2 a 5 m, que podría asociarse a materiales de relleno gruesos, distintos de los correspondientes a los finos, que son conductores. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.



Resultados

No se observan señales claras de presencia de galerías, en todo caso, la marca conductora que se encuentra entre los metros 26 y 28, a 8.5 m de profundidad, interrumpiendo la tendencia continua de la capa resistiva intercalada entre los finos.

La atribución de este cuerpo conductor a la galería sería por los datos determinados del tamaño y, sobre todo, por la profundidad que ocupa.

5.4.10.12 TRABAJO 8.12

Perfil GOLF - 12

Características del perfil

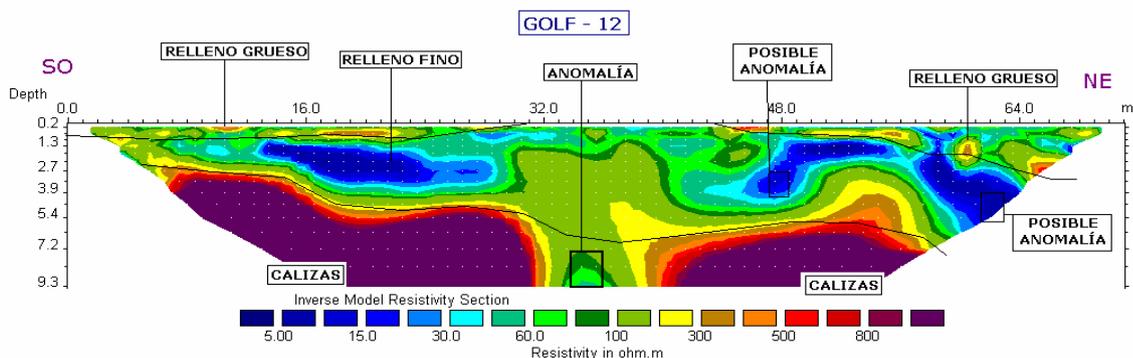
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1.0 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, aunque con un mayor desarrollo hacia el extremo final del perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que varía desde 3 m (en el extremo inicial del perfil) hasta 7 m (en la parte final del perfil).

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes en las que está emplazada la galería.



Resultados

En la parte central del perfil hay una anomalía conductora, con morfología vertical, que interrumpe la tendencia de la unidad resistiva de calizas. Correspondería a la galería. La explicación a este comportamiento geoelectrico se debe a que existe relleno de fluido con finos en el interior de la galería. El posible hundimiento del techo de la misma puede ser la causa de que presente ese carácter conductor. La profundidad a la que podría estar la galería en este punto es en torno a 7-8 m.

También hay otra anomalía muy conductora en la parte derecha del perfil, debajo del metro 62, que coincide en morfología y posición con otros perfiles. El carácter conductor podría deberse a la suma de varios factores: la bovedilla de ladrillo no se ha derrumbado, está empapada de agua y permite la circulación de agua en su interior. El reflejo de la suma de estos factores hace que se den respuestas de este tipo en la tomografía eléctrica. La profundidad a la que podría estar la galería en este punto es en torno a 5 m.

Para el hueco central $D_{ei}/D_h = 1/0,8$ y $P = 7$ m, por lo que $P = 8,7D_h$ (7/0,8). Para el hueco situado al NE (bajo distancia 48 m) $D_{ei}/D_h = 1/0,8$ y $P = 5$ m, por lo que $P = 8,2D_h$ (7/0,8)

5.4.10.13 TRABAJO 8.13

Perfil GOLF - 13

Características del perfil

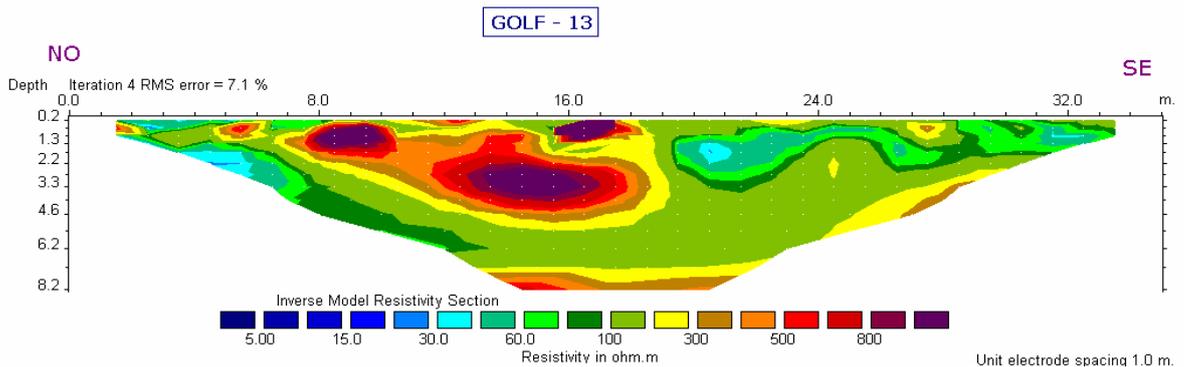
Longitud: 35 m. 36 electrodos separados 1.0 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 8,2 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión más desarrollada en la parte central del perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que llega a alcanzar los 7.5 m en los dos tercios iniciales del perfil. Las anomalías resistivas que se identifican dentro de la unidad conductora tienen una extensión localizada (entre 2 y 4 m) y se encuentran a una profundidad de 0.5 a 3.5 m. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a las calizas infrayacentes. En el tercio final del perfil la profundidad de la caliza se sitúa cercana a los 2 m, menos profunda que en el resto del perfil, donde oscila cerca de los 7.5 m.



Resultados

Hacia la parte central del perfil, entre los metros 20 y 21, se observa una anomalía conductora que podría corresponder a una galería con relleno de fluido con finos en el interior de la misma, lo que le provoca esa respuesta conductora. A esta interpretación se llega porque, aunque su señal no es tan clara como en otros casos, la posición de la misma coincide con la dirección que une la galería 1 con los perfiles situados más al NO (GOLF-15, GOLF-12, GOLF-3, GOLF-9, GOLF-4 y GOLF-5).

5.4.10.14 TRABAJO 8.14

Perfil GOLF - 14

Características del perfil

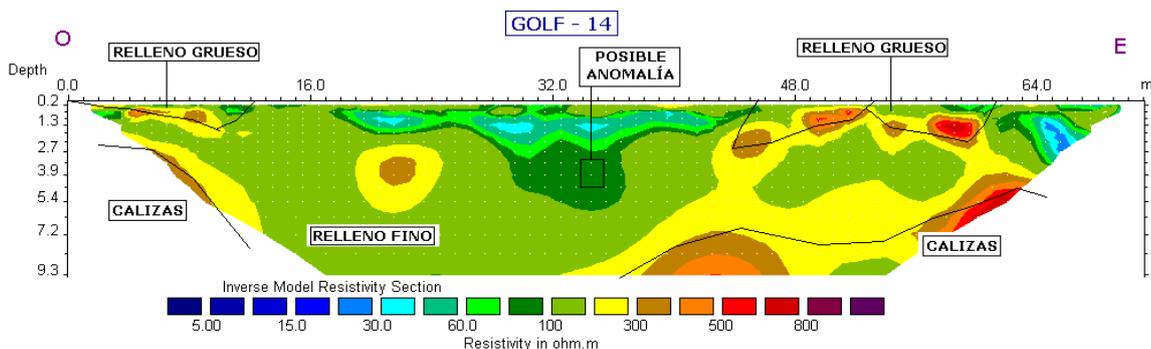
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1.0 m. La mitad final del perfil solapa con la mitad inicial del perfil GOLF-15. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión más desarrollada en la parte central del perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que llega a alcanzar los 7 m. A diferentes profundidades hay anomalías resistivas locales, de pequeña extensión (entre 2 y 4 m) y se encuentran a una profundidad de 0.5 a 3.5 m. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a las calizas infrayacentes sobre las que están emplazadas las galerías.



Resultados

Hacia la parte central del perfil se observa un pequeño hundimiento de las líneas indicando la posible presencia de una anomalía conductora que podría corresponder a una galería con relleno de fluido con finos en el interior de la misma, lo que le provoca esa respuesta conductora. No obstante, su señal no es tan clara como en otros casos (es menos conductora, lo cual podría atribuirse a un cierto vacío en su interior) y la posición de la misma no coincide de manera clara con las de otros perfiles.

5.4.10.15 TRABAJO 8.15

Perfil GOLF - 15

Características del perfil

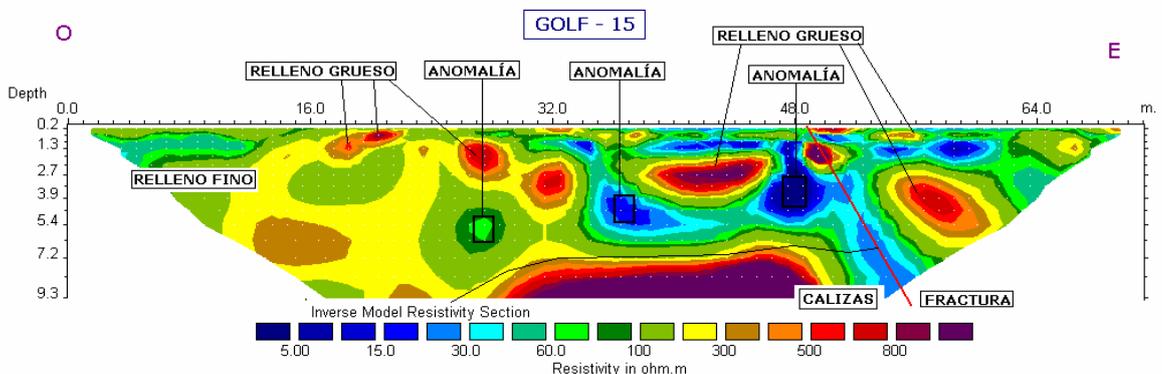
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1.0 m.. La mitad inicial del perfil solapa con la mitad final del perfil GOLF-14. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión más desarrollada en la parte final (Este) del perfil atribuible a la unidad arcillosa suprayacente que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que llega a superar los 7 m. A diferentes profundidades hay anomalías resistivas locales, de pequeña extensión (entre 2 y 4 m) y se encuentran a una profundidad de 0.5 a 3.5 m. Según informaciones recogidas localmente, estas anomalías se atribuyen a materiales de todo tipo (piedras escombros, plásticos, maderas) vertidos por los residentes locales para evitar la erosión y el arrastre de finos por el agua.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a las calizas infrayacentes sobre las que están emplazadas las galerías.

**Resultados**

Hacia la parte central del perfil se observa la presencia de varias anomalías conductoras, que corresponderían a sendas galerías. La explicación a este comportamiento geoelectrico se debe a que existe relleno de fluido con finos en el interior de la galería.

En el caso de la anomalía situada a la izquierda (metro 27 desde el inicio del perfil), el posible hundimiento del techo de la galería puede ser la causa de que presente ese carácter conductor. La profundidad a la que podría estar la galería en este punto es en torno a 5-6.5 m. Para este caso $D_{el}/D_h = 1/0,8$ y $P = 5$ m, por lo que $P = 6,2D_h$ ($5/0,8$).

Tanto la anomalía central (metro 37 desde el inicio del perfil) como la derecha (metro 48 desde el inicio del perfil) son muy conductoras. Este carácter conductor podría deberse a la suma de varios factores: la bovedilla de ladrillo no se ha derrumbado, está empapada de agua y permite la circulación de agua en su interior. El reflejo de la suma de estos factores hace que se den respuestas de este tipo en la tomografía eléctrica. La profundidad a la que podrían estar ambas galerías es en torno a 4.5-6 m. Aquí D_{el}/D_h también es $1/0,8$, pero $P = 4,5$ m, por lo que $P = 5,6D_h$ ($4,5/0,8$).

5.4.10.16 TRABAJO 8.16

Perfil GOLF - 16

Características del perfil

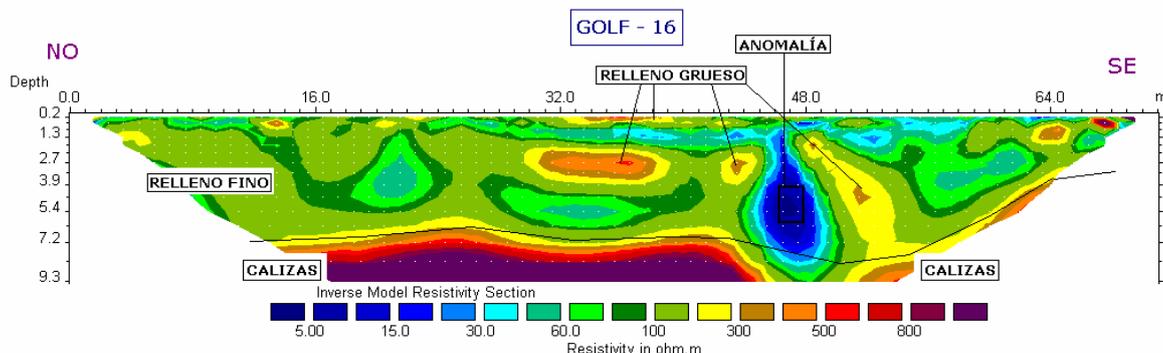
Longitud: 71 m. 72 electrodos separados 1 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 9,3 m. Equipo SYSCAL R1 Plus SWITCH 72

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión prácticamente generalizada a lo largo de todo el perfil, con un espesor que alcanza en algún punto los 7 m. Los valores de baja resistividad podrían corresponder a materiales finos de relleno. Las anomalías resistivas de extensión local y a profundidades entre 2.5 y 3 m podrían corresponder a materiales de relleno de grano grueso.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a la parte superior de las calizas infrayacentes.



Resultados

En el metro 47 desde el inicio del perfil hay una anomalía muy conductora que podría corresponder a la galería por la que hay circulación de fluidos con finos. La profundidad de esta galería estaría entre 4.5 y 6 m bajo superficie. La posición de esta anomalía coincide con la proyección de la identificada en los perfiles GOLF-8 y GOLF-10. Esta galería tiene $D_e/D_h = 1/0,8$ y $P = 4,5$ m, por lo que $P = 6,2D_h$ (5,6/0,8).

5.4.10.17 TRABAJO 8.17

Perfil GOLF - 17

Características del perfil

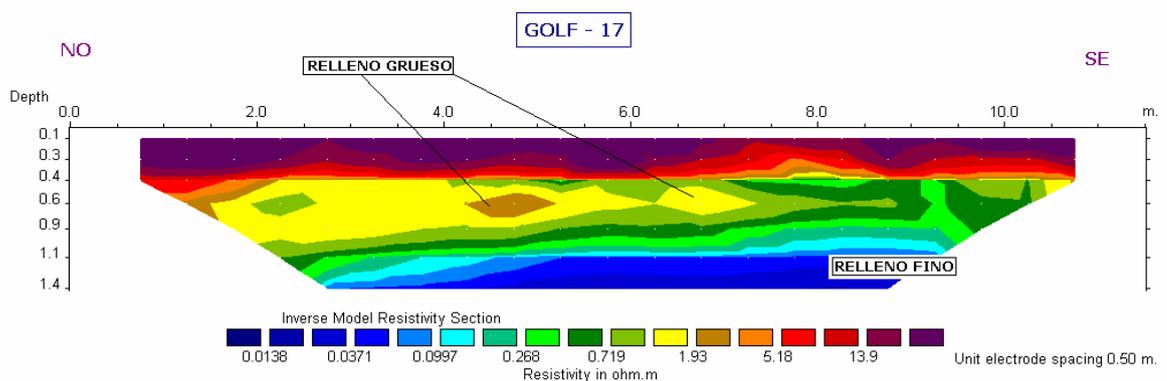
Longitud: 11.5 m. 24 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 1,4 m. Equipo SYSCAL DID SWITCH 24

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial que se extiende por encima de todo el perfil, con un espesor que llega a 0.6 m. Los valores de alta resistividad permite atribuirlos a los materiales que forman la pista o materiales de relleno de grano grueso.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a materiales finos de relleno.



Resultados

No se aprecia la existencia de ninguna anomalía con características que permitan ser atribuidas a la presencia de la galería.

5.4.10.18 TRABAJO 8.18

Perfil GOLF - 18

Características del perfil

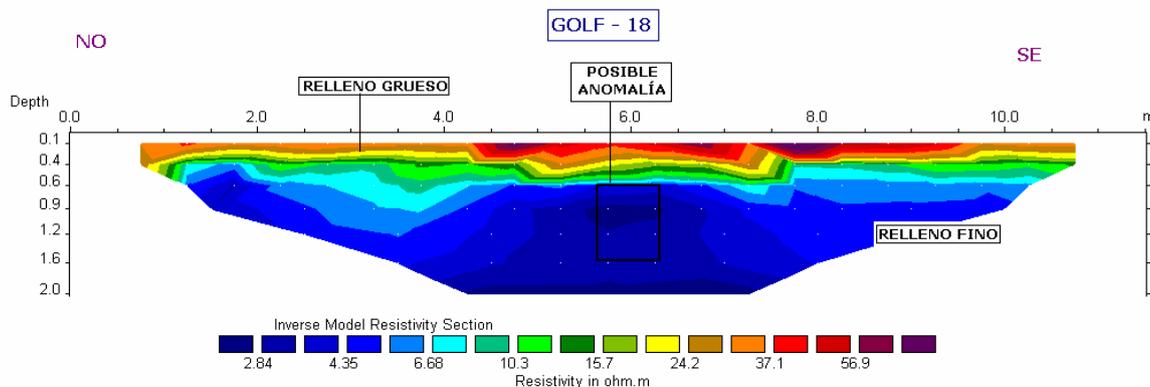
Longitud: 11.5 m. 24 electrodos separados 0.5 m. Dispositivo Schlumberger-Wenner. Profundidad máxima 2 m. Equipo SYSCAL DID SWITCH 24

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial que se extiende por encima de todo el perfil, con un espesor de 0.3 m. Los valores de alta resistividad permite atribuirlos a los materiales que forman la pista.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a materiales finos de relleno en los cuales se emplaza la anomalía observada, a una profundidad de 0.5-1.5 m.



Resultados

En la parte central del perfil, concretamente en el metro 6 desde el inicio del mismo, hay una anomalía muy conductora que correspondería a la galería por la que hay circulación de fluidos. La profundidad de esta galería estaría entre 0.5 y 1.5 m bajo superficie. La posición de esta anomalía coincide con la proyección de la identificada en el perfil GOLF-6.

5.4.10.19 TRABAJO 8.19

Perfil GOLF - 19

Características del perfil

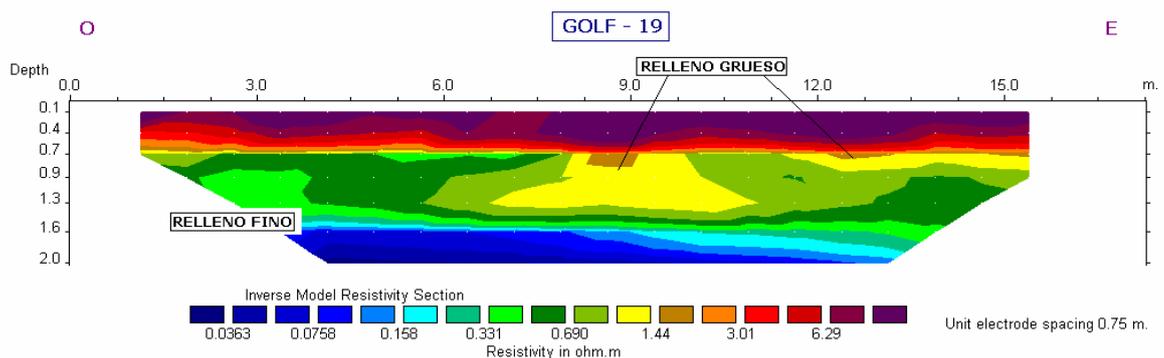
Longitud: 18 m. 24 electrodos separados 0.75 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 2m. Equipo SYSCAL DID SWITCH 24

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial que se extiende por encima de todo el perfil, con un espesor de 0.4 m. Los valores de alta resistividad permite atribuirlos a los materiales aireados de la parte superior.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a materiales finos de relleno.



Resultados

No se observa ninguna anomalía conductora en este perfil. La anomalía resistiva correspondería a uno de los múltiples sectores de relleno con material grueso que hay dispersos por esta zona.

5.4.10.20 TRABAJO 8.20 Perfil GOLF - 20

Características del perfil

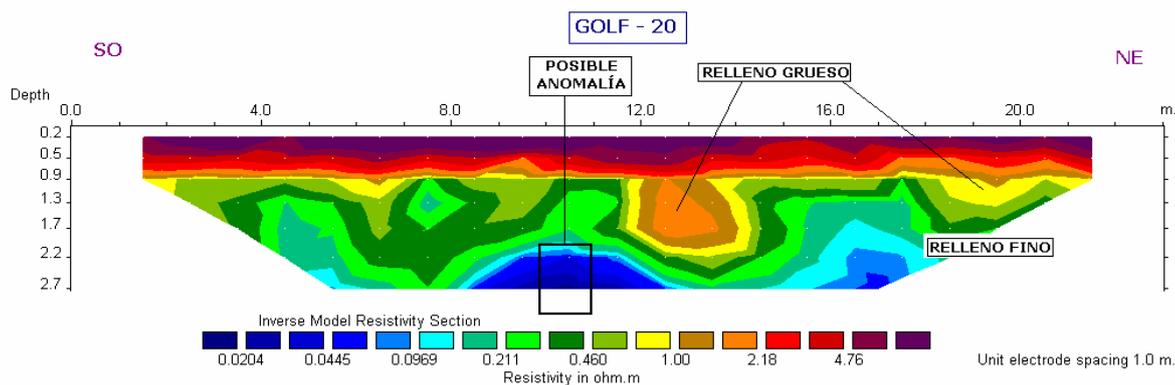
Longitud: 23 m. 24 electrodos separados 1 m. Dispositivo Dipolo-dipolo. Profundidad máxima 2,7 m. Equipo SYSCAL DID SWITCH 24

Materiales

Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en dos capas principales cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial que se extiende por encima de todo el perfil, con un espesor de 0.4 m. Los valores de alta resistividad permite atribuirlos a los materiales aireados de la parte superior.

Una segunda capa, la capa inferior, que correspondería a materiales finos de relleno en los cuales se emplaza la anomalía observada.



Resultados

Hay una anomalía conductora en el metro 10-11 desde el inicio de este perfil que correspondería a la proyección de la galería, con circulación de agua, procedente del perfil GOLF-2 y que se dirige hacia los perfiles GOLF-3, GOLF-4 y GOLF-9. La profundidad de la misma es 2.5-3.5 m.

Conclusiones

Los distintos perfiles de tomografía eléctrica se han reprocesado con los datos de topografía obtenidos a partir del mapa topográfico. También se han reprocesado filtrando el posible ruido. Una vez hecho esto, se han obtenido los perfiles definitivos en los que ha sido más objetiva la identificación de anomalías.

En cada uno de los perfiles se han localizado las anomalías que se han atribuido a la posible presencia de las galerías de drenaje. Después se les ha dado una posición a lo largo del perfil y una profundidad.

Se observa al analizar las anomalías es que en todas ellas la respuesta es muy similar, siempre con valores conductores (30 ohm.m), lo cual significa que, presumiblemente, la galería se podría encontrar en buen estado o, en todo caso, con algunas roturas locales pero probablemente no derrumbada. Al estar entera y con circulación de agua (con o sin finos) se comportaría como un medio conductor dentro del material en el que se encuentra, como así ocurre. Si estuviera derrumbada, lo más probable es que no se obtuviera una respuesta que permitiera identificar ninguna anomalía sino que sería todo igualmente poco resistivo.

La localización de estas galerías de pequeña sección a profundidades proporcionalmente grandes (de 7 a 10 m) implica una reducción la resolución en las imágenes de tomografía, como se ve que ha sucedido. No obstante se ha jugado con todos los factores de los dispositivos de medida con el fin de optimizar la resolución para, al menos, detectar la posición y el posible estado de la misma.

Como ya se demostró en el apartado 5.3.5 "experiencia 3: Bovedilla Vertical" se han de identificar como conductores materiales tipo ladrillo o bovedilla que se encuentren empapados en agua. El material poroso de los ladrillos, una vez empapado en agua y conservando la humedad, actúan como membranas totalmente permeables al paso de la corriente. El agua del terreno, el de los ladrillos y el que circula por las galerías están en sintonía, derivándose de ello una mayor conductividad de la esperada.

En algún perfil (tal y como se ha resaltado en el perfil GOLF-8) se ha identificado una señal que podría indicar la existencia fugas de agua desde la galería, lo cual es totalmente lógico ya que los lavados de finos que producirían estos flujos subterráneos de agua escapada de las galerías serían los que causarían los hundimientos que se observan en superficie y que se vienen produciendo desde hace años en las zonas próximas a las galerías.

El que no se observen estas anomalías alargadas en otros perfiles que permita atribuirles a posibles fugas no significa que no existan sino que pueden ser de una

entidad pequeña y, consecuentemente, no den reflejo en la tomografía eléctrica por encontrarse a una determinada profundidad que se escapa a la resolución de la herramienta.

Por todo ello se puede concluir que se han identificado en el subsuelo las galerías buscadas, unas veces reflejadas de manera más definida y otras veces de forma más intuitiva, es decir, mediante la interpretación de unas anomalías que provocan unas deflexiones en las isolíneas de resistividad.

La calidad de los datos obtenidos ha sido tal que ha permitido cubrir ese objetivo, sin embargo, la necesidad de definir las características del estado de la galería en diferentes puntos de la zona investigada no se ha podido completar totalmente ya que hay algunos de los perfiles en los que la caracterización de la galería se ha determinado a partir de la observación de las señales que deja en el entorno de cada perfil.

Así, los perfiles 3, 4, 5 y 9 parecen mostrar la anomalía de manera menos clara. Esto puede significar que, además de estar a mayor profundidad, la falta de un reflejo claro indicaría que la galería en esos puntos podría estar derrumbada. En otros sectores se ha localizado con un reflejo más claro, como es el caso de los perfiles 6, 10, 13, 15, 16 y 19, lo cual puede ser indicativo de que el estado en que se encuentra puede ser más perfecto.

Se ha comprobado que el ratio $D_{el}/D_h = 1/0,8$ es adecuado para galerías conductoras poco profundas, pero su resolución disminuye bruscamente con el aumento de la profundidad, tanto para dispositivo Dipolo-dipolo como para dispositivo Schlumberger-Wenner.

**6. APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELECTRICA AL
PARAJE KÁRSTICO Y YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE
COLONIA CLUNIA SULPICIA**

6. APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELECTRICA AL PARAJE KÁRSTICO Y YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE COLONIA CLUNIA SULPICIA

6.1 DESCRIPCIÓN Y ENCUADRE HISTÓRICO

El yacimiento arqueológico de Clunia es sin duda uno de los mejores de toda la península para el estudio de la época hispanorromana. Resulta admirable la cantidad y calidad de hallazgos que han aflorado en las excavaciones realizadas. El potencial del yacimiento es enorme, más aún cuando tan solo ha sido excavada una minúscula extensión de cuanto constituye la ciudad romana.

Colonia Clunia Sulpicia tiene dos grandes peculiaridades que le diferencian de otros asentamientos romanos. Por una parte, sus 7.000 m² de baños, así como su teatro excavado en roca con capacidad para casi 10.000 espectadores apuntan a este núcleo urbano como uno de los más importantes de toda la península ibérica, llegando a tener una población de unas 40.000 personas. Por otro lado, y donde se centra uno de los aspectos de esta tesis, Clunia es peculiar por su infraestructura de captación y distribución de agua destinada al consumo urbano.

A diferencia de otros núcleos de población romanos Clunia carece de grandes obras hidráulicas, tales como presas, acueductos, conducciones o depósitos de almacenamiento de agua. La respuesta a esta carencia se encuentra en el subsuelo de la propia ciudad, constituido por roca caliza karstificada, donde fue esculpida una perfecta red de galerías y conductos bajo la urbe, interconectando grutas naturales con cavidades labradas en la propia roca para así lograr un gran acuífero subterráneo localizado del que se abastecía la población desde de pozos verticales situados en superficie.

La aplicación de la prospección geofísica por tomografía eléctrica en Clunia ampliará el conocimiento que se tiene sobre el subsuelo del yacimiento y más concretamente, la verdadera dimensión de su entramado kárstico, aspecto directamente relacionado con la cantidad de agua disponible para la población. De este modo podría calcularse el régimen hídrico, estudiando la velocidad máxima de descarga por captación artificial y su recarga natural, para así saber si el acuífero necesitó una recarga artificial de agua mediante acueductos o si era suficiente la recarga natural por infiltración de agua de lluvia. Podrían abrirse así nuevas líneas de investigación para futuros trabajos científicos (Antigüedad Aumendi, I., 1988; Barea et al., 2000).

El Grupo Espeleológico Ribereño de Aranda de Duero ha podido topografiar una pequeña parte de esas galerías, detectando canales excavados por los romanos en la

arcilla que rellena varias galerías, arcillas que conservan intactas numerosas inscripciones y modelados de su época (De Palol, P.; Vilella, J., 1986). Se desconoce la verdadera extensión de este entramado kárstico, su material de relleno (agua, aire, arcilla, derrubios, etc.) o la localización de los pozos que desde la superficie comunican con él.

Otro aspecto abordable en Clunia mediante tomografía eléctrica es la acotación de su potencialidad arqueológica. Al tratarse de un método de superficie no destructivo sensible a la localización de muros, cimientos, canalizaciones o soleras puede proporcionar grandes avances en este sentido.

6.1.1 SITUACIÓN DEL YACIMIENTO

El yacimiento arqueológico de la ciudad romana de Clunia se encuentra situado en el término municipal de Peñalba de Castro, al SE de la provincia de Burgos. El yacimiento se encuentra en un cerro de superficie plana denominada Alto de Castro, a 1023 m de altitud, que domina gran parte de los territorios circundantes, en el sudeste de la provincia de Burgos, junto a la localidad de Peñalba de Castro, a 30 Km de Aranda de Duero y a 15 Km de Peñaranda de Duero. Se accede desde la carretera N-I Madrid-Burgos y desde la N-122 Valladolid-Zaragoza, llegando a Aranda de Duero hay que desviarse por la C-111 dirección Peñaranda de Duero. Otro acceso posible es la N-234 Soria-Burgos en Salas de los Infantes dirección Peñaranda de Duero por la C-111.

La ciudad de Clunia formaba parte de la gran vía del Duero, que va desde Caesaraugusta (Zaragoza) hasta Asturica Augusta (Astorga), uno de los canales vitales de la Hispania romana. También existiría una red de pequeños viales que enlazarían la capital del Convento Jurídico Cluniense con otra serie de asentamientos como Uxama o Rauda (Mayoral Gamo, V. et al, 2002).

6.1.2 HISTORIA DE LA CIUDAD

Los primeros pobladores

Los orígenes conocidos del poblador de la actual Coruña del Conde hay que buscarlo en los tiempos en los que los Vacceos y Arévacos transitaban y trabajaban los campos de la península ibérica, sin embargo, antes de estos pobladores, hubo otros, pero desgraciadamente no hay datos históricos que revelen y nos den detalles de sus costumbres, vivencias, costumbres y cultura.

Se sabe sin embargo, que en el norte España que cubría las zonas desde Asturias hasta Aragón, había diferentes grupos de asentamientos humanos, que carecían de

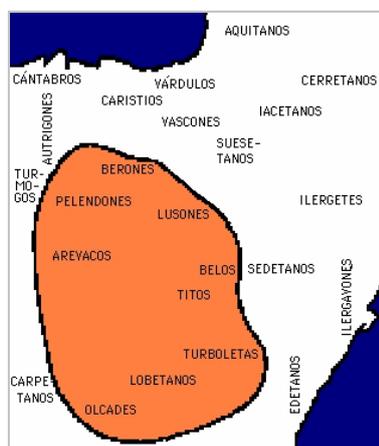
un idioma claro y definido y los cuáles, no tenían ninguna formación de escritura. Además, la lengua que hablaban era escasa y carente de riqueza léxica.

Es con la llegada de los romanos especialmente, cuando las lenguas habladas en la Península, toman un cambio espectacular, y sólo algunas de las lenguas que se hablaban en zonas rurales, mantienen partes de su origen, que posteriormente y hasta nuestros días, han sufrido innumerables transformaciones que no han podido ser mantenidas hasta nuestros días. Su legado era oral y no era un pueblo puro, sucesivas incursiones, hicieron que los pueblos del norte de España, sufrieran innumerables mezclas. Eran eso sí, pueblos que resistían tenazmente a los invasores quizás por su organización y se dedicaban especialmente al campo.

Lo que es claro, es que la llegada de los celtíberos primero y de los romanos posteriormente a la península fue decisiva en los avances tecnológicos y culturales de los antiguos pueblos pobladores de España. Sin embargo, no se sabe con exactitud cómo y cuando llegaron los primeros pobladores a la meseta de Clunia, que posteriormente crearía Coruña del Conde. Quizás las excavaciones que se realizan en la actualidad en la meseta de Clunia, hablen dentro de unos años o siglos y nos ofrezcan pistas sobre los primeros pobladores de estas tierras.

La Clunia celtibérica

Poco es lo que nos dice la arqueología de la Clunia celtibérica y las noticias históricas son tardías y escasas. Se sabe por Livio que la ciudad fue asediada por Pompeyo en su lucha contra Sertorio en el año 75 antes de nuestra era (De Palol, 1994). Pero tuvo que abandonar el sitio a causa de las frecuentes salidas de Sertorio y a las inclemencias del invierno cluniense. Hasta el año 56 antes de nuestra era no volvemos a tener citas históricas, esta vez aliada a los vacceos en las revueltas por la independencia frente a Roma, el general romano Metelo sitió la ciudad pero de nuevo el duro invierno impuso una tregua. La total romanización estaba cercana, ya en el año siguiente, el legado de Pompeyo, Afranio, redujo definitivamente a la obediencia a vacceos y arévacos, y a la ciudad de Clunia.



Los asentamientos de los Vacceos y Arévacos en la península ocuparon las tierras de la actual Coruña del Conde, antigua Clunia. Durante bastantes años, se debió crear una importante comunidad de ganaderos y labradores, conviviendo en esta zona. Un pueblo completamente organizado muy resistentes a las invasiones externas. Con el paso del tiempo y las diferentes incursiones culturales, se terminó por crear un importante asentamiento de celtas arévacos, que desembocará posteriormente en un asentamiento celtíbero.

En realidad las incursiones culturales que ha sufrido la península ibérica (formada por España y Portugal), han enriquecido nuestra tierra y servido de avances sociales y culturales muy importantes.

Fuera como fuera y cuando fuera la fusión cultural y diferentes asentamientos en la meseta de Clunia, lo cierto es que no hay datos que hagan pensar que ese asentamiento se hubiera producido en la actual meseta que cubre Clunia, tampoco en las zonas cercanas de los ríos, pero conociendo que las labores y trabajos de los Celtíberos estaban relacionadas con el ganado y el campo, es bastante probable, que sus asentamientos estuvieran cercanos al río. Pero la meseta en la cuál está situado Clunia posee un importante depósito de agua subterránea que permite regar los campos y cosechas que pudiera haber allí.

Al carecer de datos arqueológicos no se puede conocer dónde estaba enclavado realmente el asentamiento celtíbero, aunque parece ser que los últimos datos posicionan este asentamiento en la meseta en la cuál se erigió posteriormente la ciudad romana de Clunia, que pudiera haber sido construida sobre los asentamientos Celtíberos.

Los Celtíberos, eran un pueblo bastante aguerrido y defensor fiel de lo que consideraba suyo, de esa manera, no se dejó invadir con demasiada facilidad. Buena prueba de ello, lo tenemos en el pueblo Celtíbero de Numancia (Soria), no muy lejana de Clunia y por tanto de Coruña del Conde, que se opuso con tenacidad a la invasión romana.

La ciudad romana

Es posible que el propio emplazamiento de la ciudad y el preponderante papel desempeñado en estas guerras pudiera hacer pensar a los romanos en mantener un puesto fijo en el lugar, creándose así la Clunia romana.

En este caso la arqueología puede ayudar muy seriamente a determinar los primeros niveles de la ciudad romana. Hasta ahora en las excavaciones aparece un estrato profundo, en la casa nº1 correspondiente a tiempos de Tiberio con

acuñaciones hispanorromanas que atestiguan la condición de *municipium* de la ciudad (De Palol, 1994).

A los romanos les costó esfuerzo y tiempo llegar a estas tierras, pero dejaron un legado que muchos jamás hayan pensado. Actualmente apenas se ha excavado un 2% de la extensión que aproximadamente se calcula tuvo la ciudad, y poco a poco va aflorando lo que fue una gran ciudad con una importante actividad comercial y cultural.

El asentamiento e invasión romana debió de tener lugar en el otero sobre el que se construyó la ciudad romana de Clunia hace ya más de 2000 años. Posiblemente las refriegas fueran más duras de lo que debemos pensar, y qué duda cabe que tuvieron que ser con toda probabilidad en tiempos más templados, y nunca en el incómodo otoño y duro invierno que azota esta tierra.

Pero los romanos, no sólo tuvieron que soportar el clima de estos lugares, también tuvieron que aguantar la resistencia del pueblo Celtíbero y el ingenio y persistencia de Sertorio (año 75 antes de nuestra era).

En los tiempos del emperador Tiberio se inició la construcción de la ciudad romana y, casi con total seguridad, el anterior asentamiento fuera demolido completamente. Roma quería someter a la Península Ibérica. El norte de España no quedó completamente romanizada, aunque no hay indicios claros de que allí se produjeran las duras refriegas que se produjeron en Clunia y en Numancia. Además, la conquista de Clunia, se da lugar en un momento en el que los cambios militares eran frecuentes, y en un momento en el que Roma ya comenzaba a carecer de interés por expandir sus dominios como en años anteriores.

Clunia logró su máximo esplendor con Servio Sulpicio Galba, el cuál se refugió en Clunia y luchó contra Nerón. Era el año 68 después de nuestra era. Clunia fue entonces erigida como capital del imperio.

Galba acudió a Roma tras la muerte de Nerón, para ser proclamado emperador. Galba o Servius Sulpicius Galba, nació en el año 3 y pertenecía a una familia aristocrática bien acomodada. Su carrera política estuvo iniciada con una serie de puestos de diferente importancia dentro del Imperio, adquiriendo una importante fama de administrador.

En el año 68, cuando Galba ya contaba con 65 años y siendo gobernador de la provincia Tarraconense bajo el mandato de Nero (Nero Claudius Caesar Drusus Germanicus) desde el año 50, se unió a la sublevación iniciada por el legado de la Galia Lugdunense, Caius Iulius Vindex y continuada por el gobernador de Lusitania, Otho (Marcus Salvius Otho).

Caius Iulius Vindex fue derrotado y muerto, y Galba fue proclamado emperador por la Legión VI Victrix en Clunia, y obteniendo el favor del Senado, se dirigió a Roma para tomar posesión del cargo. Existen acuñaciones de Galba siendo ya emperador con la leyenda HISPANIA CLUNIA SUL(pifia). En los textos de Suetonio, hay descripciones interesantes, posiblemente la denominación de Sulpicia se deba a este emperador, si bien no se sabe si la condición de Colonia también se deba a él, quizá pueda pensarse que en el momento de convertirse en cabeza de un convento jurídico, bajo Claudio, fuera Colonia (De Palol, P., 1994).

Nero por su parte, fue traicionado por el prefecto del pretorio y declarado enemigo público por el Senado. Huyó de Roma y cuando vio que no había salida a su situación, se hizo matar. Una vez muerto Nero, Galba llegó a Roma y tomó posesión del cargo de emperador.

Poco después de su nombramiento, Galba perdió rápidamente su popularidad debido a su estricta disciplina y su rígida economía. Varios desafortunados nombramientos de puestos importantes en el Imperio desataron las iras de sus personas de confianza. Así, las tropas estaban al mismo tiempo, descontentas por esta acción.

Paralelamente a este hecho, el cuál posiblemente tuviera relación con la supuesta mala fama de Galba, Otho, el cuál era en tiempos anteriores íntimo amigo de Nero, apoyó en la rebelión a Galba, con la esperanza de ser adoptado como sucesor del Imperio. Galba sin embargo, adoptó a L. Calpurnius Piso como sucesor, procedente de la familia Calpurnia, lo cuál no gustó a Otho, quien se rebeló autoproclamándose emperador y ordenando a la guardia pretoriana el asesinato de Galba y L. Calpurnius Piso el 15 de Enero del año 69, quienes fueron degollados por los soldados de Pretorio en el Foro por orden de Otho.

Otho fue proclamado emperador, una etapa que sólo le duró 3 meses, ya que sus tropas fueron derrotadas el 14 de Abril del año 69 por el ejército de Vitellius (Aulus Vitellius) quién quiso vengar la muerte de Galba. Otho desalentado se suicidó el 17 de Abril del año 69. Vitellius fue proclamado emperador y mantuvo diferentes discrepancias con el Senado. Vitellius de mala fama debido al juego y las mujeres, aunque fuertemente relacionado con todos los emperadores por su carácter adulator y habilidad en el uso del carro, fue finalmente asesinado por el pueblo aproximadamente el 1 de Julio del año 69, después de perder su ejército contra el ejército de Vespasianus.

Como vemos, las épocas romanas y sus correrías no eran lo más comfortable que se podría llegar a imaginar, y realmente, el ansia de poder y de conseguir ser emperador hacía que los sobornos, vicios y juego, estuvieran a la orden del día.

La vida en la ciudad en tiempos romanos debió ser bastante próspera, como base política de una zona agrícolamente interesante para el Imperio y desde un punto de vista militar punto fuerte en la romanización de la Tarraconense y de Cantabria.

La ciudad tiene unas 100 hectáreas de extensión pero es muy difícil calcular la población que tuvo. El estudio del Teatro (con aforo para 9.000 o 10.000 personas) permite pensar en una población de unos 40.000 habitantes que pudieran utilizar este edificio de espectáculos. Pero lo cierto es que actualmente hacer un cálculo es totalmente imposible, debido a que los terrenos excavados no permiten conocer la distribución de espacios y zonas públicas. Además no parece haber un plan regular en la disposición urbana, y nada se sabe del tipo de viviendas de la periferia.

La crisis del siglo III, el final de Clunia

El problema de la primera gran destrucción de la ciudad no queda nada claro. Se pone en relación con las invasiones de francos y alamanos que asolaron el Imperio en el s. III, pero quizás no sean estas invasiones las causantes de la decadencia de la ciudad. La inestabilidad económica, la inseguridad de caminos y bandas de saqueadores, van sembrando la intranquilidad en estas comarcas del Imperio sin que sea preciso atribuirlo a estas invasiones. Por las excavaciones realizadas, se aprecia la existencia de áreas urbanas destruidas y nunca reedificadas, desde finales del s. III.

Se produce una reacción económica desde finales del s. III, época de Diocleciano y Constantino, aunque no sabemos, todavía el alcance de este renacer urbano, ya que las áreas excavadas están limitadas a los ambientes del Foro (De Palol, P., 1994). Se puede pensar que en el último cuarto del s. III la ciudad está en decadencia, y que se rehace con cierto empuje durante todo el s. IV y parte del V; pero que en el área del Foro, extensas zonas de la urbe están deshabitadas y se ocupan amplios espacios para necrópolis, donde los últimos enterramientos corresponden a época visigoda segunda mitad s. VII (por hallazgo de broches de cinturón pertenecientes a ese momento)

En el s. IX se abandona definitivamente Clunia y se funda Coruña del Conde, más próxima al río. El abandono de Clunia es total, motivada por su falta de prosperidad y los diferentes asedios, invasiones y ataques de los últimos siglos. El nombre de Clunia tiene su origen en el nombre de Clounioq, nombre que tiene su origen en los asentamientos Celtíberos. Posteriormente se llamó Clunia, como asentamiento romano, para pasar a llamarse Cruña en el siglo IX y las diferentes adaptaciones de éste, como fueron Curuña, Coruña y finalmente Coruña del Conde, que tomó su nombre por el dueño de estas tierras en el siglo XV.

En la cercana localidad de Coruña del Conde, podemos encontrar dos puentes romanos, símbolos claros de la importancia de Clunia en Hispania.

La investigación en Clunia mediante Tomografía Eléctrica

Como se ha podido ver en el desarrollo resumido de su historia, Clunia fue un importante centro habitado por un elevado número de romanos que hicieron prosperar esta zona y sus alrededores. El desarrollo de una población lleva implícita, y más en aquellos tiempos, la necesidad de abastecimiento de agua potable, tanto para el consumo y regadíos como para los baños y termas.

Esta zona era capaz, presumiblemente, de abordar esa necesidad pues el conjunto de galerías y cuevas que contiene el entramado kárstico del subsuelo así parece evidenciarlo. La aplicación de geofísica por tomografía eléctrica con el objetivo de identificar esas galerías, pozos y construcciones permitiría, en gran medida, avanzar mucho en el conocimiento de la historia y costumbres de esta colonia romana.

6.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El propósito del presente estudio es doble, por una parte la determinación de las características que presentan las calizas y, fundamentalmente, el reflejo que las cavidades que tiene en los perfiles de tomografía eléctrica realizados con diversos dispositivos de medida. Se trata, por lo tanto, de valorar la bondad del método de la tomografía eléctrica para detectar cavidades y definir cuál es el dispositivo más adecuado para caracterizarlas en función de la morfología de las mismas, su tamaño y su profundidad. Por otro lado se pretende utilizar la tomografía eléctrica para localizar estructuras arquitectónicas enterradas de época romana, tales como muros, sillares, pavimentos, etc.

Objetivo 1: Optimizar la tomografía eléctrica para la búsqueda de cavidades y estructuras enterradas

Uno de los objetivos principales de esta tesis es establecer una optimización del método de la tomografía eléctrica al problema concreto de localización de huecos y estructuras enterradas, y el desarrollo de una metodología que permita caracterizar las cavidades con el máximo detalle. El segundo objetivo trata la localización de muros, cimientos, soleras, etc. Se pretende establecer un fundamento teórico de interpretación experimental que permita estimar con notable fiabilidad la presencia en el subsuelo de diferentes estructuras, valorando sus principales características, tales como posición, morfología, dimensiones o tipo de relleno.

El Yacimiento Arqueológico de la ciudad romana Colonia Clunia Sulpicia, sita en Peñalba de Castro, provincia de Burgos, es un lugar idóneo para la aplicación del método de la tomografía eléctrica. El yacimiento se encuentra situado en un cerro de superficie plana, a manera de meseta cortada, con una altitud media de 1023 metros, y su potencialidad es enorme (Figura 6.1). La correcta interpretación de perfiles de tomografía eléctrica puede permitir la localización de cavidades, aljibes o galerías, así como construcciones enterradas y pozos.

Para llevar a cabo las investigaciones de campo fueron seleccionadas siete zonas de estudio teniendo en cuenta su potencial geoarqueológico. Con ayuda del Grupo Espeleológico de la Ribera GER se señalaron las Zonas I a IV indicando en superficie los lugares bajo los cuales se tiene la certeza de que existen cuevas. De esta manera se empleará esa referencia real para la calibración de las imágenes de resistividad obtenidas que presenten anomalías.

En cuanto a la investigación de contenidos arqueológicos, el equipo que lleva a cabo las excavaciones señaló tres zonas de estimable potencial arqueológico, que se

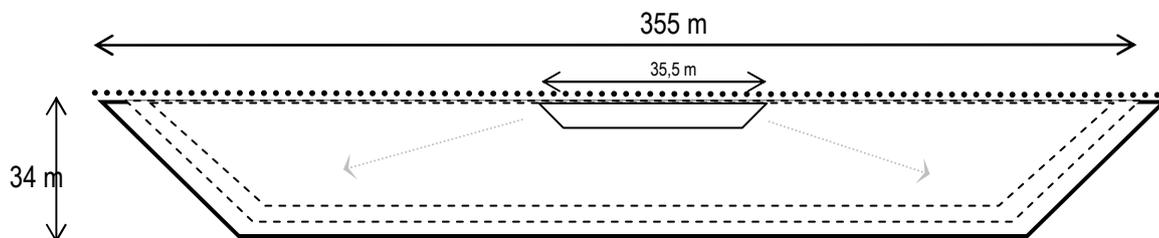
denominarán en este capítulo como "Zona Ruinas Termas", "Zona Muro enterrado" y "Zona Foro" y que hacen referencia, respectivamente, a las ruinas de las termas Los arcos II, a unos muros enterrados de una antigua edificación y a muros enterrados en el Foro de la ciudad romana.

Para llevar a cabo los objetivos principales anteriormente expuestos se planificaron perfiles de detalle sobre las zonas previstas utilizando dos configuraciones de electrodos distintas: dispositivo Schlumberger-Wenner y dispositivo Dipolo-dipolo respectivamente.

ZONAS I Y II: PERFILES DE GRAN DETALLE PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPACIADO ÓPTIMO

En las Zonas I y II se diseñaron 20 perfiles de tomografía para cada zona, 10 con dispositivo Schlumberger-Wenner y 10 con dispositivo Dipolo-dipolo, utilizando un espaciado interelectrónico de 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; 2,5 m; 3 m; 3,5 m; 4 m; 4,5 m y 5 m para cada uno de esos dispositivos. Al combinar 72 electrodos el perfil de máxima separación entre electrodos (5 m) alcanzará una longitud de investigación de 355 m entre el electrodo 1 y el 72.

EJECUCIÓN DE PERFILES DE TOMOGRAFÍA CON ESPACIADO INTERELECTRÓNICO CRECIENTE



710 electrodos separados 0,5 m. Esto permite realizar 20 perfiles con las siguientes configuraciones y espaciado interelectrónico:

a.- 10 perfiles con dispositivo Schlumberger –Wenner

- a.1.- Perfil de 72 electrodos con separación de 0.5 m. Longitud total 35.5 m. Profundidad 3,9 m
- a.2.- Perfil de 72 electrodos con separación de 1,0 m. Longitud total 71 m. Profundidad 7,9 m
- a.3.- Perfil de 72 electrodos con separación de 1.5 m. Longitud total 106.5 m. Profundidad 11,8 m
- a.4.- Perfil de 72 electrodos con separación de 2.0 m. Longitud total 142 m. Profundidad 15,8 m
- a.5.- Perfil de 72 electrodos con separación de 2.5 m. Longitud total 177.5 m. Profundidad 19,7 m
- a.6.- Perfil de 72 electrodos con separación de 3.0 m. Longitud total 213 m. Profundidad 23,6 m
- a.7.- Perfil de 72 electrodos con separación de 3.5 m. Longitud total 248.5 m. Profundidad 27,6 m

- a.8.- Perfil de 72 electrodos con separación de 4.0 m. Longitud total 284 m. Profundidad 31,5 m
- a.9.- Perfil de 72 electrodos con separación de 4.5 m. Longitud total 319.5 m. Profundidad 30,4 m
- a.10.- Perfil de 72 electrodos con separación de 5.0 m. Longitud total 355 m. Profundidad 33,8 m

b.- 10 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo

- b.1.- Perfil de 72 electrodos con separación de 0.5 m. Longitud total 35.5 m. Profundidad 2,3 m
- b.2.- Perfil de 72 electrodos con separación de 1,0 m. Longitud total 71 m. Profundidad 4,6 m
- b.3.- Perfil de 72 electrodos con separación de 1.5 m. Longitud total 106.5 m. Profundidad 6,9 m
- b.4.- Perfil de 72 electrodos con separación de 2.0 m. Longitud total 142 m. Profundidad 9,2 m
- b.5.- Perfil de 72 electrodos con separación de 2.5 m. Longitud total 177.5 m. Profundidad 11,5 m
- b.6.- Perfil de 72 electrodos con separación de 3.0 m. Longitud total 213 m. Profundidad 13,9 m
- b.7.- Perfil de 72 electrodos con separación de 3.5 m. Longitud total 248.5 m. Profundidad 16,2 m
- b.8.- Perfil de 72 electrodos con separación de 4.0 m. Longitud total 284 m. Profundidad 18,5 m
- b.9.- Perfil de 72 electrodos con separación de 4.5 m. Longitud total 319.5 m. Profundidad 24,2 m
- b.10.- Perfil de 72 electrodos con separación de 5.0 m. Longitud total 355 m. Profundidad 26,9 m

Objetivo 2: Localización de cavidades subterráneas, oquedades y otras discontinuidades en el subsuelo.

La ciudad romana se asienta sobre un cerro calizo sin presencia de acueductos ni sistemas de elevación de agua (Figura 6.1). El abastecimiento de agua en la ciudad se resolvía mediante la captación de las aguas subterráneas contenidas en el acuífero kárstico del subsuelo. La aplicación de la tomografía eléctrica a este emplazamiento permitirá descubrir nuevas cavidades de su entramado de galerías y cavernas que los romanos utilizaron para la extracción de agua.

El Grupo Espeleológico Ribereño de Aranda de Duero ha topografiado una parte de esas galerías. Dicha información ha sido de gran utilidad para la calibración del método y la posterior interpretación de los perfiles resultantes. Las galerías rellenas de arcilla o agua dan una respuesta eléctrica conductora, mientras que las galerías rellenas de aire destacan por sus altos valores de resistividad. Se han podido localizar nuevas galerías de este entramado kárstico pero aún es necesaria una campaña mucho mayor para poder determinar su verdadera extensión.

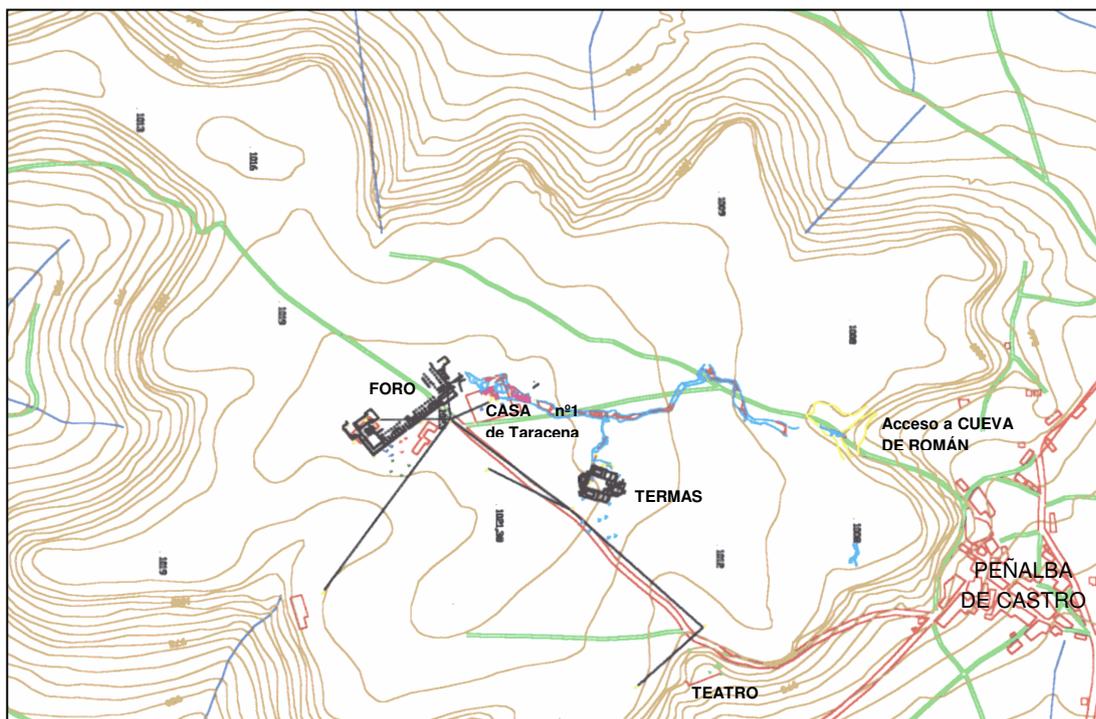


Figura 6.1. Mapa de situación de Colonia Clunia Sulpicia. Se han señalado los lugares más significativos de las excavaciones

ZONAS III Y IV: PERFILES PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES

Una vez interpretados los resultados de las Zonas I y II se investigaron estas nuevas zonas definiendo previamente el espaciado interelectródico más adecuado para cada caso en función del tamaño y profundidad de las cavidades a detectar.

En la Zona III se diseñaron y dos perfiles 1 con dispositivo Schlumberger-Wenner y 1 con dispositivo Dipolo-dipolo, utilizando un espaciado interelectródico de 5 m para cada uno de esos dispositivos. Se combinaron 72 electrodos que alcanzaron una longitud de investigación de 355 m y una profundidad máxima de 45,6 m para Schlumberger-Wenner y 35,8 m para Dipolo-dipolo.

En la Zona IV se diseñaron y dos perfiles 1 con dispositivo Schlumberger-Wenner y 1 con dispositivo Dipolo-dipolo, utilizando un espaciado interelectródico de 3 m para cada uno de esos dispositivos. Para el dispositivo Schlumberger-Wenner se combinaron 54 electrodos con una longitud de investigación de 156 m y una profundidad máxima de 31,5 m. Para el Dipolo-dipolo se combinaron 36 electrodos con una longitud de investigación de 100 m y una profundidad máxima de 16,2 m.

Objetivo 3: Interpretación de perfiles de Tomografía Eléctrica con un enfoque arqueológico

Otro de los objetivos principales es la localización y detección de restos arqueológicos de época romana. Se han seleccionado tres zonas con posible contenido de estructuras arquitectónicas de antiguas construcciones, una junto a las Termas "Los Arcos", otra junto al Foro y otra aleatoria en un área que todavía no había sido estudiada.

Se han localizado anomalías positivas de resistividad que se interpretan como sillares o muros construidos en roca caliza enterrados y rodeados por un suelo arcilloso con propiedades geoelectricas más conductoras.

También se analiza la distribución de esas anomalías, que tratándose de edificación se puede prever que presenten un orden geométrico.

Se han diseñado perfiles de tomografía eléctrica de espaciado entre electrodos 0,5 m y 1 m, y además se han duplicado los perfiles tomando mediciones con dos equipos diferentes: SYSCAL Switch R1 que combina 36 electrodos y SYSCAL KID que combina 24 electrodos.

Los resultados son del todo satisfactorios, habiendo detectado en las tres zonas de estudio unas claras anomalías resistivas en posición superficial que son interpretadas como muros enterrados. La calibración del método se llevó a cabo en la primera zona estudiada (Zona Ruinas Termas).

En resumen, el trabajo desarrollado ha consistido en realizar 56 perfiles de tomografía, distribuidos en las siguientes zonas (ver figura 6.2 y anexo III):

Zona I: 20 perfiles, 10 con dispositivo dipolo-dipolo y otros 10 con dispositivo Schlumberger-Wenner. Los 10 perfiles realizados con cada dispositivo se han llevado a cabo con las siguientes separaciones de electrodos: 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m, 4.5 m y 5 m.

Zona II: 20 perfiles, 10 con dispositivo dipolo-dipolo y otros 10 con dispositivo Schlumberger-Wenner. Los 10 perfiles realizados con cada dispositivo se han llevado a cabo con las siguientes separaciones de electrodos: 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m, 4.5 m y 5 m.

Zona III: 2 perfiles, 1 con dispositivo dipolo-dipolo y 1 con dispositivo Schlumberger-Wenner, ambos con separación entre electrodos de 5 m.

Zona IV: 2 perfiles, 1 con dispositivo dipolo-dipolo y 1 con dispositivo Schlumberger-Wenner, ambos con separación entre electrodos de 5 m.

Zona Ruinas Termas: 4 perfiles, 2 con dispositivo dipolo-dipolo y 2 con dispositivo Schlumberger-Wenner, con separación entre electrodos de 0,5 m. 2 con equipo SYSCAL R1 y 2 con equipo SYSCAL KID.

Zona Muro enterrado: 6 perfiles, 3 con dispositivo dipolo-dipolo y 3 con dispositivo Schlumberger-Wenner, con separación entre electrodos de 1 m y 0,5 m. 4 con equipo SYSCAL R1 y 2 con equipo SYSCAL KID.

Zona Foro: 2 perfiles, 1 con dispositivo dipolo-dipolo y 1 con dispositivo Schlumberger-Wenner, con separación entre electrodos de 1 m, con equipo SYSCAL KID.

CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES DISEÑADOS

Los perfiles que se han realizado tienen las mismas características:

Longitud: Variable, entre 35.5 m y 355 m para el equipo SYSCAL R1 Switch 72; y entre 12 m y 72 m para el SYSCAL KID Switch 24. Siempre con el centro del perfil localizado en superficie sobre el elemento subterráneo que sirva de calibración para la interpretación del perfil a estudiar.

Separación entre electrodos: 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m, 4.5 m y 5 m.

Número de electrodos por perfil: 72, 56 ó 32 para el SYSCAL R1; y 24 para el SYSCAL KID.

Dispositivo de medida: Schlumberger-Wenner y Dipolo-dipolo

Número de niveles de medida por perfil: entre 40 y 60 para SYSCAL R1; y entre 7 y 9 para el SYSCAL KID

Número de cuadripolos de medida por perfil: entre 500 y 1.100 para SYSCAL R1; y entre 94 y 164 para SYSCAL KID.

Equipos empleados: SYSCAL R1 SWITCH 72 y SYSCAL KID SWITCH 24

Fabricante: IRIS INSTRUMENTS (Orleáns, Francia)

Programa de procesado: RES2DINV, versión 3.47a y versión 3.49.

Subprogramas: Electre II y Prosys.

UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS PERFILES

Los perfiles se han distribuido con el centro de cada uno de ellos en la posición de cada uno de los dos objetivos estudiados. En la figura 2 se ha representado un esquema de la posición de los perfiles.

CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

Como garantía de calidad se ha empleado una doble actuación. Por un lado, se han realizado los perfiles con el mayor número de puntos de medición posibles ya que se ha indicado en la creación de las secuencias de medida que se registrarán todas las capas de medida posibles. Esto da una mayor seguridad a la hora de realizar interpretaciones ya que la resolución es muy importante.

Por otro lado, se seleccionó en el equipo de medida un dispositivo de repetición de medidas (*stacking*) que obligaba a medir un mínimo de tres veces cada medida y aportaba el porcentaje de error registrado, que lo calcula a partir de la comparación de las distintas medidas hechas. Este porcentaje de error siempre ha oscilado entre 0% y 1%. Cuando, de manera puntual, aumentaba por encima del 3%, el equipo debía medir hasta 6 veces para promediar la medida realizada.

Con este dispositivo de *stacking* se controla el posible porcentaje de error y se reduce mediante el promediado de las medidas que lo requiriesen.

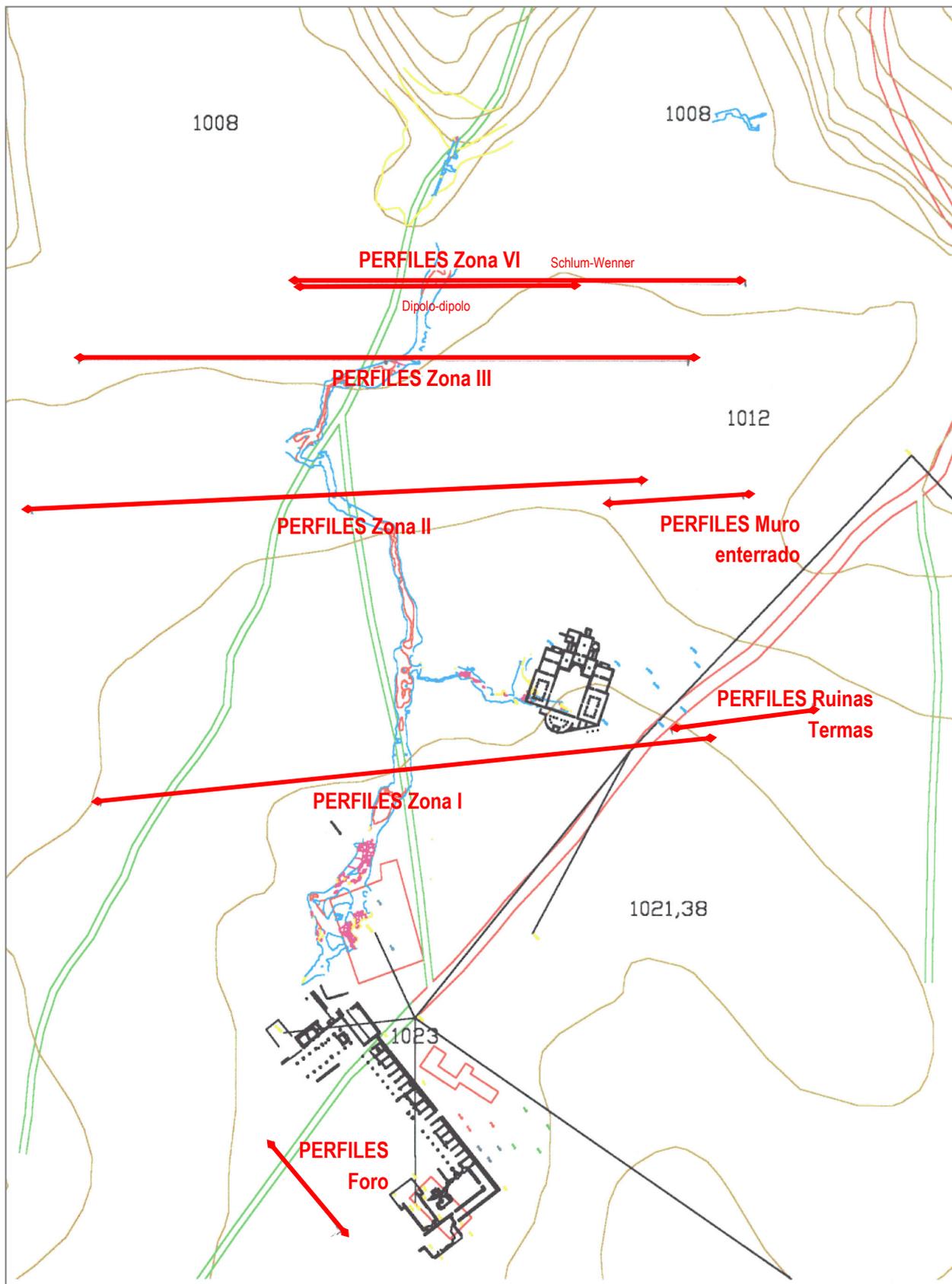


Figura 6.2. Esquema de la distribución de perfiles de tomografía

6.3 ENCUADRE GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

ESTRATIGRAFÍA E HIDROGEOLOGÍA DE LOS MATERIALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra incluida en el Subsistema Este Acuífero Terciario del Duero, en su parte oriental (Junta de Castilla y León, 1995). Geológicamente pertenece a la serie detrítico-carbonatada del Páramo superior.

En el asentamiento y sus zonas aledañas afloran las calizas que coronan la serie terciaria del Mioceno superior. Se trata de calizas micríticas, en ocasiones brechificadas, cuya potencia oscila entre 5 y 15 metros. Bajo las calizas, se encuentra en la serie un tramo de lutitas con intercalaciones de cuerpos lenticulares arenosos que, progresivamente, dan paso a costras carbonatadas donde se suceden las calizas miocenas anteriormente descritas.

En este sentido, todo apunta a que la ciudad romana se encuentra ubicada en un terreno muy favorable para el desarrollo de acuíferos kársticos sobre formaciones carbonatadas y acuíferos detríticos confinados en los lentejones arenosos. La recarga se produce de manera directa por infiltración del agua de las precipitaciones en el afloramiento permeable. La descarga tiene lugar a través de manantiales y aportes directos a los cauces de los ríos Arandilla y Fuente Gadea.

TECTÓNICA

Por tratarse de rocas terciarias el desarrollo de estructuras tectónicas es escaso. Encontramos una familia de fracturas con dirección Norte-Sur a favor de las cuales ha progresado la carbonatación de la caliza generando el sistema kárstico que ahora se pretende investigar. Son fracturas sin apenas desplazamiento relativo entre bloques. También se observa otra familia de fracturas de dirección N45E de menor importancia.

6.4 RESULTADOS

Los resultados que se pueden extraer de los datos obtenidos en campo y posteriormente procesados e interpretados se van a desarrollar a continuación agrupados en apartados correspondientes a cada uno de los objetivos perseguidos. Se describirán los perfiles correspondientes a cada una de las Zonas estudiadas y se valorará la mayor o menor eficiencia de las distintas configuraciones de electrodos. También se hará la descripción de los resultados según se refiera a los perfiles registrados con dispositivo Schlumberger-Wenner o con Dipolo-Dipolo.

Por lo que respecta a los perfiles, en cada uno de ellos (Anexo I) se puede ver una distribución de colores que reflejan los distintos valores de resistividad de las formaciones analizadas: colores azulados para los materiales más conductores (predominio de arcillas y de margas) y colores marrones, naranjas y rojos para los materiales más resistivos (calizas).

La carta de colores que se presenta en la parte inferior de cada perfil (Anexo I) es específica de cada uno de ellos por lo que deben consultarse los valores de resistividad localizados en la parte baja de los mismos.

Litologías

En cuanto a los valores de resistividad se puede hacer una atribución de unos tramos de valores propios de cada material:

Los materiales caracterizados por una baja resistividad (valor de resistividad aproximada: $\rho = 10-50$ ohm.m) son materiales de naturaleza predominantemente arcillosa y margosa. En este caso se trata de las margas y arcillas que se disponen tanto por debajo como por encima de las calizas.

Los materiales caracterizados por una alta resistividad (valor de resistividad aproximada: $\rho > 200$ ohm.m) son materiales que corresponden a los tramos de calizas, la roca más compacta que aflora en la zona estudiada. Las distintas formas de presentarse estas calizas, en cuanto a su mayor o menor contenido en margas o su carácter más o menos fracturado o la presencia o no de cavidades, son las que van a condicionar distintos valores de resistividad de esta litología, llegando a descender por debajo de los 100 ohm.m cuando se trata de una caliza muy margosa o está fracturada y presenta circulación de fluidos.

Contactos

Los contactos se establecen en la zona de inflexión, entre los valores más altos y más bajos ya que es la profundidad que este tipo de prospección marca los cambios de resistividad y, consecuentemente, de litologías.

Fracturas

Al ser las calizas el material más rígido de los presentes en la zona de estudio, va a ser en el que se manifiestan las fracturas. Estas fracturas dejan su impronta al interrumpir la tendencia continua de las isolíneas de valores altos de resistividad. Como las fracturas suelen ser vías de circulación de agua subterránea y de acumulación de arcillas, ambos aspectos hacen disminuir la resistividad general de la unidad de calizas y causan ese descenso en los valores.

Por lo tanto, además de dar indicaciones de las litologías detectadas en el subsuelo y sus espesores y tendencias, también se da indicación de la presencia de las fracturas en la descripción de cada perfil.

6.4.1 PERFILES Zona I

Se presentan a continuación los resultados más destacados de los perfiles realizados para cubrir la Zona I. La calibración de la Zona I es posible gracias a que conocemos la existencia de una cueva con disposición horizontal situada bajo nuestros perfiles. Las dimensiones aproximadas de esa cavidad son 10 m de anchura y 3 m de altura y está localizada a una profundidad de 25 m. Se sabe que la cavidad está parcialmente rellena de agua, por lo que es probable que su comportamiento sea conductor. La posición en superficie se ha calculado en el centro de cada uno de los perfiles. Para perfiles con separación interelectrónica 5 m corresponde con la distancia 175 m desde el electrodo nº1 (situado a la izquierda). El diámetro medio del hueco es $D_h = (10+3)/2 = 6,5$ m. La galería se encuentra a una profundidad $P = 25$ m, por lo que $P = 3,8D_h$ ($25/6,5$)

6.4.1.1 Zona I – Dispositivo Schlumberger-Wenner

Se han realizado 10 perfiles con dispositivo Schlumberger-Wenner con separación de electrodos creciente de medio metro en medio metro desde 0.5 hasta 5 m. (ver anexo III)

Profundidades alcanzadas

Los perfiles realizados con el dispositivo Schlumberger-Wenner se han diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía desde 4 m (para separación de electrodos de 0.5 m) hasta 34 m (para una separación de electrodos de 5 m).

A continuación se analiza el perfil correspondiente a $D_{el} = 5$ m debido a que es el que más profundiza. Para este caso $D_{el}/D_h = 5/6,5$. La galería se encuentra a una profundidad $P = 25$ m, por lo que $P = 3,8D_h$.

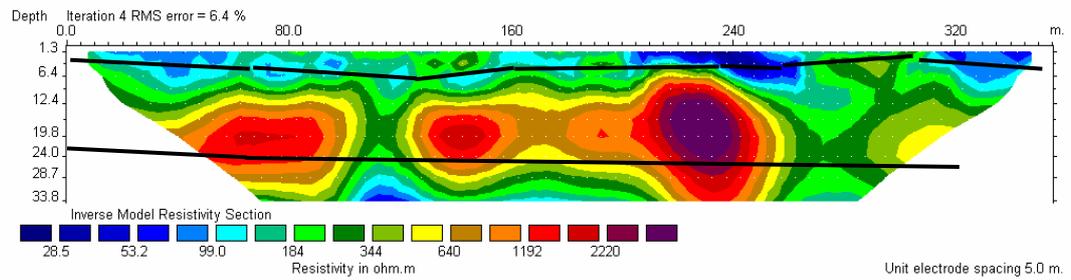
Materiales

Los materiales analizados en estos perfiles de la Zona I presentan una tendencia a la disposición subhorizontal y se encuentran agrupados en tres capas principales (observables en los perfiles que alcanzan más profundidad) cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que, de manera puntual, podría superar los 2 m.

Una segunda capa, atribuible a los materiales de naturaleza calcárea, con espesores cercanos y algo superiores a 20 m.

Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a las margas infrayacentes de la unidad de calizas.



En la figura adjunta se observan dos líneas que marcan los contactos entre las tres unidades litológicas anteriormente mencionadas y descritas.

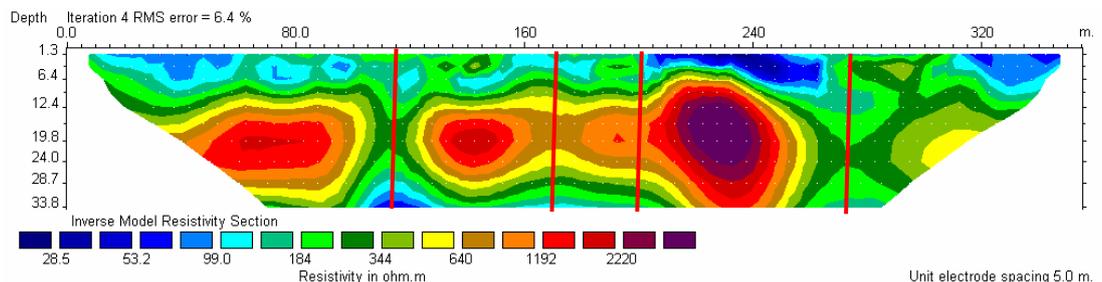
Anomalías

La unidad de calizas presenta continuidad lateral pero afectada por la presencia de interrupciones locales debido a la existencia de fracturas o de lo que se ha interpretado como cavernas.

Las fracturas se identifican en los puntos de interrupción de las anomalías resistivas al ser estas anomalías las que definen la presencia de los materiales compactos.

La interrupción en la alta resistividad se debe a que existe una discontinuidad por la cual ha podido circular agua y ha disuelto parte del material dejando incluso depósitos arcillosos en las juntas lo que hace disminuir la resistividad y definir así la presencia de la fractura.

Por lo que respecta a las fracturas, se han identificado 4 principales que atraviesan los materiales con una tendencia bastante verticalizada y que se han representado a modo de ejemplo en la figura adjunta.



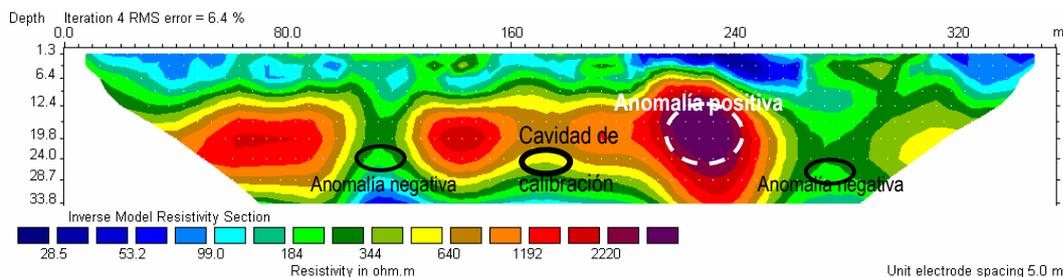
Respecto a la detección de cavidades y su caracterización, se ha observado que existen unas zonas anómalas en los perfiles de tomografía que permiten atribuirlos a posibles cavidades debido a los altos valores de resistividad que presentan.

Las cavidades de dimensiones importantes, desde varios metros hasta decamétricas, pueden dar una respuesta diferente en virtud de los materiales que las rellenen. Esto se

debe a que, según la fórmula de Heiland vista en el apartado 3.3 (fórmulas 4.4 y 4.5). La resistividad del fluido que rellena los poros (las cavidades) influye en gran medida en el valor final de resistividad. Así, unas cavidades con aire tendrán una elevada resistividad debida precisamente al carácter dieléctrico de ese aire.

Por esta razón habrá que analizar con mucha cautela los perfiles para identificación de cavidades.

En el caso de la Zona I se observa una clara anomalía de alta resistividad (> de 2200 ohm.m) que parece una evidencia clara de hueco resistivo en el sector derecho de los perfiles, a distancia 230. Es una anomalía que distorsiona de manera importante los valores más normales de la propia caliza en la que se encuentra, que podrían rondar los 650 ohm.m.



En el perfil que se ve de forma completa es en el de máxima profundización, apreciándose que hay una posible cavidad que da respuesta aproximadamente entre 12 m (techo) y 25 m (base).

La cavidad que se ha empleado como calibración del perfil se encuentra a 175 m de distancia y se sabe que esta parcialmente rellena de agua y tiene unas dimensiones de 10 m x 3 m. La sección de resistividad tan sólo manifiesta en este punto una suave inflexión de las isolíneas de resistividad 640 ohm.m en forma de joroba a profundidad 20-25 m. Esta curvatura convexa hacia arriba representa un hueco conductor, como se pudo ver en las experiencias 3 y 5 del subcapítulo 5.3. Siguiendo este criterio se pueden identificar otras dos anomalías conductoras con forma convexa hacia arriba a similar profundidad y distancias 110 m y 275 m respectivamente.

No obstante, la manera de poder ir ajustando la presencia de las cavidades es analizando los distintos perfiles que se han realizado para cubrir este objetivo (ver anexo III), cada uno de ellos con una separación distinta de electrodos con el fin de profundizar de distinta manera y “jugar” con la relación resolución / profundidad.

Al observar, por tanto los distintos perfiles de la Zona I se ve que hay reflejo de la señal que produce la anomalía resistiva a la derecha ya desde el tercer perfil, con 72

electrodos separados 1.5 m entre sí, aproximadamente a 8 m de profundidad, donde los valores ya alcanzan los 1.000 ohm.m.

Por lo que respecta a la base de la cavidad resistiva, es en el quinto perfil, con separación de 2.5 m entre electrodos, en el que aparece por primera vez la anomalía resistiva de forma completa (la anomalía está cerrada), lo que define una profundidad para la misma de, aproximadamente, 20 m desde superficie.

Para la anomalía positiva con espaciado de 5 m se tienen los siguientes datos:
 $D_h = 13$ m. $D_{el}/D_h = 5/6,5$. $P = 12$ m, por lo que $P = 0,9D_h$

Para las anomalías negativas con espaciado de 5 m se tienen los siguientes datos:

1-Anomalía a distancia 110m: $D_h = 8$ m. $D_{el}/D_h = 5/8$. $P = 25$ m, por lo que $P = 3,1D_h$

2-Anomalía a distancia 175m (cavidad de calibración): $D_h = 6,5$ m. $D_{el}/D_h = 5/6,5$.
 $P = 25$ m, por lo que $P = 3,8D_h$

3-Anomalía a distancia 275m: $D_h = 7$ m. $D_{el}/D_h = 5/7$. $P = 25$ m, por lo que $P = 3,5D_h$

6.4.1.2 Zona I – Dispositivo Dipolo-dipolo

Se han realizado 10 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo con separación de electrodos creciente de medio metro en medio metro desde 0.5 hasta 5 m. (ver anexo III)

Profundidades alcanzadas

Los perfiles realizados con el dispositivo Dipolo-dipolo se han diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía desde 2.3 m (para separación de electrodos de 0.5 m) hasta 27 m (para una separación de electrodos de 5 m).

Materiales

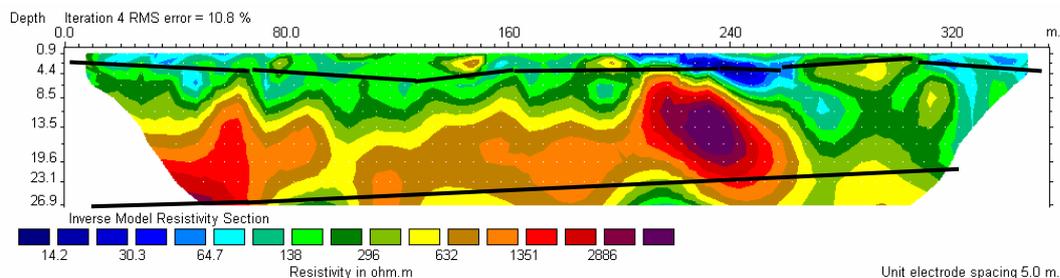
Los materiales analizados en estos perfiles de la Zona I presentan una tendencia a la disposición ligeramente subhorizontal pues las superficies horizontales con este dispositivo están marcadas por multitud de distorsiones.

Al profundizar menos estos perfiles, sólo alcanzan a agruparse en dos capas principales (observables en los perfiles que alcanzan más profundidad) cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con un espesor que, de manera puntual, podría superar los 2 m.

Una segunda capa, atribuible a los materiales de naturaleza calcárea, con espesores cercanos y algo superiores a 20 m.

La tercera capa, la capa inferior, que correspondería a las margas infrayacentes de la unidad de calizas, apenas deja constancia de su presencia, salvo en algún punto del sector central del perfil más profundo.



En la figura adjunta se observan dos líneas que marcan los contactos entre las tres unidades litológicas anteriormente mencionadas y descritas.

Anomalías

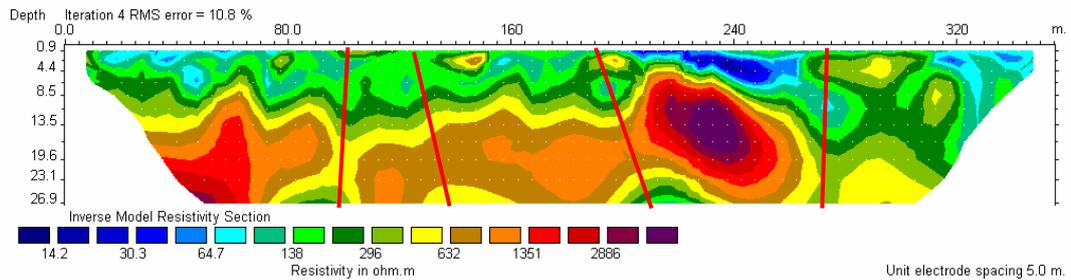
La unidad de calizas presenta continuidad lateral pero afectada por la presencia de interrupciones locales debido a la existencia de fracturas o de lo que se ha interpretado como cavernas.

Las fracturas se identifican en los puntos de interrupción de las anomalías resistivas al ser estas anomalías las que definen la presencia de los materiales compactos.

La interrupción en la alta resistividad se debe a que existe una discontinuidad por la cual ha podido circular agua y ha disuelto parte del material dejando incluso depósitos arcillosos en las juntas lo que hace disminuir la resistividad y definir así la presencia de la fractura.

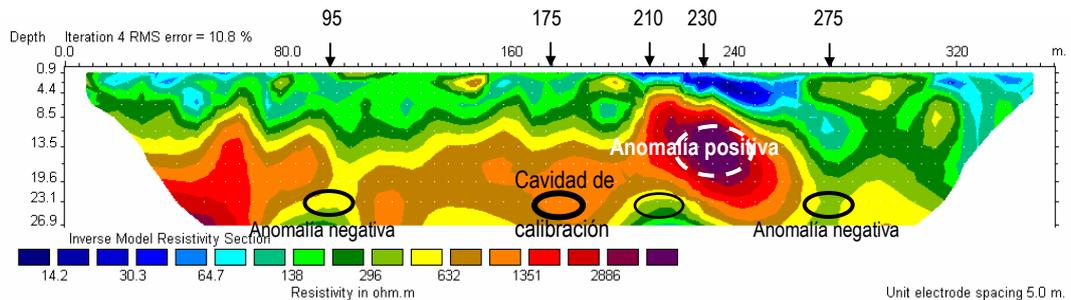
Por lo que respecta a las fracturas, se han identificado 4 principales que atraviesan los materiales con una tendencia no tan verticalizada como se identificaba en los perfiles con el dispositivo Schlumberger-Wenner. Estas fracturas se han representado a modo de ejemplo en la figura adjunta.

La segunda fractura desde el inicio del perfil es la que no coincide en posición e inclinación con la detectada con el otro dispositivo. La tercera fractura se interpreta aquí con una cierta inclinación, no apreciada en el caso del otro dispositivo.



Respecto a la detección de cavidades y su caracterización, se ha observado que existen unas zonas anómalas en los perfiles de tomografía que permiten atribuir las a posibles cavidades debido a los valores de resistividad y formas características que presentan.

Destaca una clara anomalía de alta resistividad (> de 2800 ohm.m) en el sector derecho de los perfiles. Es una anomalía que distorsiona de manera importante los valores más normales de la propia caliza en la que se encuentran en torno a los 650 ohm.m.



En el perfil de máxima separación de electrodos ($D_h = 5$ m) a distancia 230 m se aprecia la anomalía positiva de forma cerrada casi circular, apreciándose que hay una posible cavidad que da respuesta aproximadamente entre 10 m (techo) y 20 m (base).

No obstante, la manera de poder ir ajustando su presencia es analizando los distintos perfiles que se han realizado para cubrir este objetivo (anexo III), cada uno de ellos con una separación distinta de electrodos con el fin de profundizar de distinta manera y “jugar” con la relación resolución / profundidad.

Al observar, por tanto los perfiles realizados en la Zona I con diferente separación de electrodos (D_{el}) se ve que hay reflejo de la señal que produce la anomalía derecha ya desde el tercer perfil, con 72 electrodos separados 1.5 m entre sí, aproximadamente a 7 m de profundidad, donde los valores ya superan los 20.000 ohm.m.

Por lo que respecta a la base de la cavidad resistiva, es en el noveno perfil, con separación de 4.5 m entre electrodos, en el que aparece por primera vez la anomalía

resistiva de forma completa (la anomalía está cerrada). Para este perfil $D_{el}=4,5$ m se define la base de la cavidad a una profundidad de aproximadamente 20 m desde superficie. Su techo es detectado en el perfil $D_{el}=1,5$ m a profundidad 7 m.

Para la anomalía positiva con espaciado de 5 m se tienen los siguientes datos:

$D_h=10$ m. $D_{el}/D_h=5/6,5$. $P=10$ m, por lo que $P=D_h$

Las anomalías negativas aparecen a 95 m, 215 m y 275 m respectivamente, y tienen forma de inflexión de baja resistividad convexa hacia arriba. A diferencia del perfil obtenido mediante dispositivo Schlumberger-Wenner, en este caso la galería de calibración situada a distancia 175 m no se refleja en este perfil como anomalía negativa, o parece haberse desplazado hacia la derecha a posición 215 m. En su lugar aparece lo contrario, una inflexión convexa hacia abajo con valores de 1000 ohm.m de resistividad. Se puede explicar esto entendiendo que el dispositivo Dipolo-dipolo profundiza menos y que es principalmente sensible a zona superior de la cavidad, que está rellena de aire.

Para las anomalías negativas con espaciado de 5 m se tienen los siguientes datos:

1-Anomalía a distancia 95 m: $D_h=8$ m. $D_{el}/D_h=5/8$. $P=25$ m, por lo que $P=3,1D_h$

2-Anomalía a distancia 175 m (cavidad de calibración): No se aprecia anomalía en la zona de la cavidad de calibración.

3-Anomalía a distancia 210 m: $D_h=8$ m. $D_{el}/D_h=5/8$. $P=25$ m, por lo que $P=3,1D_h$

4-Anomalía a distancia 275 m: $D_h=7$ m. $D_{el}/D_h=5/7$. $P=25$ m, por lo que $P=3,5D_h$

6.4.2 PERFILES Zona II

Se presentan a continuación los resultados más destacados de los perfiles realizados para cubrir la Zona II. El elemento de calibración en la Zona II es una cueva con disposición horizontal, con unas dimensiones aproximadas de 10 m de anchura y 4 m de altura y que está localizada a una profundidad cercana a 20 m. Esta cueva está conectada con la superficie mediante una chimenea vertical de casi 2 m de diámetro y con relleno fragmentos, escombros y derrubios. La posición en superficie de este Objetivo II se ha calculado en el centro de cada uno de los perfiles (a 175 m de distancia) y coincide con la posición del pozo vertical.

6.4.2.1 Zona II – Dispositivo Schlumberger Wenner

Se han realizado 10 perfiles con dispositivo Schlumberger-Wenner con separación de electrodos creciente de medio metro en medio metro desde 0.5 hasta 5 m. (ver anexo III)

Profundidades alcanzadas

Los perfiles realizados con el dispositivo Schlumberger-Wenner se han diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía desde 4 m (para separación de electrodos de 0.5 m) hasta 34 m (para una separación de electrodos de 5 m).

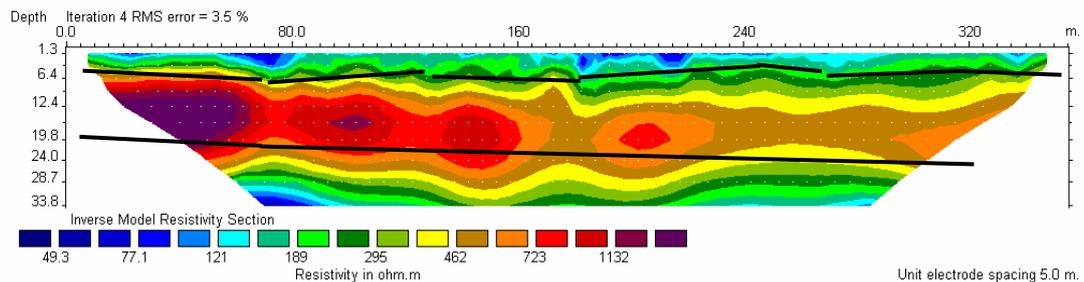
Materiales

Los materiales analizados en estos perfiles de la Zona II presentan una tendencia a la disposición subhorizontal y se encuentran agrupados en tres capas principales (observables en los perfiles que alcanzan más profundidad) cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con reducido espesor aunque, de manera puntual, podría alcanzar los 2 m.

Una segunda capa, atribuible a los materiales de naturaleza calcárea, con espesores cercanos y algo superiores a 20 m.

Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a las margas infrayacentes de la unidad de calizas.



En la figura adjunta se observan dos líneas que marcan los contactos entre las tres unidades litológicas anteriormente mencionadas y descritas.

Anomalías

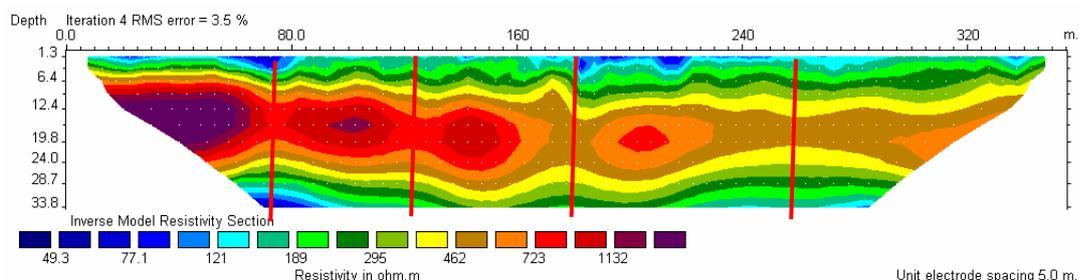
La unidad de calizas presenta continuidad lateral pero afectada por la presencia de interrupciones locales debido a la existencia de fracturas, asociadas a las cuales se ha interpretado la existencia de cavernas.

Las fracturas se identifican en los puntos de interrupción de las anomalías resistivas al ser estas anomalías las que definen la presencia de los materiales compactos, es decir, las calizas.

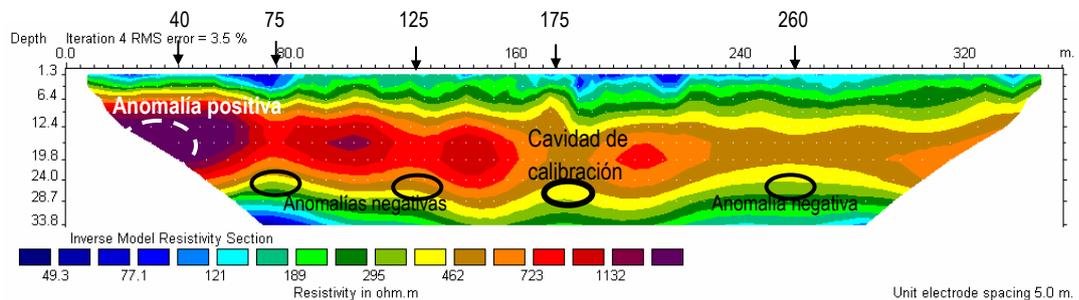
La interrupción en la alta resistividad se debe a que existe una discontinuidad por la cual ha podido circular agua disolviendo parte del material y dejando, incluso, depósitos arcillosos en las juntas. La presencia de estos minerales arcillosos y de

agua es lo que hace disminuir la resistividad, permitiendo identificar así la presencia de la fractura.

Por lo que respecta a éstas fracturas, se han identificado cuatro principales que atraviesan los materiales con una tendencia bastante verticalizada y que se han representado a modo de ejemplo en la figura adjunta.



Respecto a la detección de cavidades y su caracterización, se ha observado que existen cuatro anomalías positivas en los perfiles de tomografía. Sin embargo no se les puede atribuir la consideración de cavidades con un mínimo de garantía debido a que presentan valores de resistividad de 700 a 1100 ohm.m, algo válido por la roca caliza. Únicamente parece tener características de hueco resistivo la anomalía situada al Este del perfil a distancia 40 m.



Por otro lado la galería de calibración que se ha empleado tiene unas dimensiones de 10 m x 4 m y está situada a distancia 175 m y profundidad 20 m coincide con una zona de anomalía negativa de curvatura convexa hacia arriba tal y como ocurría en la Zona I, lo que permite relacionar este tipo de inflexiones de baja resistividad asociadas a fracturas con cavidades probables parcialmente rellenas de agua. Se han identificado cuatro inflexiones de este tipo (anomalías negativas con forma de joroba) a profundidad 20-25 m, a las siguientes distancias: 75 m, 125 m, 175 m (cavidad de calibración) y 260 m.

A partir de los datos de la anomalía negativa a distancia 175 m de la zona de la cavidad de calibración se pueden deducir los siguientes datos para las cuatro cavidades: $D_h=7$ m. $D_{el}/D_h=5/7$. $P=25$ m, por lo que $P=3,5D_h$

6.4.2.2 Zona II – Dispositivo Dipolo-Dipolo

Se han realizado 10 perfiles con dispositivo Dipolo-dipolo con separación de electrodos creciente de medio metro en medio metro desde 0.5 hasta 5 m. (ver anexo III)

Profundidades alcanzadas

Los perfiles realizados con el dispositivo Schlumberger-Wenner se han diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía desde 2.3 m (para separación de electrodos de 0.5 m) hasta 27 m (para una separación de electrodos de 5 m).

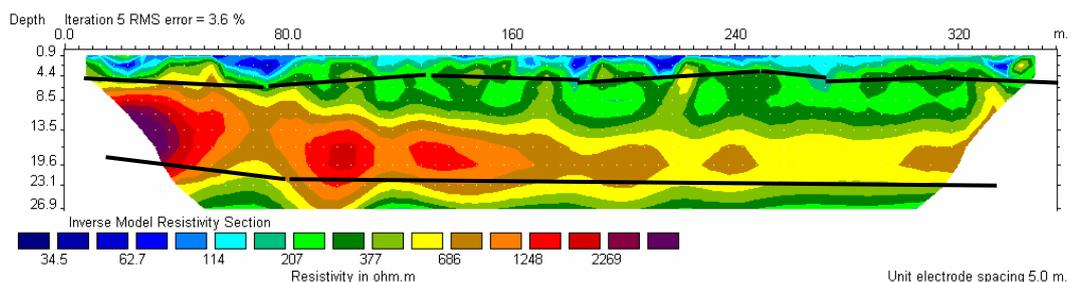
Materiales

Los materiales analizados en estos perfiles de la Zona II presentan una tendencia a la disposición subhorizontal y se encuentran agrupados en tres capas principales (observables en los perfiles que alcanzan más profundidad) cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial, de extensión generalizada a lo largo de todo el perfil, atribuible a la unidad arcillosa suprayacente, que cubre los afloramientos calcáreos, con reducido espesor aunque, de manera puntual, podría alcanzar los 2 m.

Una segunda capa, atribuible a los materiales de naturaleza calcárea, con espesores cercanos y algo superiores a 20 m.

Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a las margas infrayacentes de la unidad de calizas.



En la figura adjunta se observan dos líneas que marcan los contactos entre las tres unidades litológicas anteriormente mencionadas y descritas.

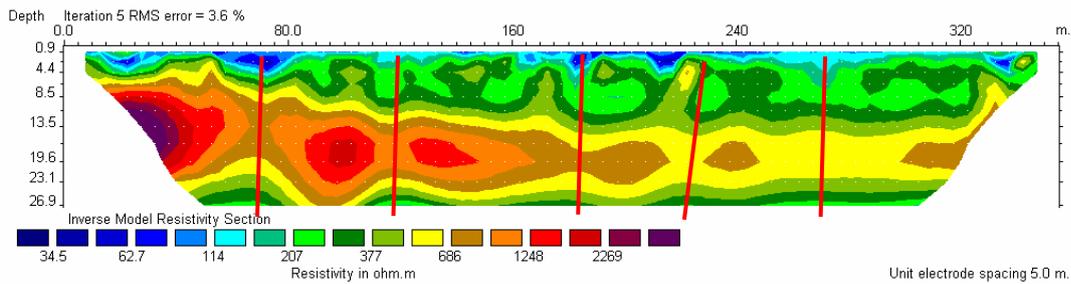
Anomalías

La unidad de calizas presenta continuidad lateral pero afectada por la presencia de interrupciones locales debido a la existencia de fracturas o de lo que se ha interpretado como cavernas.

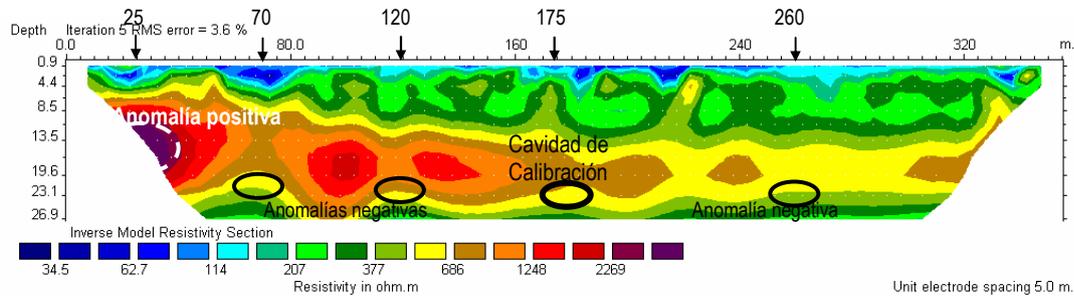
Las fracturas se identifican en los puntos de interrupción de las anomalías resistivas al ser estas anomalías las que definen la presencia de los materiales compactos, es decir, las calizas.

La interrupción en la alta resistividad se debe a que existe una discontinuidad por la cual ha podido circular agua disolviendo parte del material y dejando, incluso, depósitos arcillosos en las juntas. La presencia de estos minerales arcillosos y de agua es lo que hace disminuir la resistividad, permitiendo identificar así la presencia de la fractura.

Por lo que respecta a éstas fracturas, se han identificado las cuatro principales que atraviesan los materiales con una tendencia bastante verticalizada y que se han representado a modo de ejemplo en la figura adjunta. Además se ha determinado la existencia de otra fractura hacia la parte central del perfil.



Respecto a la detección de cavidades y su caracterización, el perfil presenta un aspecto muy similar al perfil Wenner. Existen unas zonas anómalas negativas con forma de joroba que permiten atribuirlos a posibles cavidades con agua debido a los bajos valores de resistividad que presentan y al Este del perfil, a distancia 25 m, existe una anomalía positiva que puede ser una cavidad rellena de aire debido a la anomalía positiva que presenta (> de 2200 ohm.m)



Por otro lado la galería de calibración que se ha empleado y que está situada a distancia 175 m coincide con una zona de anomalía negativa de curvatura convexa hacia arriba tal y como ocurría en la Zona I, lo que da lugar a asociar este tipo de inflexiones de baja resistividad asociadas a fracturas con cavidades probables parcialmente rellenas de agua.

Se han identificado cuatro inflexiones de este tipo (anomalías negativas con forma de joroba) a profundidad 20-25 m, a las siguientes distancias: 70 m, 120 m, 175 m (cavidad de calibración) y 260 m.

A partir de los datos de la anomalía negativa a distancia 175m de la zona de la cavidad de calibración se pueden deducir los siguientes datos para las cuatro cavidades: $D_h = 7$ m. $D_{el}/D_h = 5/7$. $P = 25$ m, por lo que $P = 3,5D_h$

6.4.3 PERFILES Zona III

La Zona III consta de un pozo vertical construido por los romanos que se une en profundidad con una galería horizontal de la cueva. El pozo tiene un diámetro de 1,85 m y una profundidad de 20 m hasta llegar a la cueva. En superficie el pozo aflora sin rellenos, pero a los 4 m de profundidad ya se encuentra relleno de derrubios hasta el fondo. Desde el interior de la cueva se puede observar el pozo a techo de la cueva y el cono de derrubios que lo rellenan. Las dimensiones de estas galerías horizontales inferiores son de 8 m de anchura y 4 m de altura y su techo se localiza a una profundidad de 20 m. En el centro de cada uno de los perfiles se encuentra ubicado el pozo vertical que conecta con las galerías. $D_h = (8+4)/2 = 6$ m.

6.4.3.1 Zona III – Dispositivo Schlumberger-Wenner

Profundidades alcanzadas

A diferencia de las zonas anteriores, en este caso se ha realizado un único perfil con el dispositivo Schlumberger-Wenner con separación entre electrodos de 5 m. La profundidad de investigación se ha aumentado hasta los 45,6 metros.

En los perfiles de las Zonas I y II se ha comprobado que el $D_{el} = 5$ m es adecuado para localizar cavidades superficiales ($P < 2,5 D_h$) rellenas de aire con D_h aproximado de 5 m, y que se pueden obtener indicios de existencia de cavidades con agua a cierta profundidad ($P > 2,5 D_h$). Esto ha sido posible gracias a la existencia de cavidades de posición y dimensión conocida que ha servido para la calibración de las anomalías.

Como la cavidad que se emplea para la calibración en esta zona se encuentra situada a P= 20-24 m y está rellena de aire se espera obtener una anomalía de resistividad positiva en ese lugar del perfil.

Materiales

Los materiales analizados en estos perfiles de la Zona III presentan una tendencia a la disposición subhorizontal y se encuentran agrupados en tres capas principales (observables en los perfiles que alcanzan más profundidad) cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial arcillosa, de extensión mucho menor que en las zonas anteriores, que cubre las calizas.

Una segunda capa, atribuible a los materiales de naturaleza calcárea, con espesores cercanos y algo superiores a 18 m.

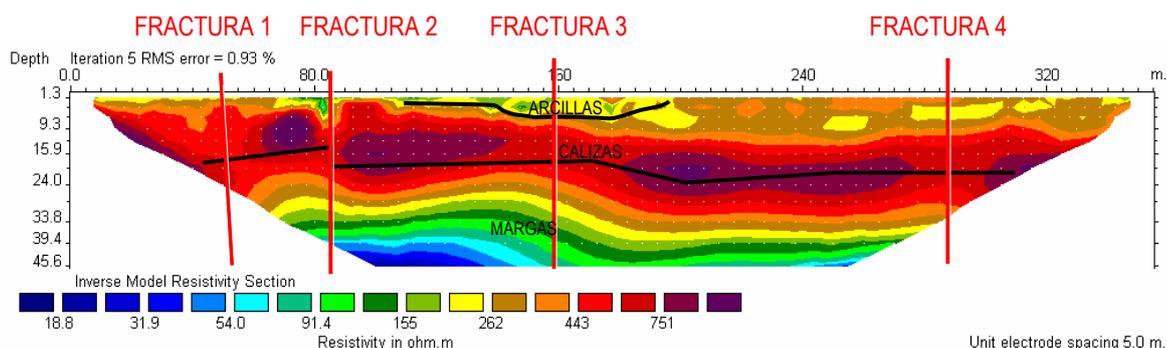
Una tercera capa, la capa inferior, que correspondería a las margas infrayacentes de la unidad de calizas.

Anomalías

Al igual que ocurre en otras zonas, la unidad de calizas presenta continuidad lateral y se encuentra afectada por fracturas que se manifiestan en el perfil como interrupciones de las franjas más resistivas. Las anomalías resistivas de forma circular se han interpretado como cavernas.

Las fracturas se identifican en los puntos de interrupción de las anomalías resistivas al ser estas anomalías las que definen la presencia de los materiales compactos, es decir, las calizas. La interrupción en la alta resistividad se debe a que existe una discontinuidad por la cual ha podido circular agua disolviendo parte del material y dejando, incluso, depósitos arcillosos en las juntas. La presencia de estos minerales arcillosos y de agua es lo que hace disminuir la resistividad, permitiendo identificar así la presencia de la fractura.

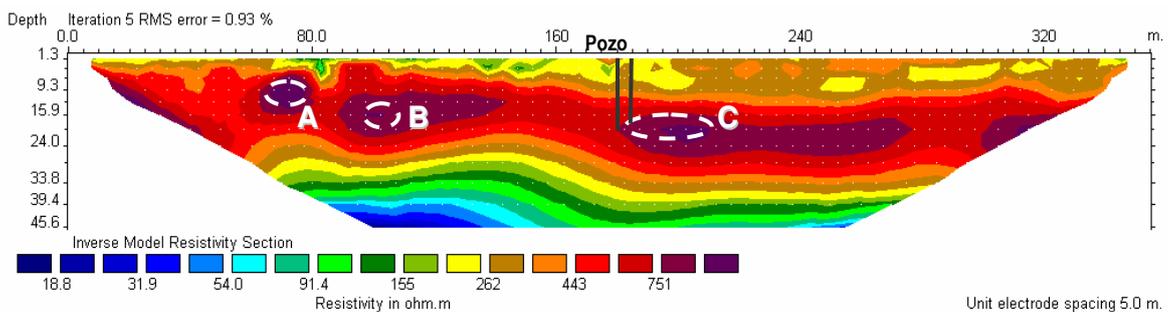
Se han identificado cuatro fallas principales verticales que afectan a la caliza y que se han representado en la figura adjunta.



La chimenea vertical que aflora en superficie y que sirvió de pozo para abastecimiento de agua en época romana no se refleja en el perfil como una anomalía muy desarrollada, debido a la presencia de oquedades laterales tiene muy poca incidencia en el perfil, como se pudo ver en la experiencia 10 del apartado 5.3.12. De cualquier modo se distingue el pozo vertical en su tramo hueco como una pequeña anomalía resistiva en la zona de arcillas.

Respecto a las cavidades se han detectado tres anomalías de gran resistividad y forma circular o elíptica.

Las cavidades localizadas al Oeste del perfil tienen pequeño diámetro (5 m aprox) y son superficiales, en torno a los 10-12 metros desde la superficie. La cavidad detectada al Este corresponde con las galerías que conectan con el pozo vertical y tienen un tamaño mayor (10 x 4 m). El abundante material arcilloso que lo rellena atenúa su anomalía eléctrica.



Las anomalías (A) y (B) detectadas al Oeste son claramente galerías con disposición transversal al perfil de tomografía, mientras que la galería central (C) tiene una orientación oblicua. En todos los casos se observan valores de resistividad próximos a 1000 ohm.m

Para (A) y (B): $D_h=3$ m. $D_{el}/D_h=5/3$. $P_A=8$ m, por lo que $P_A=2,6D_h$ y $P_B=12$ m, por lo que $P_B=4D_h$

Para (C): $D_h=6$ m. $D_{el}/D_h=5/6$. $P_c=18$ m, por lo que $P_c=3,3D_h$

6.4.3.2 Zona III – Dispositivo Dipolo-dipolo

Profundidades alcanzadas

A diferencia de las zonas anteriores, en este caso se ha realizado un único perfil con el dispositivo Dipolo-dipolo con separación entre electrodos de 5 m. La profundidad de investigación se ha aumentado hasta los 35,8 metros.

Materiales

En este perfil Dipolo-Dipolo se diferencia una capa de materiales mixtos que tienen un comportamiento eléctrico resistivo y se disponen de manera subhorizontal paralelos a la caliza. Lo interpretamos como un nivel de margocalizas que no pudo distinguir el dispositivo Schlumberger-Wenner.

Por lo tanto, en esta zona podemos distinguir cuatro capas cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial arcillosa, de extensión mucho menor que en las zonas anteriores.

Una segunda capa, se deduce a partir de la interpretación de un nivel superficial de respuesta geoeléctrica resistiva (900 ohm.m) que yace entre dos niveles conductores (de 90 a 180 ohm.m). El material resistivo se atribuye a materiales de naturaleza calcárea, por lo que deducimos que se trata de un nivel de calizas margosas intercaladas de espesor variable.

Una tercera capa es el estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles anteriores.

Una cuarta capa inferior correspondiente a las margas infrayacentes de la unidad de calizas.

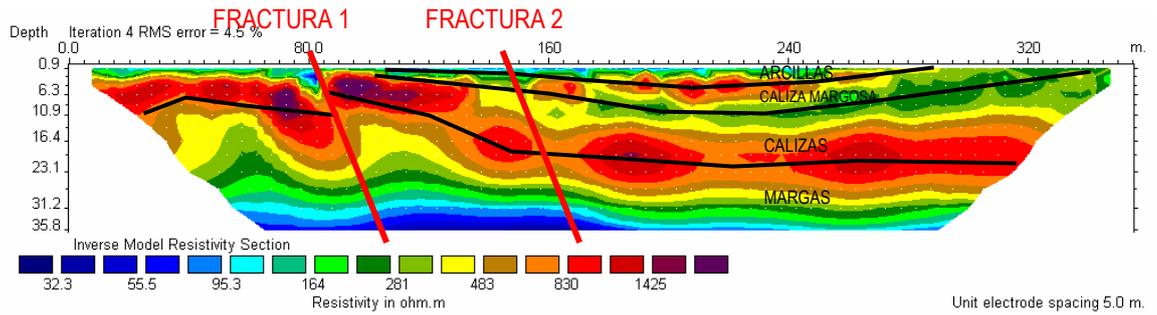
Anomalías

La capa de calizas presenta discontinuidades laterales, interrumpida por lo que interpretamos como fallas que se manifiestan en el perfil como interrupciones de las franjas más resistivas. Estas fracturas coinciden con la posición de las fracturas 1 y 2 del perfil Schlumberger-Wenner de la zona III. Sin embargo aquí no aparece la fractura 3 detectada con el dispositivo anterior.

Las anomalías resistivas de forma circular se han interpretado como cavernas y coinciden en posición y tamaño con las detectadas en el dispositivo Schlumberger-Wenner.

Una vez mas, identificamos las fracturas por la interrupción de la franja resistiva. Estas anomalías resistivas definen la posición de las calizas. La interrupción en su alta resistividad se debe a la presencia de agua o arcilla en los planos de falla.

Se han identificado dos fallas principales con buzamiento de unos 15-20 grados hacia el Este y que se han representado en la figura adjunta.



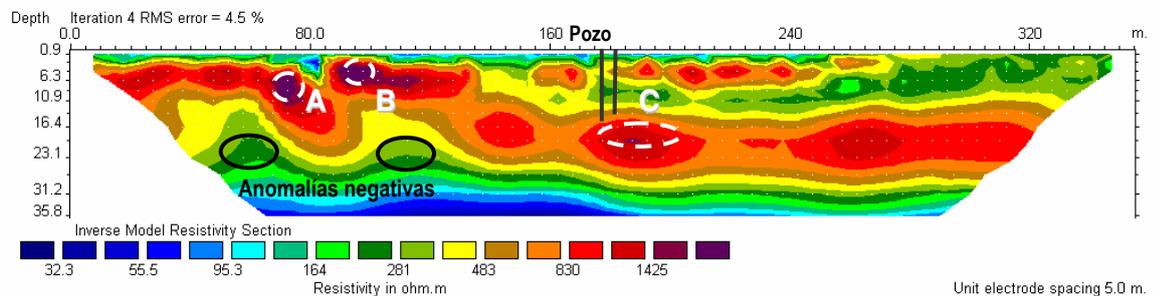
Al igual que en el perfil anterior, la chimenea vertical que aflora en superficie no tiene un claro reflejo en el perfil debido a que su pequeño tamaño apenas tiene incidencia en el flujo de la corriente eléctrica y es, por tanto, una anomalía muy poco desarrollada. Por otro lado tan sólo tienen comportamiento dieléctrico los cuatro metros superiores debido a que el resto se encuentra relleno de arcilla y derrubios, por lo que su imagen corresponderá a un comportamiento mixto.

Por lo que respecta a las cavidades, encontramos las mismas anomalías que en el perfil anterior, muy sencillas de interpretar por manifestarse como manchas resistivas (1700 ohm.m) de forma circular.

Las cavidades localizadas al Oeste del perfil tienen pequeño diámetro (5 m aprox) y son superficiales, en torno a los 8-11 metros desde la superficie. La cavidad detectada al Este corresponde con las galerías que conectan con el pozo vertical y tienen un tamaño mayor (8 x 5 m).

Para (A) y (B): $D_h = 3$ m. $D_{el}/D_h = 5/3$. $P = 8$ m, por lo que $P = 2,6D_h$

Para (C): $D_h = 6$ m. $D_{el}/D_h = 5/6$. $P_c = 18$ m, por lo que $P_A = 3,3D_h$



Para (A) y (B): $D_h = 3$ m. $D_{el}/D_h = 5/3$. $P_A = 8$ m, por lo que $P_A = 2,6D_h$ y $P_B = 12$ m, por lo que $P_B = 4D_h$

Para (C): $D_h = 6$ m. $D_{el}/D_h = 5/6$. $P_c = 18$ m, por lo que $P_A = 3D_h$

Para las anomalías negativas:

$D_h=6$ m. $D_{el}/D_h=5/6$. $P_c=18$ m, por lo que $PA=3D_h$

6.4.4 PERFILES Zona IV

Se presentan a continuación los resultados más destacados de los perfiles realizados para cubrir la Zona IV. La calibración de la Zona IV es posible gracias a que conocemos la existencia de una cueva con disposición horizontal situada bajo nuestros perfiles. Las dimensiones aproximadas de esa cavidad son 15 m de anchura y 3 m de altura y está localizada a una profundidad de 17 m. En este caso particular sabemos que la cueva está parcialmente rellena de arcillas rojas. La posición en superficie de esta cavidad se sitúa a 55 metros desde el Oeste para el perfil Schlumberger-Wenner y en el centro del perfil para la imagen obtenida por Dipolo-dipolo. Al tener las cavidades esta zona menor profundidad se diseñó un perfil con $D_h=3$ m para aumentar la resolución.

En este caso no coinciden las cavidades de calibración en el centro de las imágenes porque el perfil Schlumberger-Wenner ha combinado 54 electrodos separados 3 metros, proporcionando un perfil de 156 metros, mientras que el perfil Dipolo-dipolo ha utilizado únicamente 36 electrodos dando un perfil de 100 metros. Es por esto que el primer perfil detecta dos cavidades, mientras que el segundo, mas reducido, tan solo intercepta una.

6.4.4.1 Zona IV – Dispositivo Schlumberger-Wenner

Profundidades alcanzadas

Se ha realizado un único perfil con el dispositivo Schlumberger-Wenner diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía de 31,5 m, utilizando 54 electrodos de corriente separados 3 m.

Materiales

Los materiales diferenciados por su comportamiento eléctrico son los habituales en estos perfiles, habiendo encontrado cuatro capas principales en disposición horizontal cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

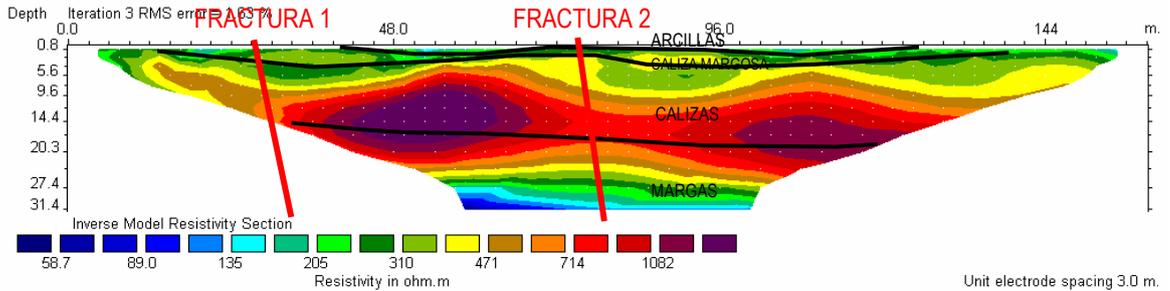
Una capa superficial arcillosa, de extensión mucho menor que en las zonas anteriores. Esta capa es un recubrimiento de las intercalaciones de calizas margosas.

Una segunda capa tiene poco espesor en este perfil, y se deduce a partir de la interpretación de un nivel superficial de respuesta geoelectrica resistiva (400 ohm.m) que yace entre dos niveles más conductores (de 200 ohm.m). El material resistivo se atribuye

a materiales de naturaleza calcárea, por lo que se deduce que se trata de un nivel de calizas margosas intercaladas de espesor variable.

Una tercera capa es el estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles anteriores, y es la capa karstificada que incluye las cavidades.

Una cuarta capa inferior correspondiente a las margas infrayacentes a la unidad de calizas.



Anomalías

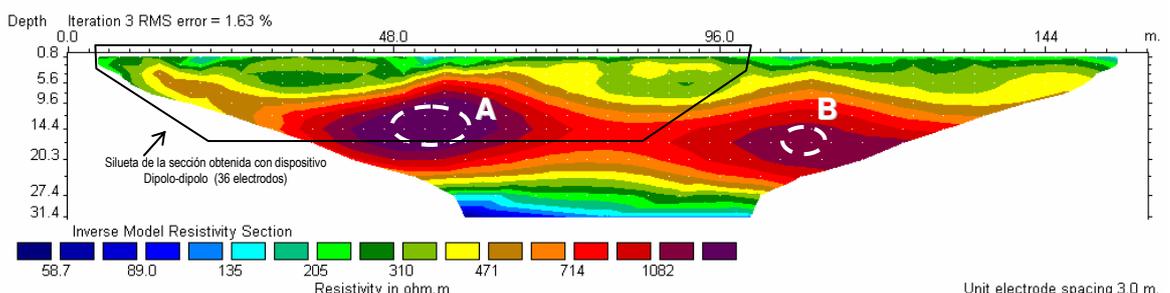
La capa de calizas presenta una buena continuidad lateral, por lo que entendemos que no presenta fracturas importantes. Únicamente encontramos una tendencia a su interrupción en la zona central del perfil, por lo que lo interpretaremos como probable falla.

Las anomalías resistivas de forma circular se han interpretado como cavernas y la situada más hacia el Oeste coincide exactamente en posición con la cueva que conocemos y utilizamos de referencia en la calibración del perfil.

Las cavidades localizadas tienen forma ovalada con un eje mayor de gran tamaño (en torno a 16 m la del Oeste (A) y 10 m la situada al Este (B)) y una altura de 4 m aproximadamente. Son superficiales, en torno a los 10-12 metros desde la superficie. En la imagen se ha superpuesto la silueta del perfil Dipolo-dipolo que al combinar 36 electrodos en lugar de los 56 de Schlumberger-Wenner obtiene un perfil de menor longitud.

Para (A: cavidad de calibración): $D_h = (4+16)/2 = 10$ m. $D_{el}/D_h = 3/10$. $P = 12$ m, por lo que $P = 1,2D_h$

Para (B): $D_h = (4+10)/2 = 7$ m. $D_{el}/D_h = 3/7$. $P = 12$ m, por lo que $P = 1,7D_h$



6.4.4.2 Zona IV – Dispositivo Dipolo-dipolo

Profundidades alcanzadas

Se ha realizado un único perfil con el dispositivo Dipolo-dipolo diseñado para alcanzar una penetración en el terreno que varía de 16,2 m, utilizando tan sólo 36 electrodos de corriente separados 3 m. El resultado es un perfil de 100 metros de longitud. Como referencia en la interpretación se ha situado el centro del perfil sobre una cueva conocida a 15 metros de profundidad .

Materiales

Los materiales diferenciados por su comportamiento eléctrico son los habituales en estos perfiles, habiendo encontrado cuatro capas principales en disposición horizontal cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial arcillosa, de extensión mucho menor que en las zonas anteriores. Esta capa es un recubrimiento de las intercalaciones de calizas margosas.

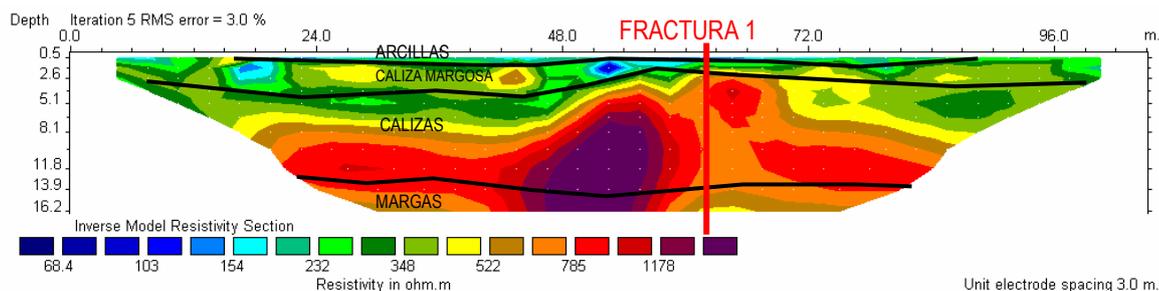
Una segunda capa tiene poco espesor en este perfil, y se deduce a partir de la interpretación de un nivel superficial de respuesta geoelectrónica resistiva (500 ohm.m) que yace entre dos niveles más conductores (de 150-200 ohm.m). El material resistivo se atribuye a materiales de naturaleza calcárea, por lo que se piensa puede tratarse de un nivel de calizas margosas intercaladas de espesor variable.

Una tercera capa es el estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles anteriores, y es la capa karstificada que incluye las cavidades.

Una cuarta capa inferior correspondiente a las margas infrayacentes a la unidad de calizas.

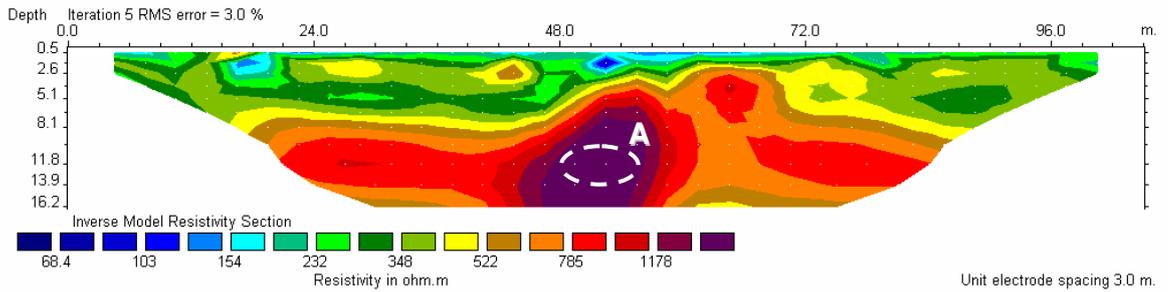
Anomalías

La capa de calizas presenta una buena continuidad lateral, por lo que entendemos que no presenta fracturas importantes. Únicamente se encuentra una tendencia a su interrupción al Este de la cavidad que se manifiesta en el centro del perfil como una mancha circular muy resistiva (1300 ohm.m), por lo que se interpreta como una probable falla.



Aparece en el centro del perfil una anomalía muy resistiva muy clara que corresponde a una cavidad. No ofrece duda alguna porque se ha comprobado que realmente existe dicha galería, lo cual corrobora que la interpretación se está llevando a cabo adecuadamente.

La anomalía resistiva de forma circular se interpreta como caverna en la roca caliza con unas dimensiones de 12 m de anchura y 6 de altura. Su posición es superficial, en torno a los 12 metros desde la superficie. $D_h = (12+6)/2 = 9$ m. $D_{el}/D_h = 3/9$ $P=12$ m, por lo que $P=1,3D_h$



6.4.5 PERFILES RUINAS TERMAS

Se presentan aquí perfiles de tomografía eléctrica con un objetivo arqueológico. El diseño e interpretación de estos perfiles será diferente a lo visto hasta ahora. Por un lado el objetivo es detectar estructuras arquitectónicas enterradas, principalmente muros de antiguas edificaciones que se encuentran ocultos bajo un somero manto de arcillas y tierra a pocos metros de profundidad. Por otra parte han de interpretarse como sillares o muros aquellas anomalías positivas de resistividad debido a que el material arcilloso que rodea los bloques de caliza (roca utilizada en las construcciones romanas) siempre será más conductor que la propia roca caliza que forma los muros.

Se han empleado dos equipos distintos para contrastar los resultados, y como en las zonas anteriores se han utilizado dos configuraciones distintas, Schlumberger-Wenner y Dipolo-dipolo. El primer equipo, el utilizado hasta ahora en el yacimiento, se denomina SYSCAL R1 Switch 72. En él se ha diseñado una adquisición de 600 medidas. El segundo equipo se ha desarrollado específicamente para estudios arqueológicos y de poca profundidad y se denomina SYSCAL KID Switch 24, y toma un máximo de 164 medidas. El equipo SYSCAL KID Switch 24 empleará el dispositivo Wenner que ya se ha utilizado para el desarrollo de la experimentación del subcapítulo 5.3 y algunos trabajos a escala real del subcapítulo 5.4. Los resultados del dispositivo Wenner son similares a los resultados Schlumberger-Wenner pero con menos profundidad de investigación y algo menor resolución a los cambios verticales. De este modo se van a obtener cuatro perfiles de un mismo sitio con equipos diferentes y tres configuraciones distintas.

6.4.5.1 Ruinas Termas – Dispositivo Schlumberger-Wenner

Profundidades alcanzadas

La cobertera de tierra que oculta los restos de antiguas edificaciones varía entre 0,30 m y 1 m para diferentes partes del yacimiento. En el entorno de las termas el recubrimiento medio es de 0,5 m por cuanto la profundidad de investigación debe superar 1,5 m. El perfil realizado con el equipo SYSCAL R1 Switch 72 combina 36 electrodos separados 0,5 m y se ha diseñado para profundizar hasta 3,5 m a lo largo de 18 m de longitud. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24 profundizan hasta 1,6 m y combinan 24 electrodos separados 0,5 m en un perfil de 12 m de largo.

Materiales

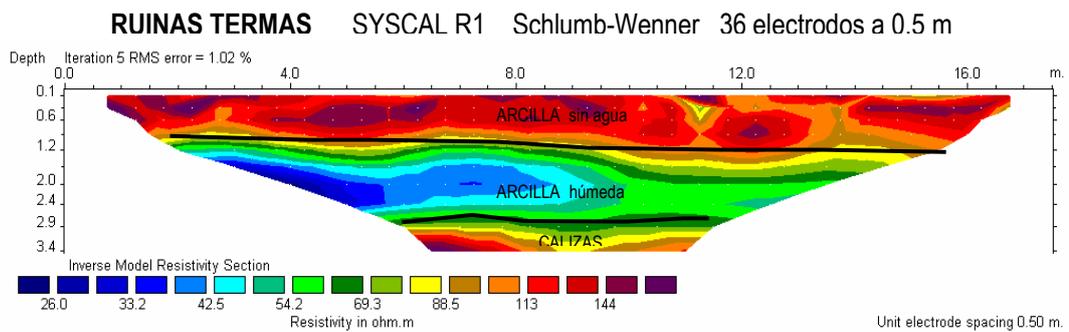
Se describe a continuación el perfil obtenido con el equipo SYSCAL R1 debido a que profundiza más y permite distinguir tres capas. El equipo SYSCAL KID únicamente profundiza hasta dos capas.

Se distinguen tres franjas de comportamiento eléctrico diferente en disposición horizontal cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial seca, de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad 100 ohm.m a 140 ohm.m debido a que no tiene agua en los poros del suelo, lo que le confiere un comportamiento dieléctrico.

Una segunda capa húmeda de la misma formación detrítica de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad muy baja, de 20 ohm.m a 70 ohm.m debido a que el suelo tiene agua en los poros del suelo, lo que le proporciona un carácter conductor.

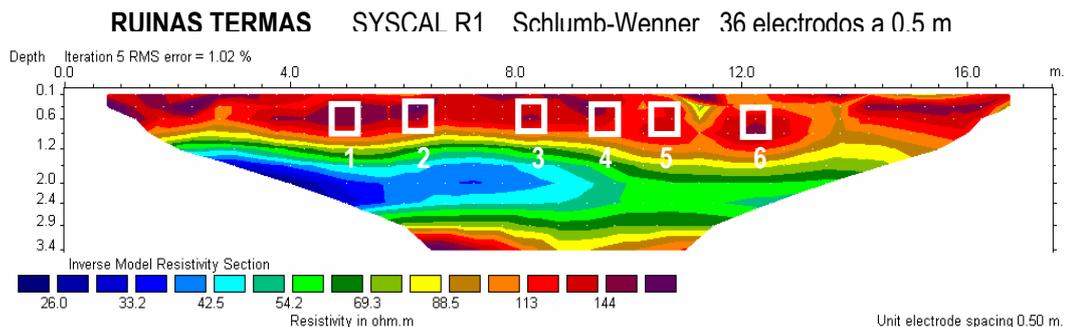
Una tercera capa es el techo del estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles. En este caso se asoma a una profundidad de 3,5 metros.



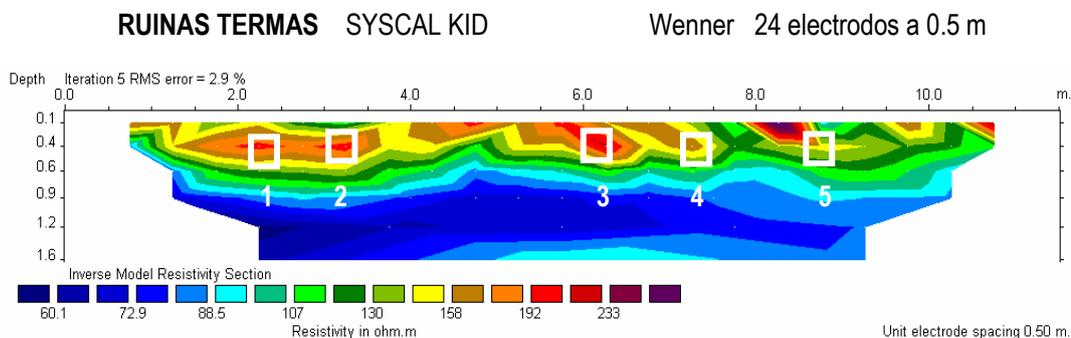
Anomalías

Se observan seis manchas resistivas equidistantes que corresponden a seis muros enterrados de edificios anexos al complejo Termal "Los Arcos II". La calibración ha sido posible porque el perfil se ha realizado en una zona próxima a unas excavaciones recientes y las anomalías aparecen en la posición exacta donde llegarían dichos muros si tuvieran suficiente continuidad.

Se cree que son muros de algún edificio anexo al conjunto termal "Los Arcos II". Son muros con una anchura de 0,5 m y localizados a una profundidad de 0,40 m. Se



ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 6. Hay que tener en cuenta que el perfil obtenido por el equipo SYSCAL KID es más corto que el del SYSCAL R1, pero ambos tienen el centro en la misma posición.



6.4.5.2 Ruinas Termas – Dispositivo Dipolo-dipolo

Profundidades alcanzadas

El perfil realizado con el equipo SYSCAL R1 Switch 72 combina 36 electrodos separados 0,5 m y se ha diseñado para profundizar hasta 2,7 m a lo largo de 18 m de longitud. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24 profundizan hasta 1,4 m y combinan 24 electrodos separados 0,5 m en un perfil de 12 m de largo.

Materiales

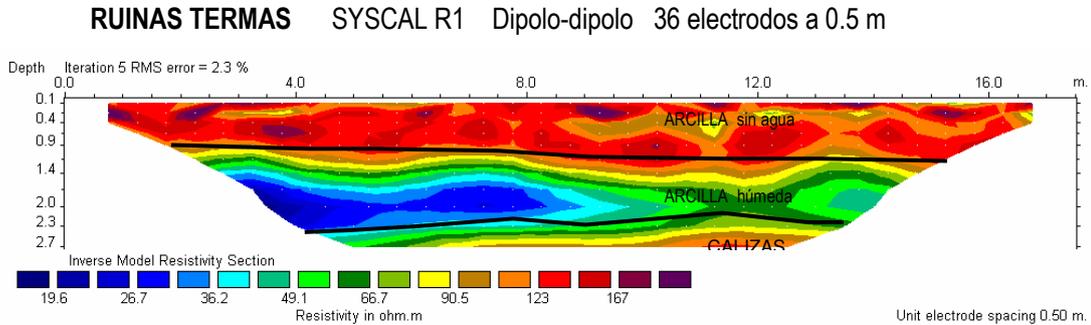
Se describe a continuación el perfil obtenido con el equipo SYSCAL R1 debido a que profundiza más y permite distinguir tres capas. El equipo SYSCAL KID únicamente profundiza hasta dos capas.

Se distinguen tres franjas de comportamiento eléctrico diferente en disposición horizontal cuyas características son, de techo a muro, las siguientes:

Una capa superficial seca, de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad 100 ohm.m a 200 ohm.m debido a que no tiene agua en los poros del suelo, lo que le confiere un comportamiento dieléctrico.

Una segunda capa húmeda de la misma formación detrítica de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad muy baja, de 20 ohm.m a 70 ohm.m debido a que el suelo tiene agua en los poros del suelo, lo que le proporciona un carácter conductor.

Una tercera capa es el techo del estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles donde se aprecia un incremento de la resistividad. En este caso se asoma a una profundidad de 3,5 metros.

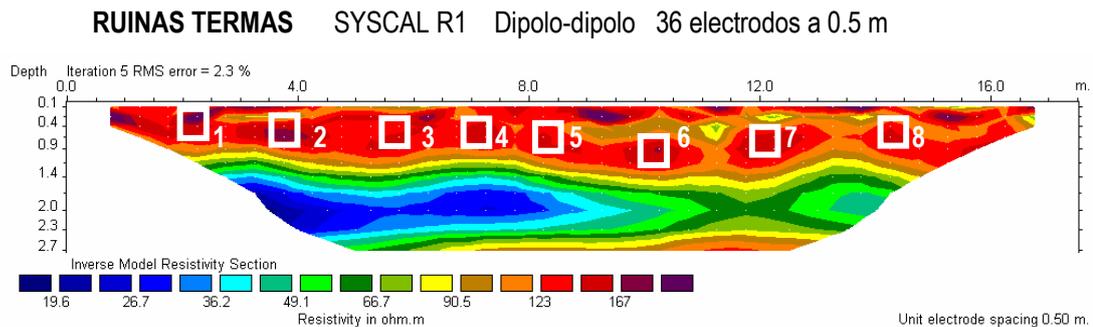


Anomalías

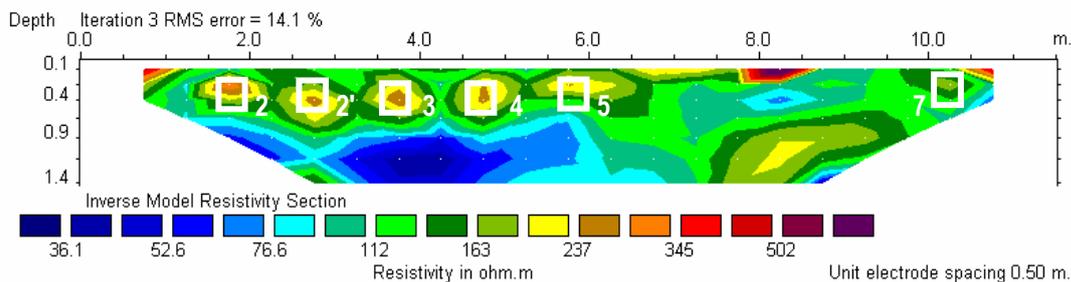
En el perfil obtenido mediante SYSCAL R1 se observan ocho manchas resistivas superficiales y equidistantes que corresponden a ocho probables muros enterrados de edificios anexos al complejo Termal "Los Arcos II".

Aquí se obtienen resultados diferentes en tomografía eléctrica dependiendo del dispositivo utilizado. Para localizar huecos y muros enterrados resulta más adecuado el dispositivo Dipolo-dipolo, y en este caso se puede observar que ha detectado más anomalías y con mayor precisión.

Se cree que son muros de algún edificio anexo al conjunto termal "Los Arcos II". Son muros con una anchura de 0,5 m y localizados a una profundidad de 0,40 m. Se ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 8. Hay que tener en cuenta que el perfil obtenido por el equipo SYSCAL KID es más corto que el del SYSCAL R1, pero ambos tienen el centro en la misma posición. En el perfil del SYSCAL KID no se han detectado las anomalías 6 y 8. En concreto la anomalía 8 queda fuera del perfil KID, al ser éste más corto en longitud, mientras que la anomalía 6 ha quedado enmascarada por una zona de baja resistividad situada en sus proximidades.



RUINAS TERMAS SYSCAL KID Dipolo-dipolo 24 electrodos a 0.5 m



6.4.6 PERFILES MURO ENTERRADO

Se presentan aquí otros perfiles de tomografía eléctrica con un objetivo arqueológico. En este caso el objetivo es detectar estructuras arquitectónicas enterradas en un área de la que se desconoce su contenido. Se intentarán localizar muros de antiguas edificaciones que se encuentren ocultos bajo el manto de arcillas y tierra vegetal a pocos metros de profundidad. Por otra parte hay que interpretar como sillares o muros aquellas anomalías positivas de resistividad, debido a que el material arcilloso que rodea los bloques de caliza (roca utilizada en las construcciones romanas) siempre será más conductor que la propia roca caliza que forma los muros.

Se han empleado dos equipos distintos para contrastar los resultados, y como en las zonas anteriores se han utilizado dos configuraciones distintas, Schlumberger-Wenner y Dipolo-dipolo. El primer equipo es el utilizado en las Zonas I a IV que se denomina SYSCAL R1 Switch 72 y en este se ha diseñado una adquisición de 600 medidas. El segundo equipo se ha desarrollado específicamente para estudios arqueológicos y de poca profundidad y se denomina SYSCAL KID Switch 24, y toma un máximo de 164 medidas. De este modo se van a obtener cuatro perfiles de un mismo sitio con equipos diferentes y configuraciones distintas.

6.4.6.1 MURO enterrado – Dispositivo Schlumberger-Wenner

Profundidades alcanzadas

La cobertera de tierra que oculta los restos de antiguas edificaciones varía entre 0,30 m y 1 m para diferentes partes del yacimiento por cuanto la profundidad de investigación debe superar 1,5 m. El perfil realizado con el equipo SYSCAL R1 Switch 72 combina 36 electrodos separados 0,5 m y se ha diseñado para profundizar hasta 3,4 m a lo largo de 18 m de longitud. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24

profundizan hasta 1,6 m y combinan 24 electrodos separados 0,5 m en un perfil de 12 m de largo.

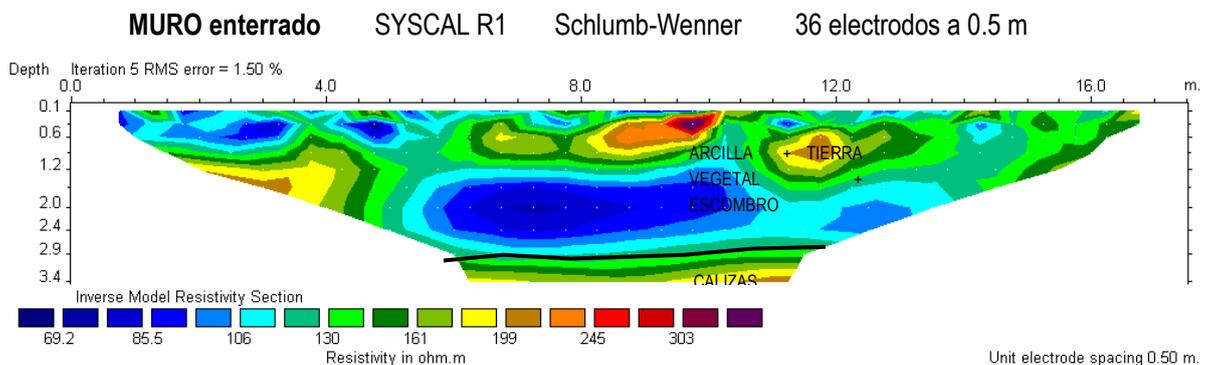
Materiales

A continuación se describe el perfil obtenido con el equipo SYSCAL R1 debido a que profundiza más y permite distinguir tres capas. El equipo SYSCAL KID únicamente profundiza hasta dos capas.

Se distinguen dos franjas de comportamiento eléctrico diferente, si bien la primera de ellas podría ser dividida en dos, como en el caso anterior, en función de su humedad, pero en este caso incluiremos en una sola capa a toda la cobertura de suelo que recubre la caliza, debido a que esas subdivisiones internas no tienen en este caso una disposición horizontal clara. A continuación describimos sus características de techo a muro:

Una capa superficial de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad variable, desde 70 ohm.m hasta 160 ohm.m sin un ordenamiento estricto, si bien se distingue la zona superior como más resistiva debido a que no tiene agua en los poros, y la zona inferior más conductora (70 ohm.m) debido a que tiene agua en los poros.

La segunda capa es el techo del estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles. En este caso se asoma a una profundidad de 3,5 metros.

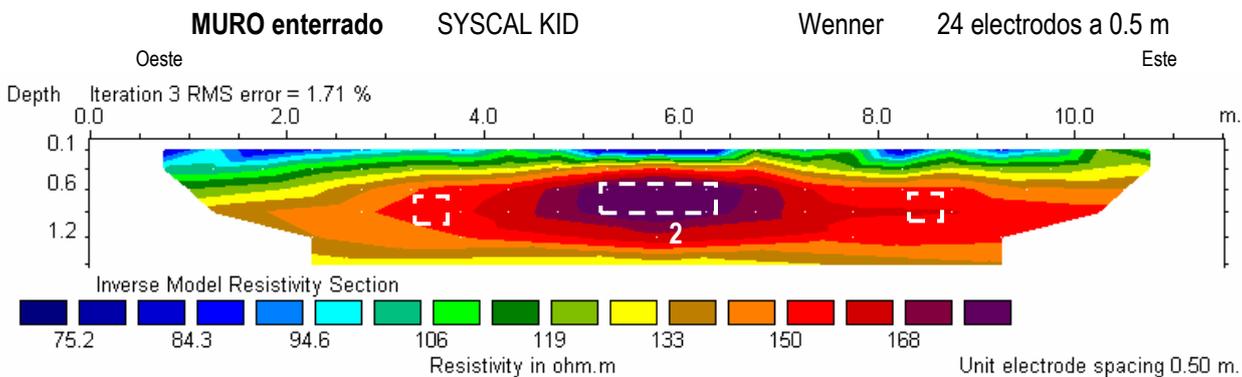
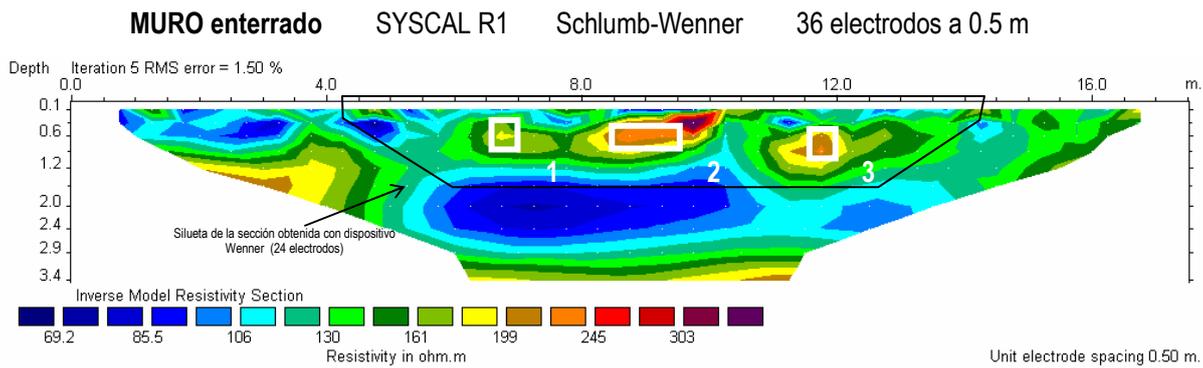


Anomalías

En el perfil obtenido mediante SYSCAL R1 se observan tres manchas resistivas superficiales y equidistantes que corresponden a tres probables muros enterrados. En cambio, el perfil obtenido con SYSCAL KID tan solo muestra una anomalía de resistividad, la señalada como n° 2.

Aquí se han obtenido resultados diferentes en tomografía eléctrica utilizando un mismo dispositivo (Schlumberger-Wenner) pero variando en número de medidas. El SYSCAL KID ha tomado 94 datos de resistividad, mientras que el SYSCAL R1 ha tomado más de 500. Una mayor densidad de datos se traduce en una mayor precisión en el perfil. En cualquier caso, como se comprobará más adelante para localizar huecos y muros enterrados, resulta más adecuado el dispositivo Dipolo-dipolo que, tomando 164 datos, proporciona una imagen de gran fiabilidad.

Estas anomalías se interpretan como muros de algún edificio de la antigua ciudad romana. Son muros con una anchura de 1 m (el nº2) y 0,5 m (los nº1 y nº3) y localizados a una profundidad de 0,50 m. Se ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 3. Hay que tener en cuenta que el perfil obtenido por el equipo SYSCAL KID es más corto que el del SYSCAL R1, pero ambos tienen el centro en la misma posición. En el perfil del SYSCAL KID detecta muy bien la anomalía 2 y enmascara sobre ésta imagen de las anomalías 1 y 3 debido al bajo número de mediciones que realiza (94 datos).



6.4.6.2 MURO enterrado – Dispositivo Dipolo-dipolo

Profundidades alcanzadas

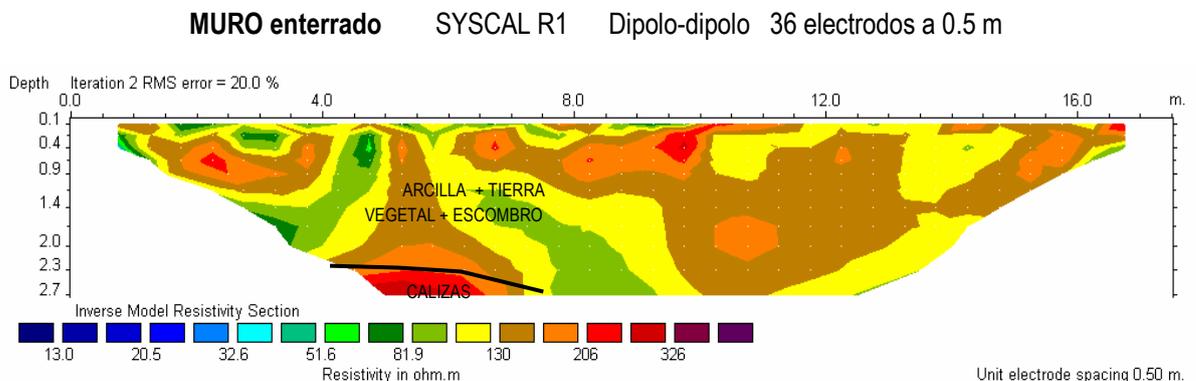
La cobertera de tierra que oculta los restos de antiguas edificaciones varía entre 0,30 m y 1 m para diferentes partes del yacimiento por cuanto la profundidad de investigación debe superar 1,5 m. El perfil realizado con el equipo SYSCAL R1 Switch 72 combina 36 electrodos separados 0,5 m y se ha diseñado para profundizar hasta 2,7 m a lo largo de 18 m de longitud. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24 profundizan hasta 1,5 m y combinan 24 electrodos separados 0,5 m en un perfil de 12 m de largo.

Materiales

Seguidamente se describe el perfil obtenido con el equipo SYSCAL R1 debido a que profundiza más y permite distinguir mejor las capas. No se distinguen bandas de anomalías que pudieran representar capas. La resistividad se presenta distribuida heterogéneamente dentro de lo que se interpreta como el recubrimiento de suelo vegetal + arcilla + escombros de edificaciones debido a un desigual reparto de la humedad en el terreno. Esta capa tiene un espesor de 2,5 m y la capa inferior de caliza tan solo asoma en las zonas profundas del extremo Oeste. A continuación describimos sus características de techo a muro:

Una capa superficial de tierra vegetal, arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de resistividad variable, desde 40 ohm.m hasta 200 ohm.m sin un ordenamiento estricto, debido al desigual reparto de la humedad en sus poros.

La segunda capa es el techo del estrato principal de caliza masiva característica de todos los perfiles. En este caso se asoma a una profundidad de 2,6 metros.

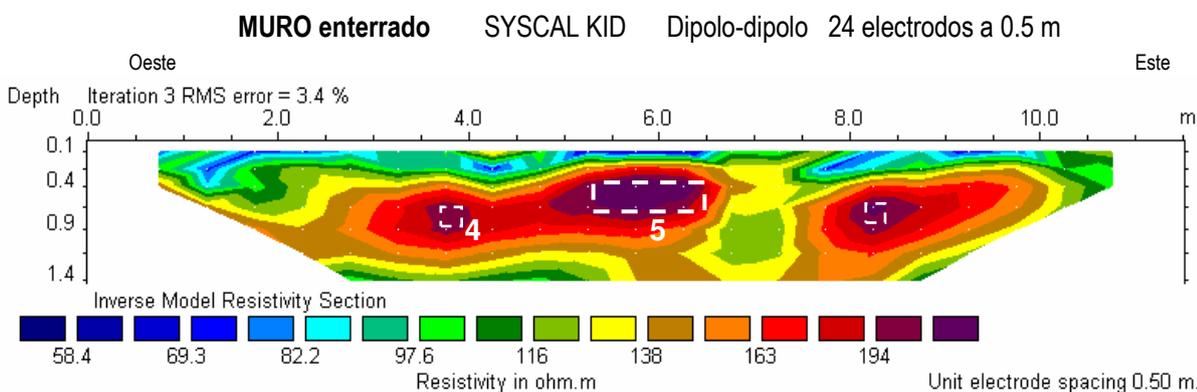
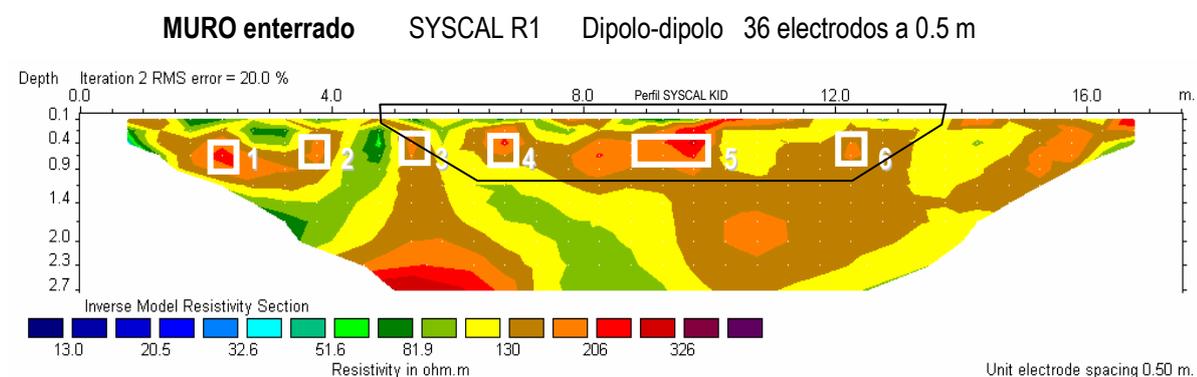


Anomalías

En el perfil obtenido mediante SYSCAL R1 se observan seis manchas resistivas superficiales y equidistantes que corresponden a seis probables muros enterrados. En cambio, el perfil obtenido con SYSCAL KID tan solo muestra tres anomalías de resistividad, las señaladas como nº 4, nº5 y nº6. Precisamente estas anomalías son las que aparecen en los perfiles de dispositivo Schlumberger- Wenner y que allí se señalaron como nº1, nº2 y nº3, respectivamente.

Se puede comprobar aquí cómo para localizar huecos y muros enterrados, resulta más adecuado el dispositivo Dipolo-dipolo que tomando 164 datos en el equipo SYSCAL KID, ó 500 con el SYSCAL R1, permite obtener imágenes de buena calidad.

Estas anomalías se interpretan como muros de algún edificio de la antigua ciudad romana. Son muros con una anchura de 1 m (el nº5) y 0,5 m (los restantes) y localizados a una profundidad de 0,50 m. Se ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 6. Hay que tener en cuenta que el perfil obtenido por el equipo SYSCAL KID es más corto que el del SYSCAL R1, pero ambos tienen el centro en la misma posición. En el perfil del SYSCAL KID no se han detectado las anomalías 1, 2 y 3.



6.4.7 PERFILES FORO

Se presentan a continuación los resultados más destacados de los perfiles realizados para localizar las *tabernae* (dependencias reticuladas para uso comercial en torno a la plaza rectangular) en la planta del Foro de Clunia. Las excavaciones han puesto al descubierto las dependencias del lado Este, pero se desconoce su existencia al lado Oeste. Se supone que deberían aparecer de manera simétrica y con una separación entre muros de 2,7 metros, tal y como se encuentran en el borde Este.

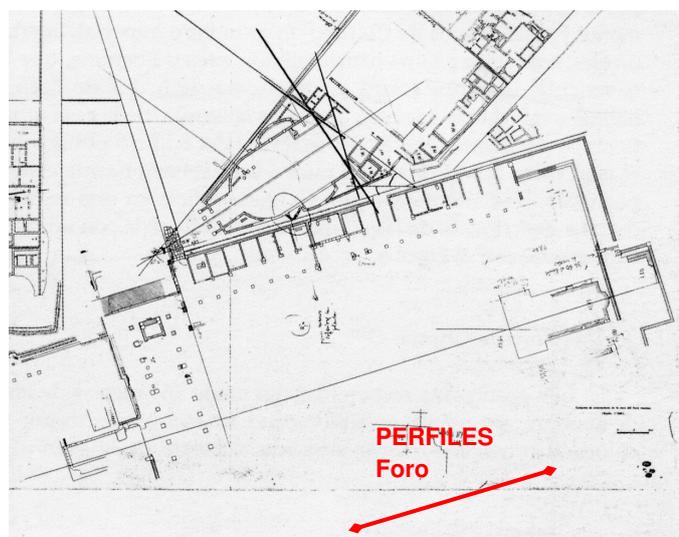
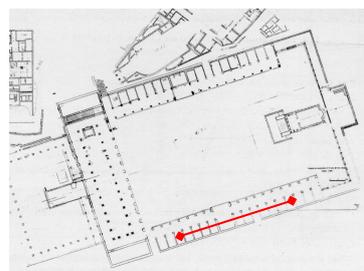


Figura 6.3. Plano de situación de los perfiles de tomografía realizados en el Foro de Clunia para la localización de los muros de las dependencias *tabernae* flanco Oeste. Abajo, reconstrucción supuesta. Tomado de De Palol, P., 1994.



En este caso se ha empleado únicamente el equipo SYSCAL KID 24 en dispositivos Wenner y Dipolo-dipolo.

6.4.7.1 FORO – Dispositivo Wenner

Profundidades alcanzadas

La cobertera de tierra que oculta los restos de los muros que se busca ronda 1 m de espesor, por lo que se diseñarán perfiles que profundicen más de 2 m. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24 en dispositivo Wenner profundizan 4 m. Se combinan 24 electrodos separados 1 m, proporcionando un perfil de 24 m de largo.

Materiales

Se diferencian dos franjas muy claras, una superior resistiva y una inferior conductora. La capa superior es claramente un recubrimiento de arcilla + escombros de edificaciones, mientras que las capas inferiores son de arcilla húmeda. A continuación se describen sus características de techo a muro:

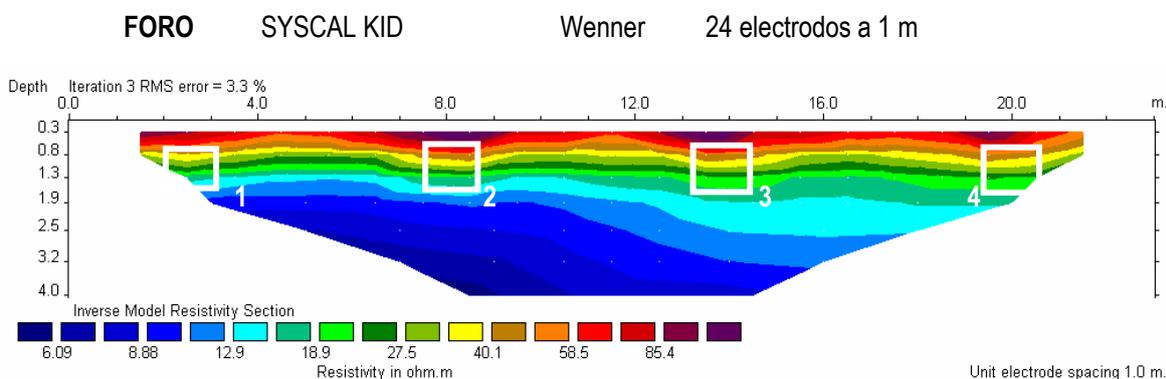
Una capa superficial de arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de casi 1 m de espesor.

La segunda capa es una capa arcillosa húmeda que da valores de resistividad bajos.

Anomalías

El perfil obtenido obtenido con SYSCAL KID muestra cuatro anomalías de resistividad, las señaladas como nº1, nº2, nº3 y nº4. Debido a la baja resistividad del terreno, en este caso no se manifiestan los muros como anomalías de alta resistividad similares a las vistas en casos anteriores. En este caso, se detecta una suave deformación en la horizontalidad de las franjas de resistividad. Aquellos segmentos del perfil con una curvatura cóncava hacia arriba corresponden a los lugares donde se localizan los muros enterrados.

Son muros con una anchura de 1 m y están localizados a una profundidad de 0,70 m. Se ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 4. También puede comprobarse la equidistancia entre muros de 2,7 m, signo evidente de que se trata de estructuras arquitectónicas.



6.4.7.2 FORO – Dispositivo Dipolo-dipolo

Profundidades alcanzadas

La cobertera de tierra que oculta los restos de los muros que se buscan ronda 1 m de espesor, por lo que se diseñará un perfil que investigue a más de 2 m de profundidad. Las medidas realizadas con el SYSCAL KID 24 en dispositivo Dipolo-dipolo profundizan hasta 2,7 m. Se combinan 24 electrodos separados 1 m, proporcionando un perfil de 24 m de largo.

Materiales

Se diferencian dos franjas muy claras, una superior resistiva y una inferior conductora. La capa superior es claramente un recubrimiento de arcilla + escombros de edificaciones, mientras que las capas inferiores son de arcilla húmeda. A continuación se describen sus características, de techo a muro:

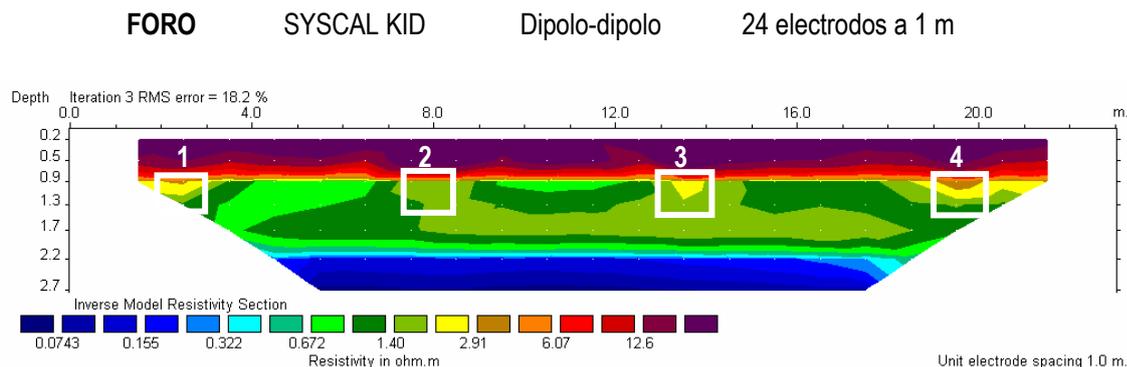
Una capa superficial de arcilla y escombros de antiguas construcciones. Es una franja de casi 1 m de espesor.

La segunda capa es una capa arcillosa húmeda que da valores de resistividad bajos.

Anomalías

El perfil obtenido con SYSCAL KID muestra cuatro anomalías señaladas como nº1, nº2, nº3 y nº4. Debido a la baja resistividad del terreno, en esta ocasión los muros producen únicamente suaves anomalías positivas. En este caso se detectan cuatro puntos a 1 m de profundidad en los que sube la resistividad, coincidiendo su posición con la observada en el perfil obtenido con Schlumberger-Wenner, lo que confirma que se trata de los lugares donde se encuentran los muros enterrados de las *tabernae* lado Oeste del Foro.

Son muros con una anchura de 1 m y están localizados a una profundidad de 0,80 m. Se ha señalado la situación de cada muro sobre los perfiles, numerados de 1 a 4. También puede comprobarse la equidistancia entre muros de 2,7 m, signo evidente de que se trata de estructuras arquitectónicas de antiguas edificaciones con una planta reticulada.



6.5 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos e interpretados, se presentan a continuación las principales conclusiones:

El método geofísico empleado ha permitido conocer las características del terreno de manera rápida y no destructiva, tanto desde el punto de vista litológico como estructural.

Los datos medidos son de muy buena calidad ya que se ha controlado el porcentaje de error de las medidas habiéndose mantenido casi exclusivamente un porcentaje de error de medición del 0% (en la adquisición de medidas de campo).

Los resultados obtenidos tras el procesado también son de muy buena calidad ya que se controla el porcentaje de ajuste entre el perfil de los datos medidos y el perfil resultante habiéndose mantenido casi siempre un porcentaje de error de ajuste entre el 2% y el 8% (en el procesado de las medidas), muy bueno considerando la importante variación de valores de resistividad.

En los perfiles profundos (Zonas I a IV) se han identificado tres unidades principales geoelectricamente diferentes lo cual hace atribuirles a tres unidades litológicas distintas. La extensión lateral de todas ellas es ligeramente variable en profundidad y espesor.

La capa superficial, de extensión local, tiene valores bajos de resistividad debido a su naturaleza fundamentalmente arcillosa-margosa.

La unidad intermedia tiene un carácter resistivo y corresponde a la formación de calizas. Su extensión es generalizada a toda la zona.

La tercera unidad es de carácter conductor y corresponde a la unidad margosa sobre la que se asienta la unidad de calizas. Su extensión también es generalizada.

La unidad objeto de estudio para detección de cavidades, las calizas, presenta dos tipos de anomalías. Unas que son debidas a la presencia de fracturas, lo que permite independizar bloques y otras anomalías específicas de la presencia de cavidades con dimensiones variables que se encuentran a distintas profundidades.

Las fracturas parecen quedar más claramente definidas con el dispositivo Schlumberger-Wenner ya que los valores de resistividad de los materiales suelen presentar tendencias más horizontales lo que hace que las discontinuidades verticales se identifiquen mejor.

Por lo que respecta a las anomalías identificadas como cavidades, se ha podido observar que con ambos dispositivos se identifica claramente la presencia de estos grandes huecos, no siendo necesaria la aplicación tradicional del dispositivo dipolo-dipolo como única forma operativa para identificación de huecos en el subsuelo: el dispositivo Schlumberger es también efectivo y, además profundiza más.

Lo que sí se observa es un pequeño desfase en la atribución de profundidades a los techos y bases de las cavidades notándose una interpretación de mayores profundidades al analizar los perfiles realizados con dispositivo Schlumberger-Wenner frente a los perfiles dipolo-dipolo. Este desfase ronda 1 a 1.5 m de diferencia, es decir, que las anomalías se interpretan en torno a un 10% más profundas en los perfiles Schlumberger-Wenner. Los experimentos descritos en el capítulo 5 también resaltaban una tendencia a aumentar la profundidad de las anomalías cuando se empleaba este dispositivo.

Con respecto al tipo de relleno que ocupa las cavidades se ha podido diferenciar entre dos tipos de anomalías: anomalías negativas correspondientes a cavidades conductoras con relleno de agua y anomalías positivas con relleno de aire.

Las anomalías negativas de las cavidades con agua se presentan como inflexiones convexas hacia arriba en forma de joroba y están asociadas a fracturas.

Las anomalías positivas corresponden a cavidades rellenas de aire y tienen formas circulares o elípticas cerradas.

El tamaño de los huecos es difícilmente apreciable en cavidades rellenas de agua, principalmente debido a que se encuentran a gran profundidad. Mejores son los resultados en cavidades rellenas de aire pero siempre donde la profundidad es menor.

En cuanto a las investigaciones sobre objetivos arqueológicos se ha podido comprobar que el método de la tomografía eléctrica es igualmente efectivo. El empleo

de dos equipos de medición distintos (SYSCAL R1 Switch 72 y SYSCAL KID Switch 24) ha demostrado la importancia de una densidad de datos adecuada. Los perfiles realizados con el SYSCAL R1 tienen en torno a 600 adquisiciones, mientras que el SYSCAL KID tomó 164 medidas máximo. Esto se traduce en un incremento notable en la resolución de la imagen final.

En todo caso, se ha comprobado que el dispositivo dipolo-dipolo es el más adecuado para la localización de estructuras enterradas, ya que los perfiles de baja densidad de datos tomados con SYSCAL KID presentan mejor resolución que los tomados con dispositivo Wenner.

La interpretación correcta de los perfiles obtenidos a sido posible gracias a la calibración de sus anomalías con estructuras conocidas, tales como las galerías de "Cueva Román" y los muros de las termas "Los Arcos II". En estos momentos se dispone de una base suficiente para abordar con garantía otras áreas del yacimiento de contenido desconocido, aportando así ideas novedosas acerca de la verdadera extensión y cartografía del complejo de galerías subterráneas o la presencia de edificaciones que pudieran ofrecer nuevos descubrimientos.

7. CONCLUSIONES - AVANCE CIENTÍFICO

7. CONCLUSIONES - AVANCE CIENTÍFICO

El problema planteado al comenzar el trabajo de esta investigación era: ¿Se puede caracterizar una cavidad del subsuelo mediante la interpretación de perfiles 2D obtenidos por Tomografía Eléctrica desde la superficie? La respuesta es que los resultados son variables dependiendo de múltiples condicionantes, tales como la profundidad y el diámetro del hueco, el dispositivo multielectrónico empleado, el espaciado interelectrónico, el modelo geológico o la densidad de datos. A continuación se especifica cada uno de los aspectos que se han desarrollado en esta investigación, cuyas conclusiones ya se han ido señalando al final de cada apartado.

7.1 CONCLUSIONES

PRIMERA. SOBRE LA ELECCIÓN DEL DISPOSITIVO MÁS ADECUADO

El dispositivo Dipolo-dipolo es superior al dispositivo Wenner y ligeramente mejor que Schlumberger-Wenner en cuanto a la detección de cavidades. Por lo que respecta a cavidades con relleno conductor, y por lo visto en las experiencias 5 y 7 del subcapítulo 5.3, el dispositivo Wenner localiza bien la posición horizontal de estas anomalías negativas pero su coordenada vertical no puede ser precisada con exactitud, debido a que la forma de dichas anomalías no tiene forma cerrada, sino que tienen aspecto de "adelgazamiento" de la capa encajante. Sin embargo, los perfiles de tomografía realizados mediante dispositivo Dipolo-dipolo, proporcionan imágenes que son áreas cerradas, cuya forma y centro geométrico coinciden con buena aproximación con la posición real de los cuerpos enterrados. De cualquier modo, las profundidades que señalan las anomalías son habitualmente menores que las reales.

También resulta más preciso el dispositivo Dipolo-dipolo cuando el modelo geológico es un hueco conductor sobre un estrato también conductor. Para dispositivos Wenner la imagen de resistividad negativa generada por el hueco se enmascara con la imagen que produce el nivel inferior. Incluso para los casos en los que esa situación se cumple y realmente se tiene un modelo donde hueco y estrato infrayacente aparecen unidos, el dispositivo Dipolo-dipolo define mejor su posición. En el ensayo 3-c- de la experiencia 3, el hueco conductor presenta una imagen en el perfil Dipolo-dipolo de curvatura convexa hacia arriba, al igual que el perfil Wenner. Pero la forma de curvatura del perfil Dipolo-dipolo es más pronunciada y está mejor definida.

En los apartados 5.4.2 y 5.4.4 se pudo comprobar que el dispositivo Dipolo-dipolo es muy superior al dispositivo Wenner en la localización de huecos resistivos. En los gráficos que se expondrán más adelante quedará patente la superioridad del dispositivo Dipolo-dipolo frente a Wenner.

SEGUNDA. SOBRE LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS (D_{el})

En el apartado 7.2.2 se van a representar los gráficos correspondientes a la relación D_{el} / D_h donde podrá comprobarse que existe una distancia de separación interelectródica máxima, por encima de la cual el dispositivo Dipolo-dipolo no es sensible a la detección de huecos con un diámetro mínimo. Empleando el dispositivo Dipolo-dipolo, la calidad de detección de huecos aislantes es óptima cuando $D_{el} \leq D_h$, es decir, cuando la distancia de separación entre electrodos (D_{el}) es menor o igual que el diámetro del hueco (D_h). Cuando $D_{el} > D_h$ únicamente se pueden identificar indicios de huecos con diámetro, pero estos perfiles no incluirán imágenes identificativas de huecos con seguridad. En el apartado 5.4.2 se pudo comprobar esta pérdida de resolución con el aumento del espaciado entre electrodos, y siguiendo esa secuencia de pérdida de calidad se puede prever que para relaciones $D_{el} = 3D_h$ los resultados serán nulos.

En cuanto a los dispositivos Wenner los resultados son aleatorios. Para ratios $D_{el}/D_h \leq 1$ se obtienen tanto imágenes óptimas como imágenes nulas. Los resultados mejoran notablemente con el dispositivo mixto Schlumberger-Wenner debido a que es más sensible a cambios laterales de resistividad y a que adquieren un mayor número de medidas.

TERCERA. SOBRE LA PROFUNDIDAD DE INVESTIGACIÓN

En las experiencias y trabajos que incluye esta tesis doctoral se ha comprobado que la imprecisión en la detección de cavidades es creciente con la profundidad. Pero esto no es nuevo, Gasulla (1999) ya señala que las imágenes se deterioran con la profundidad del objeto, precisando que la configuración Schlumberger puede localizar una esfera hasta una profundidad igual a tres veces su radio ($P= 3D_h$) y que la configuración Dipolo-dipolo tiene su límite en cuatro veces su radio ($P= 4D_h$).

En los distintos apartados de este trabajo se ha señalado la profundidad en relación con el diámetro del hueco. El análisis de estos datos pone de manifiesto que, en general, la detección de cavidades se vuelve imprecisa cuando la profundidad del hueco es superior a 2,5 veces su diámetro ($P= 2,5D_h$). Como se ha visto en la conclusión primera, el tipo de configuración multielectródica influye, pero ni el dispositivo y la relación P/D_h son los únicos condicionantes para la correcta detección de un hueco. Tanto o más influyente es el modelo geológico, que al fin y al cabo determina el valor de la resistividad aparente para cada punto, que en última instancia es el dato que se procesa para la obtención de los perfiles.

CUARTA. SOBRE EL TAMAÑO Y FORMA DE LOS HUECOS

Como se ha dicho anteriormente, la profundidad influye en la determinación del tamaño y forma de los huecos. Para profundidades del hueco iguales o inferiores a 2,5 veces el diámetro del hueco ($P \leq 2,5D_h$) se puede deducir con cierta exactitud la forma del hueco siempre que el diámetro del hueco sea superior a la distancia de espaciado interelectródico ($D_{el} \leq D_h$). Para profundidades mayores la imprecisión es creciente.

También se ha podido observar que para el dispositivo Wenner la profundidad marcada por la anomalía suele ser menor que la profundidad real, es decir, que la anomalía inducida por el hueco está ligeramente desplazada hacia la superficie (apartado 5.4.3), mientras que Dipolo-dipolo ofrece mayor precisión.

Para ambos dispositivos y cuando la relación D_{el} / D_h es próxima o superior a 1, los huecos resistivos tienden a generar anomalías positivas con forma ovalada con su eje mayor en disposición horizontal y el eje menor en posición vertical. El diámetro del hueco suele ser el valor de ese eje menor, mientras que el eje mayor de dicha anomalía suele ser tres veces superior al verdadero diámetro del hueco.

Cuando los huecos son circulares o cuadrados y $D_{el} \leq D_h$ su forma el se detecta bien, no así cuando aumenta el espaciado, o cuando los huecos tienen forma de franja vertical (apartado 5.3.5).

QUINTA. SOBRE EL RELLENO DE LOS HUECOS

Los huecos con relleno resistivo (aire, roca masiva) generalmente presentan formas cerradas circulares o elípticas. Si el contraste de resistividad con el entorno o el número de medidas no es lo suficientemente grande no es posible detectarlos con dispositivo Wenner. Mejores resultados se obtienen con Dipolo-dipolo que aun teniendo un escaso número de medidas los detecta con precisión aceptable.

Los huecos con relleno conductor (agua, arcilla) suelen presentar una anomalía con forma de joroba (convexa hacia arriba) cuando se encuentran próximos a un nivel también conductor, presentando un solape de imágenes (apartado 5.3.7). El dispositivo Dipolo- dipolo detecta mejor este tipo de huecos cerrando, en la mayoría de los casos, un área alrededor del hueco, definiendo así con mayor precisión el tamaño y posición del hueco. En caso de que aparezca una anomalía con forma de joroba la dimensión del hueco se determina suponiendo su techo en la cresta de la inflexión y su límite inferior a la profundidad en que dichas líneas de inflexión recuperan la horizontalidad.

SEXTA. SOBRE LA INFLUENCIA DE HUECOS LATERALES

De las experiencias 10, 11 y 12 (apartados 5.3.12 al 5.3.14) diseñadas para observar el efecto de los huecos situados en los laterales de un perfil de resistividad se concluye que los resultados varían enormemente en función del tipo de relleno del hueco.

Los huecos laterales resistivos (reellenos de aire) tienen una incidencia escasa o nula ya que los perfiles de resistividad no reciben el influjo de su presencia. Únicamente se generan imágenes con anomalías positivas de resistividad con la coincidencia de dos cavidades de similar entidad próximas al perfil y emplazadas en posiciones electródicas cercanas. La experiencia 11 señala que esta situación de huecos dobles a ambos lados es detectable cuando el diámetro de la cavidad es superior a la distancia entre electrodos ($D_{el} < D_h$).

El efecto de los huecos laterales conductores es muy distinto. La presencia de un cuerpo conductor situado a un lateral del perfil es notable, generando una anomalía negativa con forma convexa hacia arriba muy similar a la que se obtiene cuando el hueco está situado bajo el perfil, no pudiendo diferenciar un caso del otro a menos que se pueda visualizar el hueco lateral en superficie. De aquí se deduce que los huecos conductores se detectan mejor que los huecos aislantes, si bien su localización exacta en el subsuelo resulta más imprecisa al poder estar situados en una posición lateral del perfil. Sin duda alguna, futuras investigaciones despejarán las dudas que surgen a este aspecto.

SÉPTIMA. SOBRE EL MODELO GEOLÓGICO

El modelo geológico en el que se basa la parte empírica de esta Tesis Doctoral es un sencillo caso de dos capas (nivel resistivo sobre nivel conductor) que, por otro lado, es muy frecuente en la naturaleza y representa un esbozo de macizo rocoso con desarrollo de cavidades, como así generalmente ocurre con los terrenos calcáreos karstificados.

Las cavidades con diferente relleno se han supuesto en el nivel resistivo, y en los resultados de esta investigación demuestran la eficacia de la tomografía eléctrica para este caso, siempre que exista suficiente contraste de resistividad entre el relleno del hueco y su encajante.

7.2 AVANCE CIENTÍFICO

Cumpliendo con el principal objetivo planteado al inicio de esta tesis se completa el trabajo aportando dos herramientas útiles para la caracterización de cavidades mediante la interpretación de imágenes obtenidas en perfiles de tomografía eléctrica.

En primer lugar se presentan unas plantillas para la interpretación de imágenes de perfiles de resistividad. Por último se construyen unos gráficos que analizan la relación que existe entre la distancia de separación entre electrodos (D_{el}), el diámetro de los huecos (D_h) y la calidad de los resultados obtenidos.

7.2.1 PLANTILLAS DE INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

Se proponen unas sencillas plantillas de interpretación de imágenes que incluyen los principales tipos de anomalías vistos en esta investigación y que sirven de evidencia para determinar la existencia de alguna discontinuidad en el subsuelo, ya sea una cavidad rellena de sustancias (conductoras o resistivas) o bien fracturas o contactos entre formaciones.

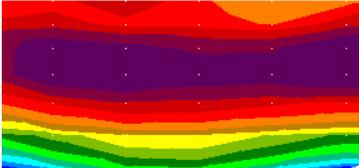
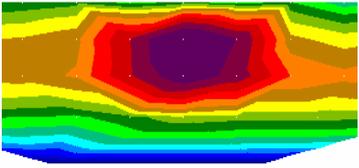
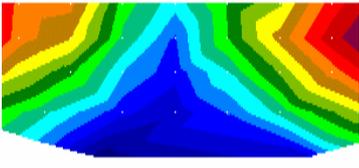
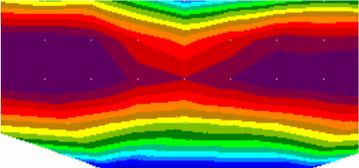
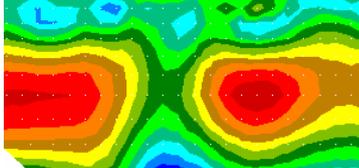
A partir de los resultados obtenidos en los capítulos 5 y 6 se proponen a continuación unas plantillas de interpretación de imágenes de tomografía eléctrica. Se trata de dos plantillas, una para dispositivos tipo Wenner o Schlumberger-Wenner y otra para dispositivos Dipolo-dipolo, debido a que en las experiencias desarrolladas en esta tesis se han encontrado diferencias en los resultados de ambas configuraciones. De cualquier modo, podría haberse construido un único conjunto de imágenes válido para todos los dispositivos puesto que los perfiles representan modelos teóricos de la distribución de la resistividad real en el subsuelo y ese modelo final ha de ser el mismo para todos los casos aun empleando dispositivos distintos.

Se pretende que estas plantillas sirvan para la interpretación cualitativa, rápida y directa de las anomalías presentes en los perfiles por simple comparación. Podría haberse confeccionado un listado mucho más extenso y complejo con imágenes de diferentes detalles pero se ha evitado a propósito la representación de un conjunto colmado de imágenes que pudieran precisamente quitarle a las plantillas sencillez, claridad y limpieza.

Conviene aclarar que estas imágenes tienen limitada su aplicación a modelos geológicos similares al que se ha caracterizado las investigaciones de esta Tesis Doctoral, es decir, un nivel horizontal de alta resistividad (arena o caliza) apoyado concordantemente sobre un nivel de poca resistividad infrayacente (arcilla o margas), donde los huecos y las fracturas se localizan en el nivel resistivo o en lugares próximos al contacto entre formaciones.

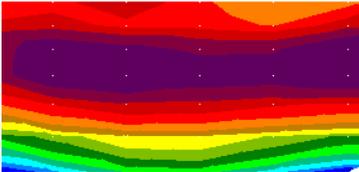
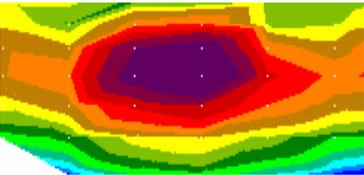
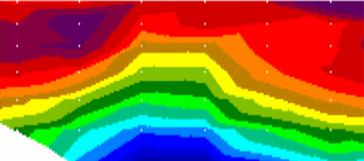
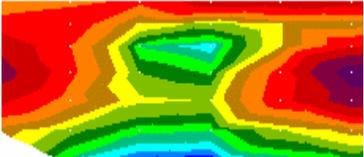
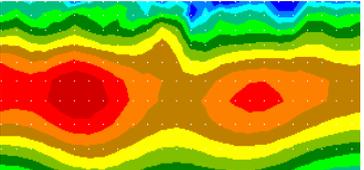
PLANTILLA PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES EN PERFILES DE RESISTIVIDAD OBTENIDOS POR TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

DISPOSITIVO WENNER Y SCHLUMBERGER-WENNER

IMAGEN	SIGNIFICADO
<p>NIVEL RESISTIVO SOBRE NIVEL CONDUCTOR (Ausencia de anomalías)</p> 	<p>Significado genérico: CONTACTO ENTRE DOS MATERIALES DE DISTINTA RESISTIVIDAD. MATERIAL DE ALTA RESISTIVIDAD SOBRE MATERIAL DE BAJA RESISTIVIDAD</p> <p>Expresión geológica: CONTACTO ENTRE ROCAS DE DISTINTA RESISTIVIDAD (Arena-arcilla o Caliza-margas), O LOCALIZACIÓN DE NIVEL FREÁTICO</p>
<p>ANOMALÍA POSITIVA DE FORMA CIRCULAR U OVALADA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO o BLOQUE RESISTIVO DE SECCIÓN CIRCULAR O CUADRADA</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE AIRE EN ROCAS DE RESISTIVIDAD MEDIA-ALTA o BLOQUE DE ROCA MASIVA ENTRE MATERIALES DE RESISTIVIDAD MEDIA-BAJA</p>
<p>ANOMALÍA NEGATIVA CONVEXA HACIA ARRIBA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO CONDUCTOR PRÓXIMO A UN SUSTRATO CONDUCTOR (Solapamiento de imágenes)</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE AGUA QUE DESCARGA POR FILTRACIÓN A NIVELES INFERIORES. HUECO RELLENO DE AGUA A PROFUNDIDAD MAYOR DE $2D_h$</p>
<p>ADELGAZAMIENTO DE NIVEL RESISTIVO POR ANOMALÍA NEGATIVA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO CONDUCTOR ENTRE MATERIALES RESISTIVOS</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE ARCILLA O SALES EN ROCAS DE RESISTIVIDAD MEDIA-ALTA</p>
<p>CORTE DE NIVEL RESISTIVO POR FRANJA SUBVERTICAL CONDUCTORA</p> 	<p>Significado genérico: NIVEL RESISTIVO CON UNA INTERRUPCIÓN VERTICAL CONDUCTORA</p> <p>Expresión geológica: FRACTURA RELLENA DE ARCILLA O AGUA DE UN NIVELDE ALTA RESISTIVIDAD (CALIZA, ARENISCA, GRANITO,...)</p>

PLANTILLA PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES EN PERFILES DE RESISTIVIDAD OBTENIDOS POR TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

DISPOSITIVO DIPOLO-DIPOLO

IMAGEN	SIGNIFICADO
<p>NIVEL RESISTIVO SOBRE NIVEL CONDUCTOR (Ausencia de anomalías)</p> 	<p>Significado genérico: CONTACTO ENTRE DOS MATERIALES DE DISTINTA RESISTIVIDAD. MATERIAL DE ALTA RESISTIVIDAD SOBRE MATERIAL DE BAJA RESISTIVIDAD</p> <p>Expresión geológica: CONTACTO ENTRE ROCAS DE DISTINTA RESISTIVIDAD, O LOCALIZACIÓN DE NIVEL FREÁTICO</p>
<p>ANOMALÍA POSITIVA DE FORMA CIRCULAR U OVALADA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO RESISTIVO DE SECCIÓN CIRCULAR O CUADRADA</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE AIRE EN ROCAS DE RESISTIVIDAD MEDIA-ALTA</p>
<p>ANOMALÍA NEGATIVA CONVEXA HACIA ARRIBA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO CONDUCTOR SOBRE SUSTRATO CONDUCTOR</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE AGUA QUE DESCARGA POR FILTRACIÓN A NIVELES INFERIORES O HUECO CONDUCTOR PROFUNDO HUECO RELLENO DE AGUA A PROFUNDIDAD MAYOR DE $2D_h$</p>
<p>ANOMALÍA NEGATIVA DE FORMA CIRCULAR U OVALADA</p> 	<p>Significado genérico: HUECO CONDUCTOR ENTRE MATERIAL RESISTIVO</p> <p>Expresión geológica: CAVIDAD RELLENA DE AGUA O ARCILLA QUE NO DESCARGA POR INFILTRACIÓN A NIVELES INFERIORES</p>
<p>ADELGAZAMIENTO O CORTE DE NIVEL RESISTIVO POR FRANJA SUBVERTICAL CONDUCTORA</p> 	<p>Significado genérico: NIVEL RESISTIVO CON UNA INTERRUPCIÓN VERTICAL</p> <p>Expresión geológica: FRACTURA DE UN NIVEL DE ALTA RESISTIVIDAD (CALIZA, ARENISCA, GRANITO,...) CON UN RELLENO DE ARCILLA O AGUA</p>

7.2.2 GRÁFICOS D_{el} - D_h

Se presentan a continuación varios gráficos que relacionan el diámetro del hueco (D_h) con la distancia entre electrodos (D_{el}).

Para los diferentes ensayos realizados sobre objetivos conocidos se ha puntuado la calidad en cuanto a la detección; diferenciando entre la detección de su posición, tanto horizontal como vertical, y la detección de la forma y el tamaño del hueco. Se da mayor peso a la detección de la forma y el tamaño porque son los parámetros que mejor justifican la bondad del descubrimiento o no del hueco.

Se ha tomado como criterio de resultados el siguiente:

- **SEGURIDAD**-si la puntuación es mayor que 15 se considera que se puede afirmar con seguridad que hay una cavidad. También se puede hablar sobre su ubicación y forma.
- **NULO**-si la puntuación es menor que 8, entonces se considera que el ensayo no es válido para la detección de huecos.
- **INDICIO**- para puntuaciones intermedias lo único que se puede asegurar es que existen indicios de la existencia de una cavidad subterránea, pero no se puede afirmar con seguridad su existencia, y sobre todo no se pueden extraer datos fiables en cuanto a su forma y tamaño.

La profundidad relativa, es decir, la profundidad de la “clave” del hueco con relación al diámetro medio del hueco, es una magnitud que influye en grado sumo en la calidad de los resultados, de tal modo que, si la profundidad es grande, no se detectan con seguridad estas cavidades. Por esta razón, para profundidades mayores de 2,5 veces el diámetro del hueco, los puntos correspondientes de la gráfica se han dibujado de otro color, para no tenerlos en cuenta. Se han ploteado para poder simplemente ver rápidamente como no existen resultados “SEGURIDAD” en ensayos sobre cavidades muy profundas.

Se ha diferenciado entre ensayos sobre huecos conductores y aislantes. También se han diferenciado dos casos, según el dispositivo electródico utilizado (Wenner¹ o Dipolo-Dipolo).

¹ Determinados ensayos se han realizado con el empleo de dispositivo Schlumberger-Wenner. Dichos resultados se han incluido en las gráficas Wenner al tener una sensibilidad muy similar.

Se intenta calcular unos gráficos buscando una relación que ligue el diámetro del hueco (D_h) con la distancia entre electrodos (D_{el}), de tal modo que, en un determinado caso real en el que se quieran localizar cavidades de un determinado diámetro, se pueda, mediante el uso de estos ábacos, calcular cuál ha de ser la distancia entre electrodos máxima para poder detectar estos huecos con la debida seguridad.

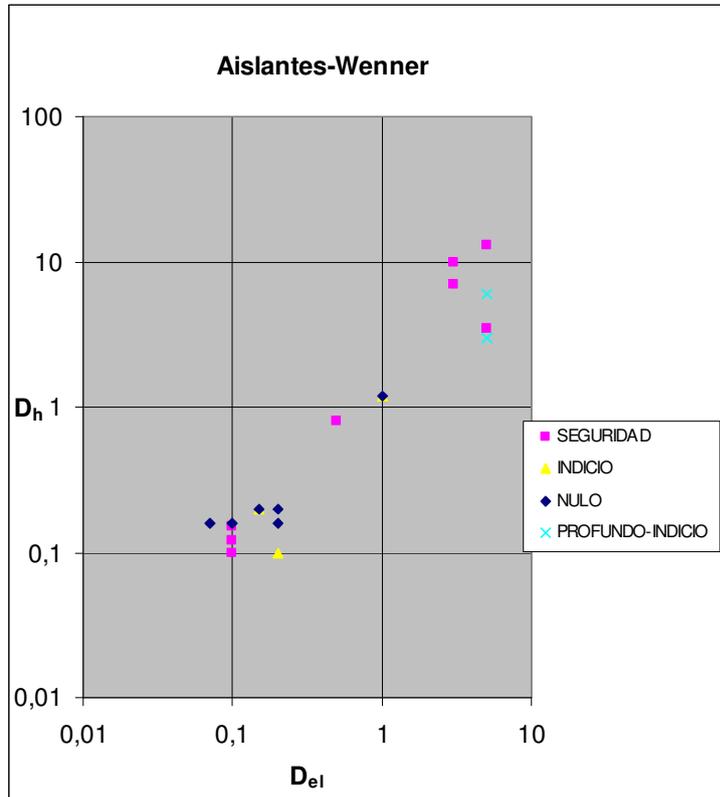
Se dibuja en coordenadas logarítmicas por la existencia de datos de ensayos reales con medidas grandes, y datos de ensayos a escala reducida con pequeñas medidas. Se dibuja así para poder ubicar todos los puntos en una misma gráfica no demasiado separados unos de otros.

El marco geológico en el que se realizan los ensayos responde a un modelo de nivel geoelectricamente resistivo (arenas-calizas) sobre un nivel poco resistivo (arcillas-margas). Por lo tanto, el uso de éstos ábacos quedará restringido, a la espera de nuevas investigaciones, a emplazamientos geológicos de este tipo.

7.2.2.1 Gráfico D_{el} - D_h para huecos aislantes en dispositivo Wenner

Datos del gráfico

Gráfico D_{el} - D_h para huecos aislantes en dispositivo Wenner								
Ensayo	Profundidad	D_{el} (m)	D_h (m)	Posición Horizontal (nota sobre 5)	Posición Vertical (nota sobre 7,5)	Tamaño y Forma (nota sobre 10)	Puntuación Total (sobre 22,5)	Resultados
Exp.2	0,6 D_h	0,1	0,15	5	4,5	6	15,5	SEGURIDAD
Exp.3 ^a	0,16 D_h	0,1	0,15	5	7,5	4	16,5	SEGURIDAD
Exp.3d	0,16 D_h	0,1	0,15	5	7,5	6	18,5	SEGURIDAD
Exp.4 ^a	0,3 D_h	0,1	0,12	5	6	6	17	SEGURIDAD
Exp.4b	0,6 D_h	0,1	0,12	5	7,5	6	18,5	SEGURIDAD
Trab.0-15	D_h	0,15	0,2	3	4,5	2	9,5	INDICIO
Trab.0-20	D_h	0,2	0,2	1	1,5	2	4,5	NULO
Trab.2-7	0,75 D_h	0,07	0,16	2	3	2	7	NULO
Trab.2-10	0,75 D_h	0,1	0,16	1	3	2	6	NULO
Trab.2-20	0,75 D_h	0,2	0,16	1	1,5	2	4,5	NULO
Trab.3-10	D_h	0,1	0,1	5	6	6	17	SEGURIDAD
Trab.3-20	D_h	0,2	0,1	5	4,5	2	11,5	INDICIO
Trab.8.1	0,25 D_h	0,5	0,8	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Clunia1	0,9 D_h	5	13	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Clunia4a	1,2 D_h	3	10	5	6	6	17	SEGURIDAD
Clunia4b	1,7 D_h	3	7	5	6	6	17	SEGURIDAD
Clunia3a	2,6 D_h	5	3	3	4,5	4	11,5	INDICIO
Clunia3b	4 D_h	5	3	3	4,5	4	11,5	INDICIO
Clunia3c	3 D_h	5	6	4	6	4	14	INDICIO
Trab.4-Gallarta	2,5 D_h	5	3,5	5	6	6	17	SEGURIDAD
Exp.4c	1,25 D_h	1	1,2	3	3	2	8	INDICIO

Gráfico D_{el} - D_h para huecos aislantes en dispositivo Wenner

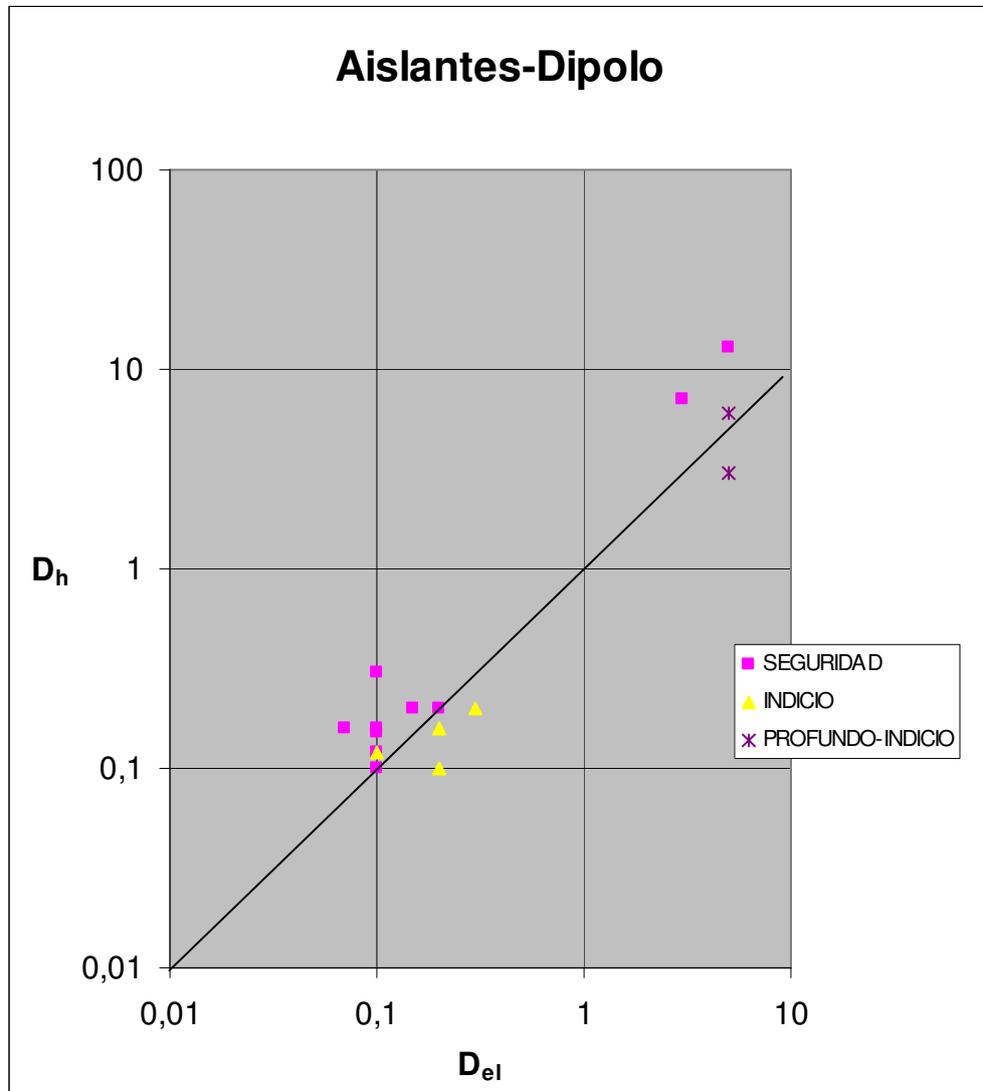
Conclusiones

En el gráfico se observa una distribución aleatoria de los puntos representados, sin que se puedan hacer agrupaciones o divisiones de zonas por categorías. Se observa la coexistencia de puntos clasificados INDICIO o NULO con puntos SEGURIDAD. La conclusión que se puede extraer de este gráfico es que este dispositivo electródico no permite encontrar ninguna relación entre el diámetro del hueco (D_h) con la distancia entre electrodos (D_{el}) debido a esta mezcla de puntos SEGURIDAD, INDICIO y NULO.

7.2.2.2 Gráfico D_{el} - D_h para huecos aislantes en dispositivo Dipolo-Dipolo

Datos del gráfico

Gráfico D_{el}-D_h para huecos aislantes en dispositivo Dipolo-Dipolo								
Ensayo	Profundidad	D_{el} (m)	D_h (m)	Posición Horizontal (nota sobre 5)	Posición Vertical (nota sobre 7,5)	Tamaño y Forma (nota sobre 10)	Puntuación Total (sobre 22,5)	Resultados
Exp.1	0,1 D_h	0,1	0,3	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Exp.2	0,6 D_h	0,1	0,15	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Exp.3a	0,16 D_h	0,1	0,15	5	7,5	6	18,5	SEGURIDAD
Exp.3d	0,16 D_h	0,1	0,15	5	4,5	6	15,5	SEGURIDAD
Exp.4a	0,3 D_h	0,1	0,12	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Exp.4b	0,6 D_h	0,1	0,12	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Trab.0-15	D_h	0,15	0,2	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Trab.0-20	D_h	0,2	0,2	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Trab.0-30	D_h	0,3	0,2	4	4,5	4	12,5	INDICIO
Trab.2-7	0,75 D_h	0,07	0,16	5	6	8	19	SEGURIDAD
Trab.2-10	0,75 D_h	0,1	0,16	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Trab.2-20	0,75 D_h	0,2	0,16	3	4,5	4	11,5	INDICIO
Trab.3-10	D_h	0,1	0,1	5	6	6	17	SEGURIDAD
Trab.3-20	D_h	0,2	0,1	4	4,5	2	10,5	INDICIO
Clunia1	D_h	5	13	5	7,5	8	20,5	SEGURIDAD
Clunia4b	1,7 D_h	3	7	5	6	6	17	SEGURIDAD
Clunia3a	2,6 D_h	5	3	4	4,5	4	12,5	INDICIO
Clunia3b	4 D_h	5	3	3	4,5	4	11,5	INDICIO
Clunia3c	3,3 D_h	5	6	4	4,5	6	14,5	INDICIO
Exp.4c	1,25 D_h	0,1	0,12	3	4,5	2	9,5	INDICIO

Gráfico D_{el} - D_h para huecos aislantes en dispositivo Dipolo-Dipolo

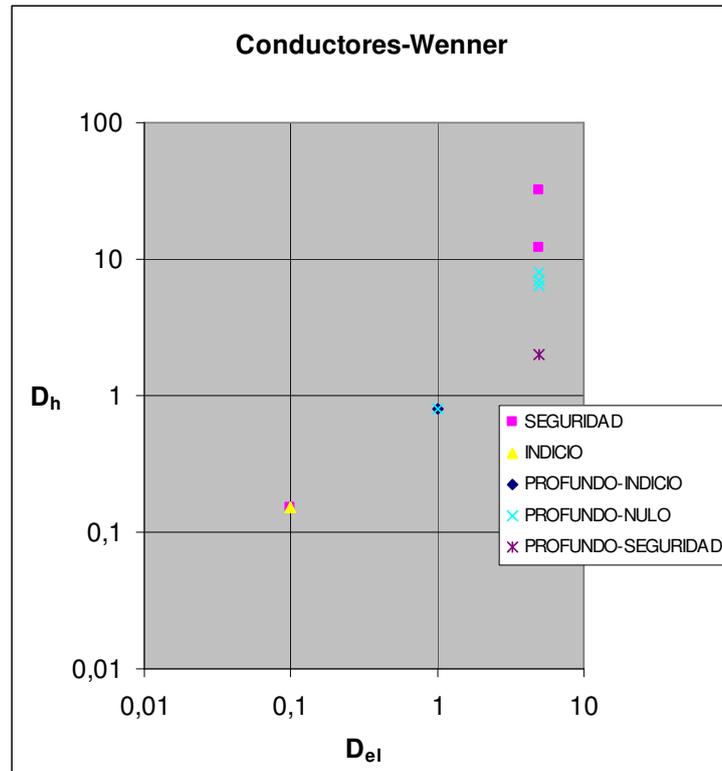
Conclusiones

A la vista de los puntos dibujados se ha hecho fácil dibujar una recta que separa los puntos donde se detecta un hueco con seguridad, de los puntos que significan solamente indicio de existencia de cavidad. Para mayor simplificación se puede decir que esa recta tiene de ecuación $D_{el} = D_h$, con lo que se puede deducir, que para poder localizar un hueco de un determinado diámetro con el dispositivo Dipolo-Dipolo hace falta que la distancia entre electrodos sea como máximo el diámetro del hueco a localizar.

7.2.2.3 Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Wenner

Datos del gráfico

Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Wenner								
Ensayo	Profundidad	D_{el} (m)	D_h (m)	Posición Horizontal (nota sobre 5)	Posición Vertical (nota sobre 7,5)	Tamaño y Forma (nota sobre 10)	Puntuación Total (sobre 22,5)	Resultados
Exp.3c	0,16 D_h	0,1	0,15	5	4,5	2	11,5	INDICIO
Exp.5	0,3 D_h	0,1	0,15	5	4,5	4	13,5	INDICIO
Exp.7	0,3 D_h	0,1	0,15	5	7,5	4	16,5	SEGURIDAD
Trab.5.1	0,37 D_h	5	32,5	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Trab.5.2	0,75 D_h	5	12	5	7,5	10	22,5	SEGURIDAD
Trab.8.12a	8,7 D_h	1	0,8	3	3	2	8	NULO
Trab.8.12b	6,2 D_h	1	0,8	3	6	4	13	INDICIO
Trab.8.15a	6,2 D_h	1	0,8	4	4,5	2	10,5	INDICIO
Trab.8.15b	5,6 D_h	1	0,8	4	3	2	9	INDICIO
Clunia1a	3,8 D_h	5	6,5	2	3	2	7	NULO
Clunia1b	3,1 D_h	5	8	2	3	2	7	NULO
Clunia1c	3,5 D_h	5	7	2	3	2	7	NULO
Trab.6	3,75 D_h	5	2	5	6	4	15	INDICIO
Trab.8.2	4,4 D_h	1	0,8	5	4,5	4	13,5	INDICIO

Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Wenner

Conclusiones

Lamentablemente no se pueden extraer conclusiones provechosas debido principalmente a que los resultados producen puntos mezclados igual que antes para el dispositivo Wenner (subapartado 7.2.2.1), además la muestra analizada es de reducido tamaño.

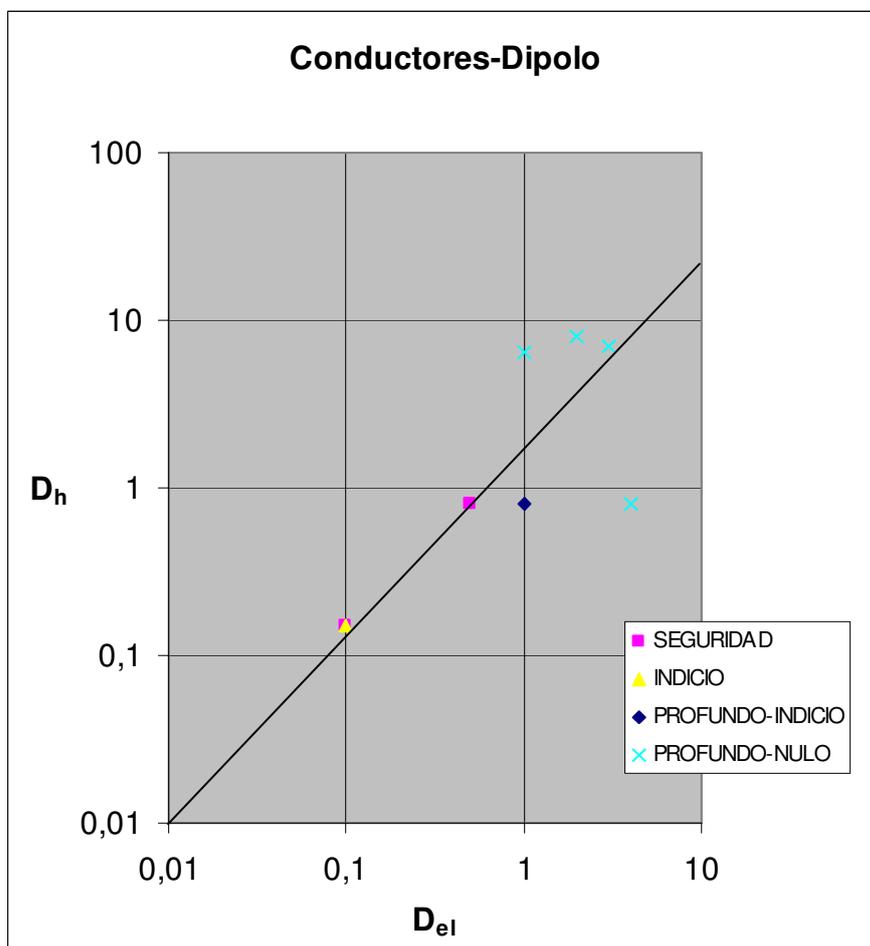
Aún así se puede afirmar que el dispositivo Wenner no da resultados determinantes y, en cualquier caso, son resultados imprevisibles, en cuanto a la relación D_{el} - D_h . En este sentido, queda abierta como futura línea de investigación la determinación de cual o cuales son los factores inciden en esta variabilidad de resultados para dispositivos Wenner.

7.2.2.4 Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Dipolo-Dipolo

Datos del gráfico

Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Dipolo-Dipolo								
Ensayo	Profundidad	D_{el} (m)	D_h (m)	Posición Horizontal (nota sobre 5)	Posición Vertical (nota sobre 7,5)	Tamaño y Forma (nota sobre 10)	Puntuación Total (sobre 22,5)	Resultados
Exp.3c	0,16 D_h	0,1	0,15	5	4,5	2	11,5	INDICIO
Exp.5	0,3 D_h	0,1	0,15	5	7,5	4	16,5	SEGURIDAD
Exp.7	0,3 D_h	0,1	0,15	5	7,5	4	16,5	SEGURIDAD
Clunia1a	3,8 D_h	5	6,5	1	1,5	2	4,5	NULO
Clunia1b	3,1 D_h	5	8	2	3	2	7	NULO
Clunia1c	3,5 D_h	5	7	2	3	2	7	NULO
Trab.8.3a	8,1 D_h	1	0,8	5	4,5	4	13,5	INDICIO
Trab.8.3b	5,2 D_h	1	0,8	5	4,5	4	13,5	INDICIO
Trab.8.6	1,8 D_h	0,5	0,8	5	7,5	6	18,5	SEGURIDAD
Trab.8.9	12,5 D_h	1,5	0,8	2	3	2	7	NULO

Gráfico D_{el} - D_h para huecos conductores en dispositivo Dipolo-Dipolo



Conclusiones

A pesar de los pocos resultados para este caso, si se confía en la bondad del dispositivo Dipolo-Dipolo para la localización de cavidades debido que es aceptado como el dispositivo de mayor sensibilidad a la presencia de huecos (Loke, M.H., 2000) y extrapolando del caso de huecos aislantes la existencia de esa recta que separa los resultados SEGURIDAD e INDICIO, se llega a dibujar esa recta que separa datos seguros de indicios, de ecuación: $D_h = 1,5 \times D_{el}$

CONCLUSIONES FINALES

Para dispositivo Dipolo-Dipolo se logran relaciones $D_{el}-D_h$, de tal modo que sabiendo el tamaño de los huecos a detectar se pueda saber cual es la distancia entre electrodos máxima para detectarlos con seguridad, y por otro lado la acción inversa, es decir, un ensayo realizado con una determinada separación entre electrodos permite detectar huecos de tamaño mayor o igual que un tamaño que se puede extraer con estos ábacos, difícilmente huecos de tamaño menor.

Otra conclusión, es que si el hueco está muy profundo es más difícil su localización. Como criterio para saber si un hueco está profundo se toma el que la profundidad sea mayor de 2,5 veces el diámetro de la cavidad. A esta conclusión se llega fácilmente debido a que no se ha conseguido ningún resultado SEGURIDAD para profundidades mayores que esta relación $P/D_h=2,5$.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CARACTERIZACIÓN DE CAVIDADES

Es mucho el trabajo todavía pendiente en lo que respecta a la caracterización de cavidades con métodos geofísicos de tomografía eléctrica. Cabe ampliar lo relativo a este trabajo con modelos geológicos más complejos y determinar los factores que inciden en la variabilidad de la calidad de resultados obtenidos con dispositivos Wenner.

También falta por ensayar el dispositivo Polo-dipolo, cuya buena cobertura horizontal se alía con la necesidad de un bajo número de medidas comparado con Wenner o Schlumberger-Wenner (Loke, M.H., 2000).

Aunque se ha diseñado una batería de experiencias muy extensa y variada, se ha de continuar ensayando nuevos modelos controlados para ampliar y mejorar las plantillas y los ábacos propuestos. Esto se debe a que las situaciones geológicas pueden ser innumerables y, consecuentemente, cuanto mayor sea el número de experiencias que se realicen, mayor será el número de equivalencias con casos geológicos reales.

Otro aspecto muy interesante es el desarrollo de la investigación mediante bloques 3D. Las herramientas y configuraciones electrónicas para obtener imágenes de tomografía tridimensionales del subsuelo ya son una realidad, y han de ser paso obligado en el futuro de estas investigaciones.

CARACTERIZACIÓN DE MANTOS DE DESLIZAMIENTO

Se entiende por deslizamientos las caídas de material por los taludes con velocidades comprendidas entre 0 y 1 pie/hora para diferenciarlos de las reptaciones, en las que el desplazamiento es de 1 pie/década. Tanto en uno como en otro caso constituyen un elemento tridimensional que se ha desprendido de la unidad litológica a la que estaba ligado y, por consiguiente, se ha transformado en un elemento inestable.

Estas unidades deslizadas suelen caracterizarse por su morfología aproximadamente lenticular pero no se conoce su desarrollo en el subsuelo, es decir, hasta qué profundidad y con qué forma se extiende por debajo de superficie. La identificación de los límites del manto de deslizamiento se puede hacer, muchas veces, en superficie pero es muy difícil saber su extensión y características en profundidad.

Es una cuestión prioritaria para conocer las dimensiones y características de estos deslizamientos.

La superficie de despegue de estos deslizamientos suele presentar material alterado, fracturado y replegado precisamente como consecuencia del proceso de deslizamiento de la unidad superficial sobre el substrato (Batayneh, A.T.; Al-Diabat, A.A., 2002). Dada la mayor permeabilidad que suele presentar esta superficie de despegue, va a permitir la circulación de agua. Esta característica, unida a la presencia frecuente de materiales arcillosos, proporciona una respuesta en los perfiles de tomografía eléctrica que va a hacer claramente diferenciable la superficie de despegue tanto de la unidad que forma el substrato como de la unidad propiamente de manto de deslizamiento.

Lo más importante a cubrir por este objetivo es aprender a identificar y precisar la superficie de despegue sea cual sea la litología de la unidad substrato y la unidad de despegue.

Dentro de esta línea de investigación se enmarcaría el estudio de las fracturas como superficies de discontinuidad por excelencia. Los distintos grados de desarrollo de éstas y sus rellenos presentan respuestas diferentes en la tomografía eléctrica que deberán analizarse y acotarse.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Se entiende por suelo contaminado aquella superficie del terreno que presenta una acumulación de materiales que han sido vertidos sobre ella y cuyas características pueden dar lugar a una contaminación de parte de esa superficie y, consecuentemente, a los terrenos que tiene por debajo. Los materiales pueden ser de tipos muy diversos: desde lodos de explotación minera y escorias hasta vertederos de residuos industriales, orgánicos, etc.

Estos depósitos que se localizan tapizando superficies de extensión diversa tienen una forma irregular tanto en planta como en espesor y suele desconocerse verdaderamente su naturaleza ya que alojan, en numerosas ocasiones, vertidos incontrolados.

Se considera de gran importancia, por tanto, el desarrollo de la tomografía eléctrica como método geofísico prospectivo para delimitar los materiales que provocan el vertido con respecto a los materiales sobre los que se dispone así como para diferenciar dentro del mismo distintos sectores que puedan corresponder a distintas naturalezas de vertidos (Barker, R.D., 1996).

Son casos de gran aplicación la delimitación en profundidad de vertederos, de vertidos de lodos, etc.; el cálculo del volumen total de materiales que comprenden, el cálculo de volúmenes de sectores de materiales de naturalezas diferentes, la definición de la extensión de cada una de las naturalezas identificadas, etc.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Acworth, R.I. (1999) *The electrical image method compared with resistivity sounding and electromagnetic profiling for investigation in areas of complex geology -A case study from ground-water investigation in a fractured rock environment*. Submitted for publication (in review).

Antigüedad Auzmendi, I. (1988) *Estudio de acuíferos karsticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a dos sistemas del País Vasco*. Revista de la Sociedad Geológica de España., 1 (1-2): 211-227.

Apparao, A.; Sirvarama Sastry, R.; Subrahmanya Sarma, V. (1997) *Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting*. Geophysical Prospecting, 45. Pp. 365-375.

Aracil, E. (2001) *La Geofísica: una herramienta para la búsqueda de agua en el subsuelo*. En Porres, J.A.; Ibañez, S. (eds) "El agua subterránea: prospección, captación y repercusiones en la obra civil" (2001). Servicio de publicaciones de la Universidad de Burgos. pp.314

Aracil, E. (2002) *La tomografía eléctrica como técnica aplicable a la obra civil*. En IV jornadas de Geotecnia organizadas por el Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Burgos. Servicio de publicaciones de la Escuela Politécnica Superior. Burgos.

Aracil, E.; Maruri, U.; Porres, J.A.; Espinosa, B. (2002) *La tomografía eléctrica: una herramienta al servicio de la piedra natural*. Roc Máquina, 76, 30-34.

Astier, J.L. (1982) *Geofísica Aplicada a la hidrogeología*. Ed. Paraninfo. Madrid.

Barber, D.C.; Brown, B.H. (1984) *Applied potential tomography*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 17. Pp. 723-733.

Barea, J. ; Casas, J. ; Durán, J. J. ; López Martínez, J. ; Martín de Vidales, J. L. (2000) *Interés paleoambiental del estudio de sedimentos detríticos endokársticos. Aplicación a cavidades del centro de la Península Ibérica*. Boletín Geológico y minero. 111 (2 / 3): 17-32.

Barker, R.D. (1989) *Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays*. Geophysics, 54 (8), 1031-1037.

Barker, R.D. (1992) *A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface*. First Break 10, 53-62.

Barker, R.D. (1996) *The application of electrical tomography in groundwater contamination studies*. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, P082.

Barker, R.D.; Moore, J. (1998) *The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies*. The Leading Edge, 17, 1454-1458.

Batayneh, A.T; Al-Diabat, A.A. (2002) *Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman-Dead Sea highway, Jordan*. Environmental Geology; published online: 5 march 2002.

Beauvais, A; Ritz, M; Parisot, J-C; Dukhan, M; Bantsimba, C. (1999) *Analysis of poorly stratified lateritic terrains overlying a granitic bedrock in West Africa, using 2-D electrical resistivity tomography*. Earth and Planetary Science Letters 173, 413-424

Bernstone, C.; Dahlin, T. (1999) *Assessment of two automated electrical resistivity data acquisition systems for landfill location surveys : Two case histories*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 4, 113-122.

Benderitter, Y. (1997) *Karst and geophysical investigations*. Hydrogéologie, 3,19-30.

Bernard, J. (2002) *Training course on Electrical methods. Principles field operation interpretation*. IRIS Instruments, Orleans, France.

Bogolubov, A.N.; Kamshilin, A.N.; Volkova, E.N. (2002) *Possibilities of geoelectrical and seismo-electrical monitoring in investigations of the karst phenomena*. Environmental Geology; published online: 9 january 2002

Bristow, C.M. (1966) *A new graphical resistivity technique for detecting air-filled cavities*. Stud. Speleology, 1. Pp. 204-227.

Cantos Figueroa, J. (1987) *Tratado de Geofísica Aplicada*. Sección de publicaciones del IGMA. Madrid.

Carpenter, E.W.; Habberjam, G.M. (1956) *A tri-potential method of resistivity prospecting*. Geophysical Prospecting, 29, 128-143.

Chen, J.; Hubbard, S.; Rubin, Y. (2001) *Estimating the hydraulic conductivity at the South Oyster Site geophysical tomographic data using Bayesian techniques based on the normal linear regresion model*. Water Resources Research Vol.37 nº6 1603-1613.

Christaras, B. (1996) *Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 54, 59-63

Claerbout, J.F. and Muir, F., (1973) *Robust modeling with erratic data*. Geophysics, 38, 826- 844.

Coloma López, P.; Sánchez Navarro, J. A. (1999) *Los acuíferos kársticos en torno a los macizos ibéricos paleozoicos de Neila y La Demanda (sector oriental)*. Boletín Geológico y Minero. 110 (2): 169-184.

Custodio, E; Llamas, M.R. (1983) *Hidrología subterránea*. tomo II, 2ª edición. Editorial Club Universitario. Alicante. 2347 pp.

Dahlin T. (1996) *2D resistivity surveying for environmental and engineering applications*. First Break, 14, 275-284.

Dahlin, T.; Bernstone, C. (1997) *A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays*. Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the

Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.

Dahlin, T.; Loke, M.H. (1997) *Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques*. Proceedings of the 3rd Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society. 143-146.

Dahlin, T.; Loke, M.H. (1998) *Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling*. Journal of Applied Geophysics, 38,237-249.

De Palol, P. (1985) *La ciudad romana de clunia*. Arqueología de las ciudades modernas superpuestas a las antiguas. Madrid; págs. 305-311.

De Palol, P.; Vilella, J. (1986) *Un santuario priápico en Clunia*. Koiné, 2, 14-25.

De Palol, P.; Vilella, J. (1987) *Clunia II. La epigrafía de Clunia*. Excavaciones Arqueológicas en España, 150 . Madrid; 183 pp.

De Palol, P. (1994) *Clunia: Historia de la ciudad y guía de las excavaciones*. 6ª edición. Diputación Provincial de Burgos. Junta de Castilla y León. Burgos. 148 pp.

Dey A.; Morrison H.F. (1979) *Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures*. Geophysical Prospecting 27, 1020-1036.

Doveton, J.H. (1994) *Geologic Log Interpretation*. SEPM Short Course n.29 (Oklahoma, EE.UU.) 169 pp.

Edwards L.S. (1977) *A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization*. Geophysics, 42, 1020-1036.

Ellis, R.G.; Oldenburg, D.W. (1994) *The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach*. Geophys. J.Int., 119,187-194.

Fernández, O.; Hidalgo, J.; Rosino, J.; Del Pozo, M. (1988) *Detección de conductos karsticos por el método de puesta a masa. Aplicación a la depresión de bollar (Vizcaya)*. II Congreso Geológico de España. 1988, 2: 195-198.

Flint, R.C.; Jackson, P.D.; McCann, D.M. (1999) *Geophysical imaging inside masonry structures*. NTD&E International, 32, 469-479

Forth, R.A.; Butcher, D.; Senior, R. (1999) *Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal*. Engineering Geology, 52, 67-74.

Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack,T.J.; Rijo, L. (1980) *Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys*. Geophysics, 45,75-93.

Galán, C. (1989) *Estudio hidrogeológico del sistema karstico de Ormazarreta (Sierra de Aralar)*. Príncipe de Viana. Suplemento de ciencias. 1989, 9 (9): 5-42.

Galán, C. (1995) *Las dimensiones de las cavidades subterráneas: conceptos utilizados, modo de cálculo y significado de las expresiones cuantitativas*. Munibe. Ciencias Naturales. (47): 7-15.

Garbó, A. (1998) *Prospección Geofísica*. En II curso de Ingeniería Geológica y Geología Aplicada. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid.

Gasulla, M. (1999) *Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*. Tesis doctoral. Depto. de Ingeniería Electrónica. Universidad Politécnica de Cataluña.

Gautam, P.; Paj Pant, S.; Ando, H. (2000) *Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles: a case study from Pokhara valley, central Nepal*. Journal of Applied Geophysics, 45, 97-110.

Godio, A.; Bottino, G.; (2001) *Electrical and electromagnetic investigation for landslide characterization*. Phys. Chem. Earth, 26 (9), 705-710.

Griffiths D.H.; Barker R.D. (1993) *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology*. Journal of Applied Geophysics, 29,211-226.

Griffiths D.H.; Turnbull J.; Olayinka A.I. (1990) *Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array*. First Break 8, 121-129.

Griffiths, D.H.; Turnbull, J. (1985) *A multi-electrode array for resistivity surveying*. First Break 3 (No.7), 16-20.

Griffiths, D.H; King, R.F. (1972) *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos*. Madrid, Paraninfo.

Häuselmann, P.; Jeannin, P-Y.; Bitterli, T. (1999) *Relationships between karst and tectonics: case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland)* Geodinamica Acta, 12, 377-388.

Hoover, H.C. y Hoover, L.H. (1950) *Georgius Agricola DE RE METALLICA*. Dover Publications, Inc. New York.

Janardhana, N.; Reedy, T.V. (1998) *Fracture pattern and electrical resistivity studies for groundwater exploration*. Environmental Geology, 34 (2/3), 175-182.

Jim Yeh, T.C.; Liu, S. (2000) *Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method*. Water Resources Research, Vol.36 nº8, 2095-2105.

Johansson, S.; Dahlin, T. (1996) *Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements*. European Journal of Engineering and Geophysics, 1, 229-247.

Junta de Castilla y León (1995) *Mapa Hidrogeológico de Castilla y León*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Valladolid. Elaboración temática BESEL,S.A., Carlos Duch Martínez et al.

Karlik, G.; Ali Kaya, M. (2001) *Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey*. Environmental Geology, 40 (6), 725-731.

- Kaufmann, G.; Braun, J. (1999) *Karst aquifer evolution in fractured rocks*. Water Resources Research. Vol.35 nº11, 3223-3238.
- Kaufmann, G. Braun, J. (2000) *Karst aquifer evolution in fractured, porous rocks*. Water Resources Research, Vol.36 nº6, 1381-1391.
- Kemna, A.; Binley, A.; Ramirez, A.; Daily, W. (2000) *Complex resistivity tomography for environmental applications*. Chemical Engineering Journal, 77, 11-18.
- Keller G.V.; Frischknecht F.C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Koefoed, O. (1979) *Geosounding Principles I: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- Kotre, C.J. (1996) *Detection of sub-surface objects by electrical impedance tomography*. EUREL International Conference on the detection of abandoned land mines, 7-9 October, Edinburg. Pp. 67-71.
- Lagmansson, M. (1998) *Marine resistivity survey*. Advanced Geosciences Inc. web site: www.agiusa.com
- Legget, R.; Karrow, P (1986) *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. McGraw-Hill, México.
- Li Y.; Oldenburg, D. W. (1992) *Approximate inverse mappings in DC resistivity problems*. Geophysical Journal International 109, 343-362.
- Loke, M.H. (1994) *The inversion of two-dimensional resistivity data*. Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.
- Loke M.H.; Barker R.D. (1996). *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical Prospecting, 44, 499-523.
- Loke, M.H. (1999) *Time-lapse resistivity imaging inversion*. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Eml.
- Loke, M.H. (2000) *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. University of Birmingham web site, Downloads: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html
- Long, A.J.; Derickson, R.G. (1999) *Linear systems analysis in a karst aquifer*. Journal of Hydrology, 219, 206-217.
- Lowry, T.; Shive, P.N. (1990) *An evaluation of Bristow's method for the detection of subsurface cavities*. Geophysics, 55 (5). Pp. 514-520.
- Martínez Lorenzo, A.; Hernández Neira, J.L.; Gisbert Briansó, M. (1989) *Física*. Ed. Bruño. Madrid. Pp 271

Mayoral Gamó, V.; Margareto González, P.; Robles Cortes, A.; Hernando Leal, M. (2002) *Yacimiento Arqueológico de Clunia*. Web site de Arqueoturismo S.L.L. <http://go.to/clunia>.

McCarthy, J.; Shevenell, L. (1998) *Obtaining representative ground water samples in a fractured and karstic formation*. *Ground Water*, Vol. 36 nº2, 251-260.

Mendieta, F. (2001) *Aplicación de las técnicas petroleras de investigación para la búsqueda de aguas subterráneas. Sísmica de alta resolución*. En Porres, J.A.; Ibañez, S. (eds) "El agua subterránea: prospección, captación y repercusiones en la obra civil" (2001). Servicio de publicaciones de la Universidad de Burgos. Pp.314

Militzer, H.; Rösler, R.; Lösch, W. (1979) *Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods*. *Geophysical Prospecting*, 27. Pp. 640-652.

Miller, R.D.; Steeples, D.W.; Brannan, M. (1989) *Mapping a bedrock surface under dry alluvium with shallow seismic reflections*. *Geophysics*, 54. 1528-1534.

Noel, M.; Xu, B. (1991) *Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study*. *Geophys. J. Int.*, 114. Pp. 95-102.

Orellana, E. (1982) *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. 2ª ed. Madrid. Paraninfo Vol.1.

Padilla Benitez, A.; Pulido Bosch, A. (1988) "*tridep*", un modelo lluvia-caudal aplicado al estudio de acuíferos. II Congreso Geológico de España. 2: 425-428.

Panissod, C.; Dabas, M.; Hesse, A.; Jolivet, A.; Tabbagh, J.; Tabbagh, A. (1998) *Recent developments in shallow depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays*. *Geophysics*, 65, 1542-1550.

Parasnis, D.S. (1997) *Principles of Applied Geophysics*. Ed. Chapman&Hall. 5ªEd. 456 pp.

Park, S.K.; Van, G.P. (1991) *Inversion of pole-pole data for 3D resistivity structure beneath arrays of electrodes*. *Geophysics*, 56(7). Pp. 951-960.

Paukstys, B.; Cooper, A.H.; Arustiene, J. (1999) *Planning for gypsum geohazards in Lithuania and England*. *Engineering Geology*, 52, 93-103

Pazdirek, O.; Blaha, V. (1996) *Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system*. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam. Pp. 833-837.

Peters, L.; Daniels, J.; Young, J.D. (1994) *Ground Penetrating Radar as a subsurface environmental sensing tool*. *Proceedings of the IEEE*, 82 (12), 1802-1822.

Pinault, J.L.; Pauwels, H.; Cann, C. (2001) *Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification*. *Water Resources Research*, Vol.37 nº8, 2179-2190.

- Plata Torres, J.L.; Rubio Sanchez-Aguililla, F.M.; (1999) *Sondeos de resonancia magnética (SRM). Ensayo en un acuífero detrítico del sur de España*. Boletín Geológico y Minero, 110-5, 603-626 (51-74)
- Porres, J.A.; Ibañez, S. (eds) "El agua subterránea: prospección, captación y repercusiones en la obra civil" (2001). Servicio de publicaciones de la Universidad de Burgos. pp.314
- Porres, J.A.; Aracil, A. (2002) *Prospección geofísica del subsuelo por tomografía eléctrica*. Encuentros con la Ciencia de la Universidad de Burgos.
- Pulido Bosch, A. (2001) *Investigación y exploración de acuíferos kársticos*. Boletín Geológico y Minero, 112 nº especial 65-76
- Rider, M. (2002) *The geological interpretation of well logs*. Rider-French Consulting Ltd. Escocia. 280 pp. 2ªEd. revisada.
- Ritz, M.; Parisot, J-C; Diouf, S.; Beauvais, A.; Dione, F.; Niang, M. (1999) *Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa*. Journal of Applied Geophysics, 41, 335-344.
- Rodríguez Castillo, R.; Reyes Gutiérrez, R. (1992) *Resistivity identification of shallow mining cavities in Real del Monte, Mexico*. Engineering Geology, 33. Pp. 141-149.
- Roth, M.J.S.; Mackey, J.R.; Mackey, C.; Nyquist, J.E. (2002) *A case study of the reliability of multielectrode earth resistivity testing for geotechnical investigation in karst terrains*. Engineering Geology (En revision)
- Roy, M.J.S.; Apparao, A. (1971) *Depth of investigation in direct current methods*. Geophysics, 36 (5), 943-958.
- Ruiz, M.; González, S. (1999) *Geología aplicada a la ingeniería civil*. Ed. Noriega. Mejico, D.F. 255 pp.
- Sacristan de Lama, J. D. (1993) *Clunia*. En "Leyenda y arqueología de las ciudades prerromanas en la península Ibérica". Madrid 1993, II; págs. 134-137.
- Santamarina, J.C.; Rix, G.J. (1998) *Near Surface Geophysical Inversion Surface Waves and Geotomography*. Georgia Institute of Technology. Atlanta GA.
- Sanz Pérez, E. (1996) *Hidrodinámica de los acuíferos karsticos de las Sierras de Urbión y Neila (Burgos)*. Estudios geológicos (Madrid). 52 (5-6): 279-305.
- Sasaki, Y. (1992) *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*. Geophysical Prospecting, 40, 453-464.
- Serra, O; Abott, H.T. (1980) *The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy*. 55th Ann. Conf. Dallas, 1-19. SP-9270.
- Sharma, P.V. (1986) *Geophysical methods in geology*. 2ª ed. New York. Elsevier.
- Silvester P.P.; Ferrari R.L. (1990) *Finite elements for electrical engineers*. 2nd. ed. Cambridge University Press.

Slater, L.; Binley, A.M.; Zaidman, M.D.; West, L.J. (1997) *Investigation of vadose zone flow mechanisms in unsaturated chalk using cross-borehole ERT*. Proceedings of the EEGS European Section 3rd Meeting, Aarhus, Denmark, 17-20.

Smith, D.L. (1986) *Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways*. Geophysics, 51(3).

Spiegel, R.J.; Sturdivant, V.R.; Owen, T.E. (1980) *Modeling resistivity anomalies from localized voids under irregular terrain*. Geophysics, 45, 1164-1183.

Sree Devi, P.D.; Srinivasulu, S.; Raju, Kesava K. (2001) *Delineation of groundwater potential zones and electrical resistivity studies for groundwater exploration*. Environmental Geology, 40, 1252-1264.

Stewart, R.R. (1996) *Exploration Geophysics Tomography: Fundamentals*. Course Note Series. Volumen 3. Society of Exploration Geophysics. Tulsa OK.

Sumanovac, F.; Weisser, M. (2001) *Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains*. Journal of Applied Geophysics, 47. 13-28

Tong, L.; Yang, C. (1990) *Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion*. Geophysics, 55, 354-361.

Tryggvason, A.; Carbonell, A.; Pérez Estaún, A. (1999) *Tomografía sísmica. Visualizar el interior de la tierra*. Estratos, 53, 14-17.

Turbón, D. (1984) *Contribución al estudio de la población romana de la Meseta*. Bol. de la Sociedad Española de antropología biológica V, nº5. Madrid 1984, págs. 75-78.

Witherly, K.E.; Vyselaar, J. (1990) *A geophysical case history of the Poplar Lake Copper- Molybdenum deposit, Houston Area, British Columbia*. En Fink, J.B.; McAlister, E.O.; Stenberg, B.K.; Wieduwilt, W.G.; Ward, S.H. (Eds) (1990) "Induced polarization : Applications and cases histories". Investigations in Geophysics Nº4, Soc. Expl. Geophys.

Yu, M.; Dougherty, D. (2000) *Modified total variation methods for three-dimensional electrical resistance tomography inverse problems*. Water Resources Research, Vol.36 nº7, 1653-1664.

Zhou, W.; Beck, B.F.; Stephenson, B.J. (1999) *Investigation of groundwater flow in karst areas using component separation of natural potential measurements*. Environmental Geology, 37, (1-2) 19-25.

Zhou, Q.Y.; Shimada, J.; Sato, A. (2001) *Tree-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water using electrical resistivity tomography*. Water Resources Research, Vol. 37 nº2, 273-285.

Zhou, W.; Beck, B.F.; Stephenson, J.B. (2000) *Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes*. Environmental Geology, 39 (7), 760-766.

**ANEXO I: ENSAYOS SOBRE MUESTRAS DE
LABORATORIO**

ARENA LAVADA (Primeros días):

% de agua: Humedad Natural
 Grado de compactación: Compactación
 relleno manual
 Peso de la probeta total: 2495,28 gr.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 13,1 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $458315,528 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = 2,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 13,1 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $458315,528 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = 2,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 13,1 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $458315,528 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = 2,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 13,1 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $458315,528 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 2,5 V
 $I = 64,2 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 80,7 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2823,364 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = 5,2 V
 $I = 65,8 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 79 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2763,888 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = 5,2 V
 $I = 66,1 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 78,8 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2756,890 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = 5,2 V
 $I = 67,3 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 77,5 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2711,409 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 6,9 V
 $I = 96,5 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 71,4 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2497,995 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = 6,9 V

$I = 97,7 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 70,6 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2470,006 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = 6,9 V
 $I = 99,2 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 69,5 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2431,521 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = 6,9 V
 $I = 99,4 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 69,4 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2428,023 \text{ }\Omega^*\text{m}$

ARENA UTRILLAS (Primeros días):

% de agua: Humedad Natural
 Grado de compactación: Sin compactar
 Peso de la probeta total: 2556,94 gr.
 Peso de todo lo que no es arena: 237,82 gr.

1^{er} día:**Con 24 voltios:**

Medida 1.-V = 3,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 18,3 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $640242,303 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = 3,5 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 36,8 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $1287481,789 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = 3,5 V
 $I = 4,5 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 783,4 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $274079,683 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = 3,5 V
 $I = 8,1 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 434,5 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $15201,382 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 5.-V = 3,5 V
 $I = 8,8 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 401,8 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $14057,342 \text{ }\Omega^*\text{m}$

2^o día:**Con 9 voltios:**

Medida 1.-V = 1,9 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 9,8 \text{ M}\Omega$
 Resistividad = $342861,998 \text{ }\Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = 1,9 V
 I = 190,4 nA
 R = 9,8 MΩ
 Resistividad = 342861,998 Ω*m

Medida 3.-V = 1,9 V
 I = 190,4 nA
 R = 9,8 MΩ
 Resistividad = 342861,998 Ω*m

Medida 4.-V = 1,9 V
 I = 190,4 nA
 R = 9,8 MΩ
 Resistividad = 342861,998 Ω*m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 3,1 V
 I = 190,4 nA
 R = 16,4 MΩ
 Resistividad = 573769,058 Ω*m

Medida 2.-V = 3,1 V
 I = 2,3 μA
 R = 1,4 MΩ
 Resistividad = 48980,286 Ω*m

Medida 3.-V = 3,1 V
 I = 4 μA
 R = 775,6 KΩ
 Resistividad = 27135,078 Ω*m

Medida 4.-V = 3,1 V
 I = 4,1 μA
 R = 763,4 KΩ
 Resistividad = 26708,250 Ω*m

Medida 5.-V = 3,1 V
 I = 3,7 μA
 R = 841,7 KΩ
 Resistividad = 29447,647 Ω*m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 4,2 V
 I = 13,6 μA
 R = 305,6 KΩ
 Resistividad = 10691,697 Ω*m

Medida 2.-V = 4,2 V
 I = 14,4 μA
 R = 288,7 KΩ
 Resistividad = 10100,435 Ω*m

Medida 3.-V = 4,2 V
 I = 14 μA
 R = 297,8 KΩ

Resistividad = 10418,806 Ω*m

Medida 4.-V = 4,2 V
 I = 15,6 μA
 R = 266,9 KΩ
 Resistividad = 9337,742 Ω*m

ARENA LAVADA, con esponjas (≈
 secas):

% de agua: Humedad Natural
 Grado de compactación: Proctor Normal
 Peso de la probeta total: 2580,83 gr.

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 4,8 V
 I = 75,9 μA
 R = 62,9 KΩ
 Resistividad = 2200,614 Ω*m

Medida 2.-V = 4,8 V
 I = 82,6 μA
 R = 57,9 KΩ
 Resistividad = 2025,685 Ω*m

Medida 3.-V = 4,8 V
 I = 85,1 μA
 R = 56,3 KΩ
 Resistividad = 1969,707 Ω*m

Medida 4.-V = 4,8 V
 I = 87,3 μA
 R = 54,9 KΩ
 Resistividad = 1920,727 Ω*m

Medida 5.-V = 4,8 V
 I = 87,6 μA
 R = 54,8 KΩ
 Resistividad = 1917,228 Ω*m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 6,4 V
 I = 131,8 μA
 R = 48,5 KΩ
 Resistividad = 1696,817 Ω*m

Medida 2.-V = 6,4 V
 I = 132,4 μA
 R = 48,3 KΩ
 Resistividad = 1689,820 Ω*m

Medida 3.-V = 6,4 V
 I = 132,8 μA
 R = 48,1 KΩ

Resistividad = 1682,823 Ω^*m Resistividad = 1847,257 Ω^*m

Medida 4.-V = 6,4 V

I = 133,4 μA R = 47,8 K Ω Resistividad = 1672,327 Ω^*m **Con 24 voltios:**

Medida 1.-V = 11,7 V

I = 279 μA R = 41,9 K Ω Resistividad = 1465,910 Ω^*m **Con 180 voltios:**Medida 1.-V = 667 μV

I = 190,4 nA

R = 3,5 M Ω Resistividad = 122450,714 Ω^*m

Medida 2.-V = 11,6 V

I = 277,2 μA R = 41,9 K Ω Resistividad = 1465,910 Ω^*m Medida 2.-V = 705,9 μV

I = 190,4 nA

R = 3,7 M Ω Resistividad = 129447,897 Ω^*m

Medida 3.-V = 11,6 V

I = 276,8 μA R = 41,8 K Ω Resistividad = 1462,411 Ω^*m Medida 3.-V = 709,3 μV

I = 190,4 nA

R = 3,7 M Ω Resistividad = 129447,897 Ω^*m

Medida 4.-V = 11,5 V

I = 273,7 μA R = 42,2 K Ω Resistividad = 1476,406 Ω^*m Medida 4.-V = 689,6 μV

I = 190,4 nA

R = 3,6 M Ω Resistividad = 125949,306 Ω^*m **Con 36 voltios:**

Medida 1.-V = 14,6 V

I = 357,5 μA R = 40,7 K Ω Resistividad = 1423,927 Ω^*m

ARENA LAVADA, con esponjas
rehumedecidas.

% de agua: Humedad Natural

Grado de compactación: Proctor Normal

Peso de la probeta total: 2645,82 gr.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 4,2 V

I = 79,5 μA R = 52,8 K Ω Resistividad = 1847,257 Ω^*m

Medida 2.-V = 14,4 V

I = 353,2 μA R = 40,8 K Ω Resistividad = 1427,426 Ω^*m

Medida 2.-V = 4,2 V

I = 80,5 μA R = 52,1 K Ω Resistividad = 1822,766 Ω^*m

Medida 3.-V = 14,3 V

I = 351,6 μA R = 40,7 K Ω Resistividad = 1423,927 Ω^*m

Medida 3.-V = 4,2 V

I = 78,3 μA R = 53,5 K Ω Resistividad = 1871,747 Ω^*m

Medida 4.-V = 14,2 V

I = 347 μA R = 40,9 K Ω Resistividad = 1430,924 Ω^*m

Medida 4.-V = 4,2 V

I = 79,3 μA R = 52,8 K Ω **ARENA de PLAYA:**

% de agua: 0% (seca estufa)

Grado de compactación: Vibración

Peso de la probeta total: 2572,71 gr.

Peso de la muestra húmeda (B17) + tara:
125,44 gr.

Peso de la muestra seca + tara: 125,42 gr.

Peso tara: 74,69 gr.

1^{er} día:

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = -18,9 V

I = 190,4 nA

R = -99,3 Ω

Resistividad = -3,474 Ω*m

Medida 2.-V = 105,2 μV

I = 190,4 nA

R = 552,5 Ω

Resistividad = 19,330 Ω*m

Medida 3.-V = 90,2 μV

I = 190,4 nA

R = 473,4 Ω

Resistividad = 16,562 Ω*m

Medida 4.-V = 110,9 μV

I = 190,4 nA

R = 582,2 Ω

Resistividad = 20,369 Ω*m

Medida 5.-V = 93,9 μV

I = 190,4 nA

R = 493 Ω

Resistividad = 17,248 Ω*m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 124,4 μV

I = 190,4 nA

R = 653,4 Ω

Resistividad = 22,860 Ω*m

Medida 2.-V = 175,8 μV

I = 190,4 nA

R = 923,4 Ω

Resistividad = 32,306 Ω*m

Medida 3.-V = 129,9 μV

I = 190,4 nA

R = 682,4 Ω

Resistividad = 23,874 Ω*m

Medida 4.-V = 136,5 μV

I = 190,4 nA

R = 716,8 Ω

Resistividad = 25,078 Ω*m

Con 90 voltios:

Medida 1.-V = 275,7 μV

I = 190,4 nA

R = 1,4 KΩ

Resistividad = 48,980 Ω*m

Medida 2.-V = 255,9 μV

I = 190,4 nA

R = 1,3 KΩ

Resistividad = 45,482 Ω*m

Medida 3.-V = 334,2 μV

I = 190,4 nA

R = 1,8 KΩ

Resistividad = 62,975 Ω*m

Medida 4.-V = 271,9 μV

I = 190,4 nA

R = 1,4 KΩ

Resistividad = 48,980 Ω*m

Con 100 voltios:

Medida 1.-V = 383,4 μV

I = 190,4 nA

R = 2 KΩ

Resistividad = 69,972 Ω*m

Medida 2.-V = 357,3 μV

I = 190,4 nA

R = 1,9 KΩ

Resistividad = 66,473 Ω*m

Medida 3.-V = 715,7 μV

I = 190,4 nA

R = 3,8 KΩ

Resistividad = 132,947 Ω*m

Medida 4.-V = 721,6 μV

I = 190,4 nA

R = 2,2 KΩ

Resistividad = 76,969 Ω*m

2º día:

Con 180 voltios:

Medida 1.-V = 163,9 μV

I = 190,4 nA

R = 860,8 Ω

Resistividad = 30,116 Ω*m

Medida 2.-V = 166,1 μV

I = 190,4 nA

R = 872,5 Ω

Resistividad = 30,525 Ω*m

Medida 3.-V = 166,6 μV

I = 190,4 nA

R = 874,9 Ω

Resistividad = 30,609 Ω*m

Medida 4.-V = 134,6 μV

I = 190,4 nA

R = 706,6 Ω

Resistividad = 24,721 Ω*m

ARENA LAVADA:

% de agua: 0% (seca estufa)
 Grado de compactación: Vibración
 Peso de la probeta total: 2747,72 gr.
 Peso de la muestra (B8) + tara: 129,31 gr.
 Peso de la muestra seca + tara: 129,29 gr.
 Peso tara: 68,70 gr.
 Probeta nº 1.

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 81,4 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 427,3 Ω
 Resistividad = 14,950 Ω^*m

Medida 2.-V = 66,2 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 347,4 Ω
 Resistividad = 12,154 Ω^*m

Medida 3.-V = 52,8 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 477 Ω
 Resistividad = 16,688 Ω^*m

Medida 4.-V = 52 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 273,1 Ω
 Resistividad = 9,555 Ω^*m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 70,2 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 368,6 Ω
 Resistividad = 12,896 Ω^*m

Medida 2.-V = 73,8 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 387,4 Ω
 Resistividad = 13,554 Ω^*m

Medida 3.-V = 73,6 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 386,6 Ω
 Resistividad = 13,526 Ω^*m

Medida 4.-V = 66,9 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 351,4 Ω
 Resistividad = 12,294 Ω^*m

Con 90 voltios:

Medida 1.-V = 86,4 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 453,9 Ω
 Resistividad = 15,880 Ω^*m

Medida 2.-V = 85,5 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 449,2 Ω
 Resistividad = 15,716 Ω^*m

Medida 3.-V = 94 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 493,8 Ω
 Resistividad = 17,276 Ω^*m

Medida 4.-V = 172,7 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 907 Ω
 Resistividad = 31,732 Ω^*m

Con 180 voltios:

Medida 1.-V = 335,3 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 1,8 K Ω
 Resistividad = 62,975 Ω^*m

Medida 2.-V = 281,5 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 1,5 K Ω
 Resistividad = 52,479 Ω^*m

Medida 3.-V = 276,6 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 1,5 K Ω
 Resistividad = 52,479 Ω^*m

Medida 4.-V = 288,2 μ V
 I = 190,4 nA
 R = 1,5 K Ω
 Resistividad = 52,479 Ω^*m

ARENA de PLAYA:

% de agua: Humedad Natural
 Grado de compactación: Vibración
 Peso de la bandeja + arena seca (estufa): 3738,2 gr.
 Peso de la bandeja + arena humedad natural (muestra B2): 3910,1 gr.
 Bandeja: HR#02
 Peso de la probeta total: 2181,38 gr.
 Peso de la muestra húmeda + tara: 127,21 gr.
 Peso de la muestra seca + tara: 123,75 gr.
 Peso tara: 66,84 gr.
 Probeta nº 2.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,3 V

I = 190,4 nA
 R = 12 MΩ
 Resistividad = 419831,018 Ω*m

Medida 2.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 MΩ
 Resistividad = 419831,018 Ω*m

Medida 3.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 MΩ
 Resistividad = 419831,018 Ω*m

Medida 4.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 MΩ
 Resistividad = 419831,018 Ω*m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 5,5 V
 I = 95,1 μA
 R = 57,4 KΩ
 Resistividad = 2008,192 Ω*m

Medida 2.-V = 5,4 V
 I = 100,9 μA
 R = 54 KΩ
 Resistividad = 1889,240 Ω*m

Medida 3.-V = 5,4 V
 I = 105,2 μA
 R = 51,6 KΩ
 Resistividad = 1805,273 Ω*m

Medida 4.-V = 5,4 V
 I = 112,1 μA
 R = 48,4 KΩ
 Resistividad = 1693,318 Ω*m

Medida 5.-V = 5,4 V
 I = 115,2 μA
 R = 47,1 KΩ
 Resistividad = 1647,837 Ω*m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 7,1 V
 I = 166,9 μA
 R = 42,4 KΩ
 Resistividad = 1483,403 Ω*m

Medida 2.-V = 7 V
 I = 167,8 μA
 R = 41,9 KΩ
 Resistividad = 1465,910 Ω*m

Medida 3.-V = 7 V
 I = 168,7 μA
 R = 41,5 KΩ
 Resistividad = 1451,916 Ω*m

Medida 4.-V = 7 V
 I = 170,9 μA
 R = 40,9 KΩ
 Resistividad = 1430,924 Ω*m

ARENA LAVADA:

% de agua: Humedad Natural (saco)
 Grado de compactación: Vibración
 Peso de la muestra húmeda (B-18) + tara: 112,93 gr.
 Peso de la muestra seca + tara: 110,38 gr.
 Peso tara: 69,45 gr.
 Probeta nº 3.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,5 V
 I = 190,4 nA
 R = 12,9 MΩ
 Resistividad = 451318,345 Ω*m

Medida 2.-V = 2,5 V
 I = 190,4 nA
 R = 12,9 MΩ
 Resistividad = 451318,345 Ω*m

Medida 3.-V = 2,5 V
 I = 190,4 nA
 R = 12,9 MΩ
 Resistividad = 451318,345 Ω*m

Medida 4.-V = 2,5 V
 I = 190,4 nA
 R = 12,9 MΩ
 Resistividad = 451318,345 Ω*m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 5,1 V
 I = 190,4 nA
 R = 27 MΩ
 Resistividad = 944619,791 Ω*m

Medida 2.-V = 5,2 V
 I = 190,4 nA
 R = 27,1 MΩ
 Resistividad = 948118,383 Ω*m

Medida 3.-V = 5,2 V
 I = 2,5 μA

$R = 2 \text{ M}\Omega$
Resistividad = $69971,836 \text{ }\Omega^*m$

Medida 4.-V = 5,2 V
 $I = 11,2 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 461 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $16128,508 \text{ }\Omega^*m$

Medida 5.-V = 5,2 V
 $I = 20,8 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 248 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $8676,508 \text{ }\Omega^*m$

Medida 6.-V = 5,2 V
 $I = 25,8 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 200,4 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $7011,178 \text{ }\Omega^*m$

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 5,2 V
 $I = 32,7 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 158,6 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $5548,767 \text{ }\Omega^*m$

Medida 2.-V = 5,2 V
 $I = 36,2 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 143,2 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $5009,984 \text{ }\Omega^*m$

Medida 3.-V = 5,2 V
 $I = 37,9 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 136,9 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $4789,572 \text{ }\Omega^*m$

Medida 4.-V = 5,2 V
 $I = 41,1 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 126,6 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $4429,217 \text{ }\Omega^*m$

ARENA de UTRILLAS:

% de agua: Humedad Natural
Grado de compactación: Vibración
Peso de la bandeja + arena seca (estufa):
2769,57 gr.
Peso bandeja: 650,49 gr.
Peso de la bandeja + arena humedad
natural (muestra B12): 2944,62 gr.
Peso de la probeta total: 2250,38 gr.
Peso de la probeta total el día que la
desarmé (la añadimos arena): 2335,97 gr.
Peso de todo lo que no es arena: 235,29
gr.
Peso de la muestra húmeda + tara: 115,93
gr.

Peso de la muestra seca + tara: 111,92 gr.
Peso tara: 65,99 gr.
Probeta nº 4.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,3 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 12,3 \text{ M}\Omega$
Resistividad = $430326,794 \text{ }\Omega^*m$

Medida 2.-V = 2,3 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 12,3 \text{ M}\Omega$
Resistividad = $430326,794 \text{ }\Omega^*m$

Medida 3.-V = 2,3 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 12,3 \text{ M}\Omega$
Resistividad = $430326,794 \text{ }\Omega^*m$

Medida 4.-V = 2,3 V
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 12,3 \text{ M}\Omega$
Resistividad = $430326,794 \text{ }\Omega^*m$

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 6 V
 $I = 12,3 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 486,8 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $17031,145 \text{ }\Omega^*m$

Medida 2.-V = 6 V
 $I = 39,9 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 149,4 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $5226,896 \text{ }\Omega^*m$

Medida 3.-V = 5,9 V
 $I = 58,9 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 100,6 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $3519,583 \text{ }\Omega^*m$

Medida 4.-V = 5,9 V
 $I = 74,7 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 79,1 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $2767,386 \text{ }\Omega^*m$

Medida 5.-V = 5,9 V
 $I = 86,3 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 68,2 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $2386,040 \text{ }\Omega^*m$

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 7,6 V
 $I = 147,8 \text{ }\mu\text{A}$
 $R = 51,6 \text{ K}\Omega$
Resistividad = $1805,273 \text{ }\Omega^*m$

Medida 2.-V = 7,6 V
 I = 159,8 μ A
 R = 47,5 K Ω
 Resistividad = 1661,831 Ω *m

Medida 3.-V = 7,5 V
 I = 164,2 μ A
 R = 45,9 K Ω
 Resistividad = 1605,854 Ω *m

Medida 4.-V = 7,5 V
 I = 170,3 μ A
 R = 44,1 K Ω
 Resistividad = 1542,879 Ω *m

Medida 5.-V = 7,5 V
 I = 173,5 μ A
 R = 43,2 K Ω
 Resistividad = 1511,392 Ω *m

ARENA LAVADA:

% de agua: Humedad Natural (saco)
 Grado de compactación: Proctor Normal.
 Peso de la probeta total: 2740,90 gr.
 Peso de la muestra húmeda (15) + tara: 114,37 gr.
 Peso de la muestra seca + tara: 111,10 gr.
 Peso tara: 62,88 gr.
 Probeta nº 6.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 M Ω
 Resistividad = 419831,018 Ω *m

Medida 2.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 M Ω
 Resistividad = 419831,018 Ω *m

Medida 3.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 12 M Ω
 Resistividad = 419831,018 Ω *m

Medida 4.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA
 R = 11,9 M Ω
 Resistividad = 416332,426 Ω *m

Medida 5.-V = 2,3 V
 I = 190,4 nA

R = 11,9 M Ω
 Resistividad = 416332,426 Ω *m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 6,7 V
 I = 190,4 nA
 R = 35,3 M Ω
 Resistividad = 1235002,912 Ω *m

Medida 2.-V = 6,7 V
 I = 190,4 nA
 R = 35,2 M Ω
 Resistividad = 1231504,320 Ω *m

Medida 3.-V = 6,7 V
 I = 8,1 μ A
 R = 830,9 K Ω
 Resistividad = 29069,799 Ω *m

Medida 4.-V = 6,7 V
 I = 24,2 μ A
 R = 275,8 K Ω
 Resistividad = 9649,116 Ω *m

Medida 5.-V = 6,7 V
 I = 37,5 μ A
 R = 177,9 K Ω
 Resistividad = 6223,995 Ω *m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 8,7 V
 I = 125,7 μ A
 R = 68,8 K Ω
 Resistividad = 2407,031 Ω *m

Medida 2.-V = 8,6 V
 I = 129,7 μ A
 R = 66,4 K Ω
 Resistividad = 2323,065 Ω *m

Medida 3.-V = 8,6 V
 I = 134 μ A
 R = 64 K Ω
 Resistividad = 2239,099 Ω *m

Medida 4.-V = 8,5 V
 I = 136 μ A
 R = 62,9 K Ω
 Resistividad = 2200,614 Ω *m

Medida 5.-V = 8,5 V
 I = 141 μ A
 R = 60,6 K Ω
 Resistividad = 2120,147 Ω *m

Medida 6.-V = 8,5 V

$I = 145,3 \mu\text{A}$
 $R = 58,7 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $2053,673 \Omega^*\text{m}$

ARENA de UTRILLAS:

% de agua: 0% (seca estufa)
 Grado de compactación: Vibración
 Peso de la probeta total: 2553,01 gr.
 Peso de la probeta total el día que la desarmé: 2553,17 gr.
 Peso de todo lo que no es arena: 235,61 gr.
 Peso de la muestra húmeda (B1) + tara: 117,54 gr.
 Peso de la muestra seca + tara: 117,5 gr.
 Peso tara: 66,39 gr.
 Probeta nº 5.

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = $231,1 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,2 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $41,983 \Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = $189,5 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 995,4 \Omega$
 Resistividad = $34,825 \Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = $184 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 966,4 \Omega$
 Resistividad = $33,810 \Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = $196,8 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $34,986 \Omega^*\text{m}$

Medida 5.-V = $193,7 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $34,986 \Omega^*\text{m}$

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = $256,9 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,3 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $48,980 \Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = $264,4 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,4 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $45,482 \Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = $254,1 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,3 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $48,980 \Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = $251,7 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,3 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $48,980 \Omega^*\text{m}$

Medida 5.-V = $308 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 1,6 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $55,978 \Omega^*\text{m}$

Con 90 voltios:

Medida 1.-V = $584 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 3,1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $108,456 \Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = $423,6 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 2,2 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $76,969 \Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = $419,9 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 2,2 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $76,969 \Omega^*\text{m}$

Medida 4.-V = $402,5 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 2,1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $73,470 \Omega^*\text{m}$

Medida 5.-V = $414,4 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 2,2 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $76,969 \Omega^*\text{m}$

Con 180 voltios:

Medida 1.-V = $976,5 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 5,1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $178,428 \Omega^*\text{m}$

Medida 2.-V = $972,9 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 5,1 \text{ K}\Omega$
 Resistividad = $178,428 \Omega^*\text{m}$

Medida 3.-V = $971,9 \mu\text{V}$
 $I = 190,4 \text{ nA}$
 $R = 5,1 \text{ K}\Omega$

Resistividad = 178,428 Ω *m

Medida 4.-V = 971,3 μ V

I = 190,4 nA

R = 5,1 K Ω

Resistividad = 178,428 Ω *m

Medida 5.-V = 975,1 μ V

I = 190,4 nA

R = 5,1 K Ω

Resistividad = 178,428 Ω *m

ARENA de PLAYA:

% de agua: Humedad Natural

Grado de compactación: Vibración

Peso de la bandeja + arena seca (estufa):
3074,6 gr.

Peso de la bandeja + arena humedad
natural (muestra B9): 3239,9 gr.

Bandeja: HR#02

Peso de la probeta total: 2607,78 gr.

Peso de la muestra húmeda + tara: 116,85
gr.

Peso de la muestra seca + tara: 113,36 gr.

Peso tara: 64,89 gr.

Probeta n^o 7.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 415,3 mV

I = 45,8 μ A

R = 9,1 K Ω

Resistividad = 318,372 Ω *m

Medida 2.-V = 418,5 mV

I = 341,7 μ A

R = 1,2 K Ω

Resistividad = 41,983 Ω *m

Medida 3.-V = 406 mV

I = 424,4 μ A

R = 956,6 Ω

Resistividad = 33.468 Ω *m

Medida 4.-V = 400,6 mV

I = 496,1 μ A

R = 807,5 Ω

Resistividad = 28,251 Ω *m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 563,2 mV

I = 967,8 μ A

R = 581,9 Ω

Resistividad = 20,358 Ω *m

Medida 2.-V = 561,1 mV

I = 1,1 mA

R = 509,1 Ω

Resistividad = 17,811 Ω *m

Medida 3.-V = 533,7 mV

I = 1,1 mA

R = 503,9 Ω

Resistividad = 17,629 Ω *m

Medida 4.-V = 524,2 mV

I = 1,1 mA

R = 496,2 Ω

Resistividad = 17,360 Ω *m

Medida 5.-V = 520,7 mV

I = 1,1 mA

R = 497,2 Ω

Resistividad = 17,395 Ω *m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 555,9 mV

I = 1,2 mA

R = 471,5 Ω

Resistividad = 16,496 Ω *m

Medida 2.-V = 564,1 mV

I = 1,2 mA

R = 465,4 Ω

Resistividad = 16,283 Ω *m

Medida 3.-V = 570,6 mV

I = 1,2 mA

R = 460,5 Ω

Resistividad = 16,111 Ω *m

Medida 4.-V = 587,6 mV

I = 1,3 mA

R = 453,5 Ω

Resistividad = 15,866 Ω *m

ARENA de UTRILLAS:

% de agua: Humedad Natural

Grado de compactación: Vibración

Peso de la probeta total: 2989,37 gr.

Peso de la muestra húmeda (B6) + tara:
114,88 gr.

Peso de la muestra seca + tara: 110,34 gr.

Peso tara: 67,41 gr.

Probeta n^o 8.

Con 9 voltios:

Medida 1.-V = 2,3 V

I = 6,2 μ A

R = 364,1 K Ω
Resistividad = 12738,373 Ω^*m

I = 128,4 μA
R = 51,9 K Ω
Resistividad = 1815,769 Ω^*m

Medida 2.-V = 2,3 V
I = 58,6 μA
R = 38,4 K Ω
Resistividad = 1343,459 Ω^*m

Medida 5.-V = 6,6 V
I = 218,6 μA
R = 30,2 K Ω
Resistividad = 1056,575 Ω^*m

Medida 3.-V = 2,3 V
I = 117,6 μA
R = 19,2 K Ω
Resistividad = 671,730 Ω^*m

Medida 4.-V = 2,3 V
I = 142,1 μA
R = 15,9 K Ω
Resistividad = 671,730 Ω^*m

Con 24 voltios:

Medida 1.-V = 5,6 V
I = 504,9 μA
R = 11 K Ω
Resistividad = 384,845 Ω^*m

Medida 2.-V = 5,5 V
I = 509,8 μA
R = 10,8 K Ω
Resistividad = 377,848 Ω^*m

Medida 3.-V = 5,5 V
I = 516,4 μA
R = 10,6 K Ω
Resistividad = 370,851 Ω^*m

Medida 4.-V = 5,4 V
I = 515,1 μA
R = 10,5 K Ω
Resistividad = 367,352 Ω^*m

Con 36 voltios:

Medida 1.-V = 7 V
I = 190,4 nA
R = 36,8 M Ω
Resistividad = 1287481,789 Ω^*m

Medida 2.-V = 6,8 V
I = 190,4 nA
R = 35,9 M Ω
Resistividad = 1255994,463 Ω^*m

Medida 3.-V = 6,7 V
I = 27,3 μA
R = 247,1 K Ω
Resistividad = 8645,020 Ω^*m

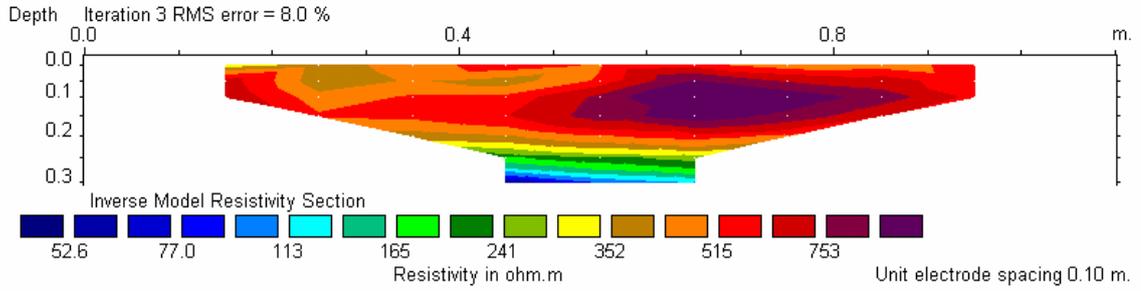
Medida 4.-V = 6,7 V

ANEXO II

PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DEL CAPÍTULO 5

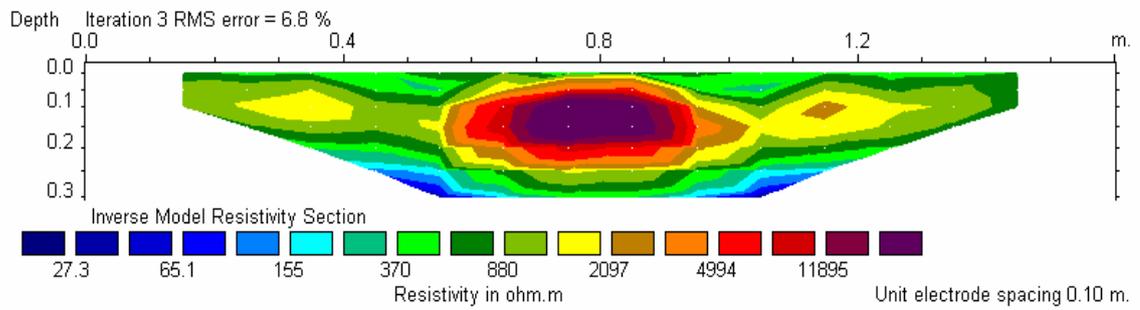
-ENSAYOS DE RESPUESTA ELÉCTRICA-

EXPERIENCIA 0: BANCO DE ARENA SOLA (sin objetos enterrados)



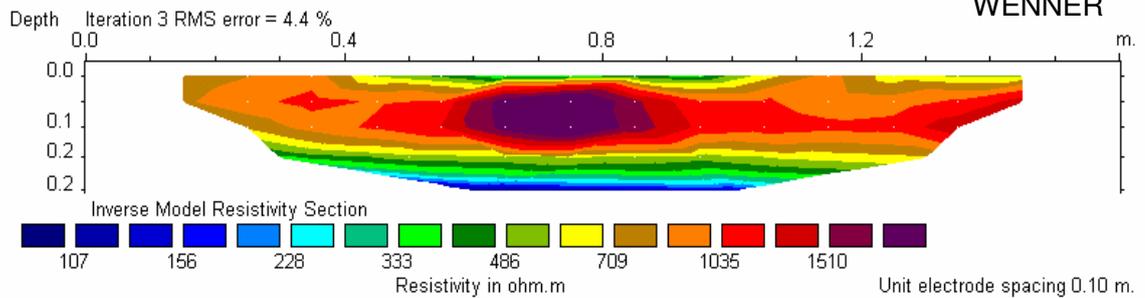
EXPERIENCIA 1: BLOQUE HUECO DE CEMENTO

DIPOLO

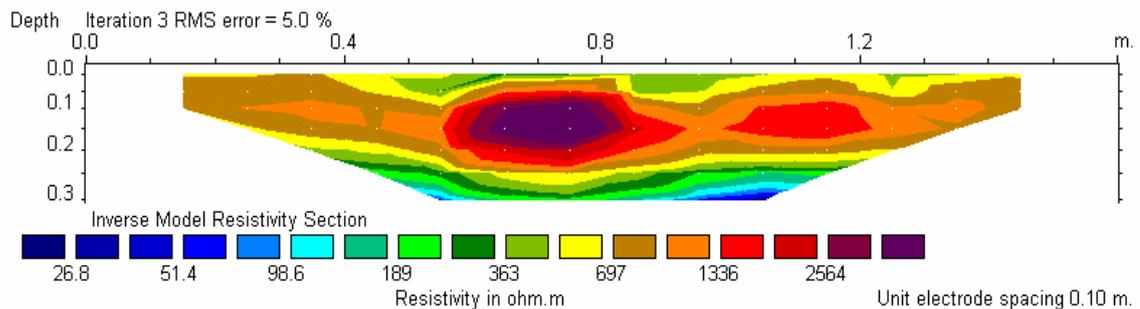


EXPERIENCIA 2: BLOQUE HUECO DE CERÁMICA

WENNER

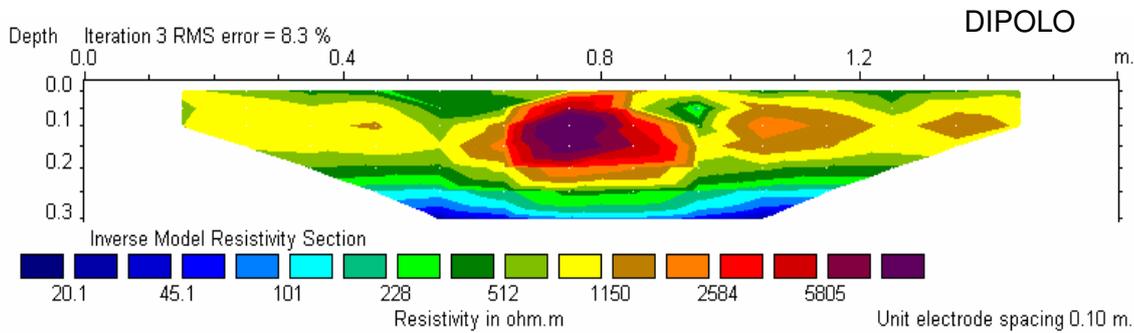
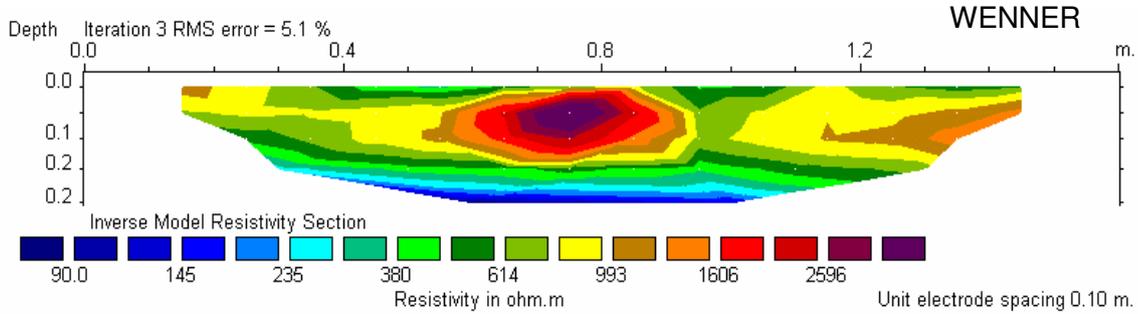


DIPOLO

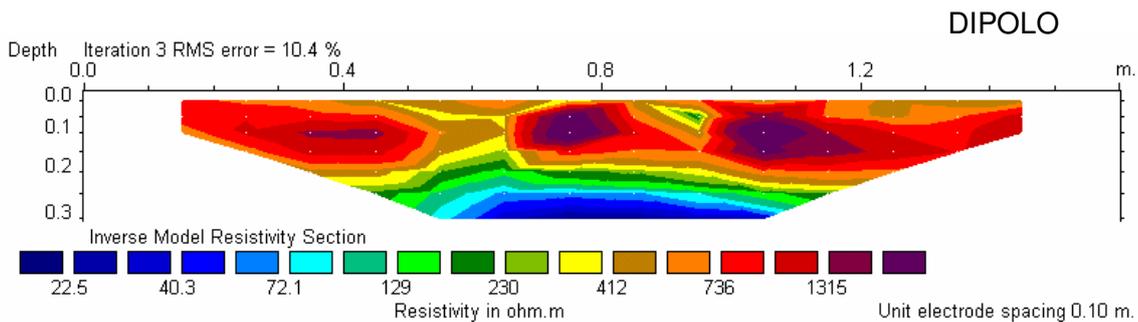
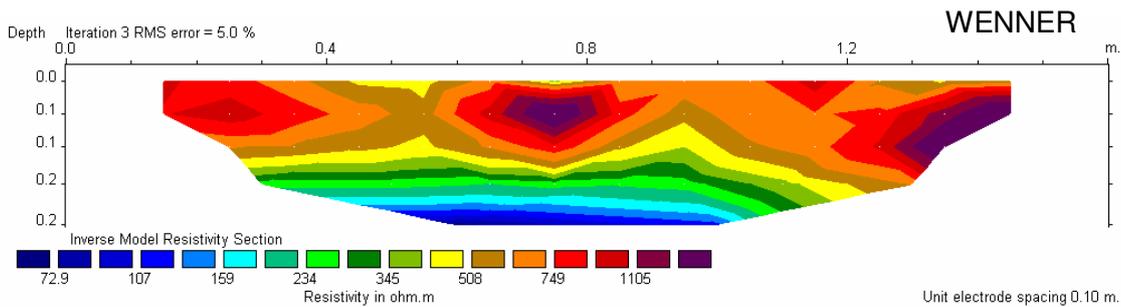


EXPERIENCIA 3: BOVEDILLA VERTICAL

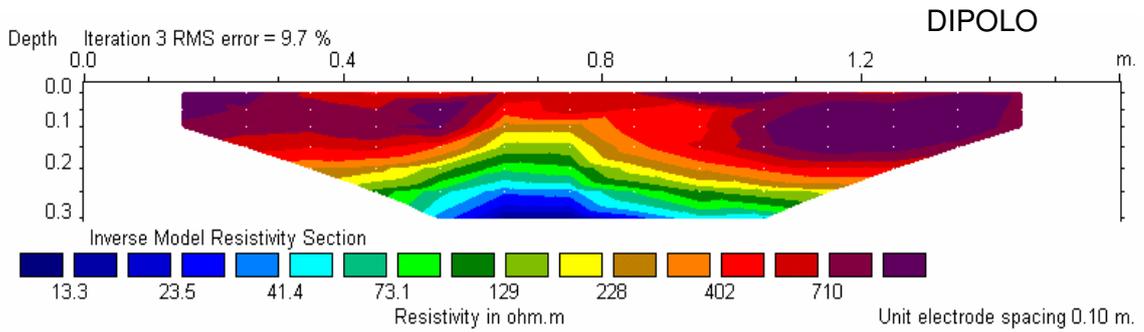
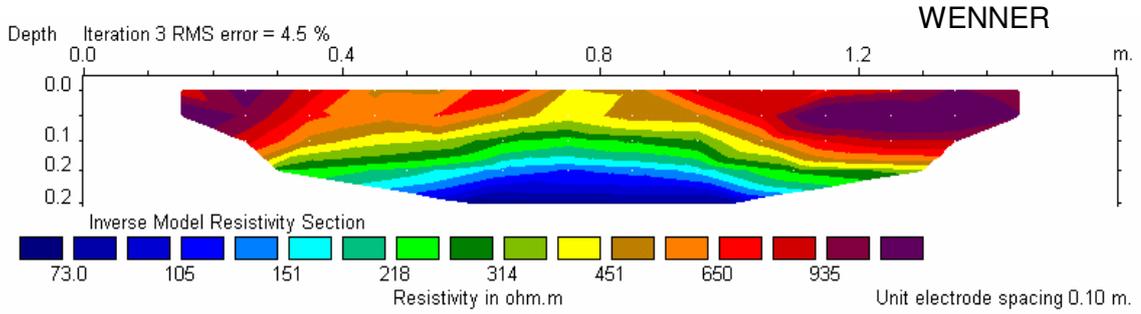
BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AIRE



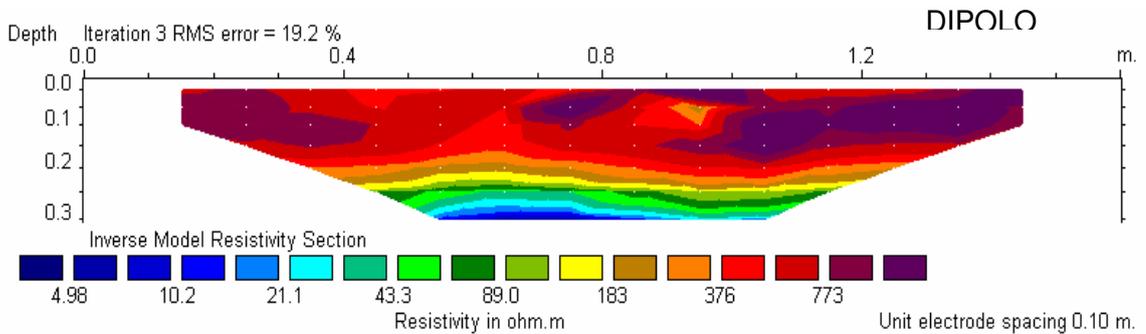
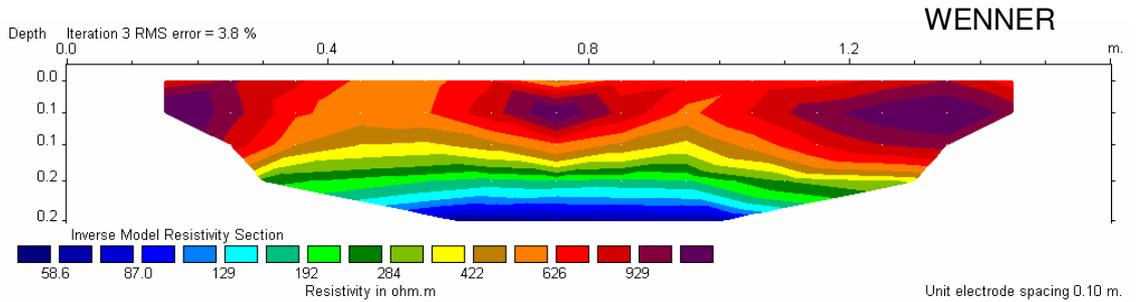
BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -inmediato-



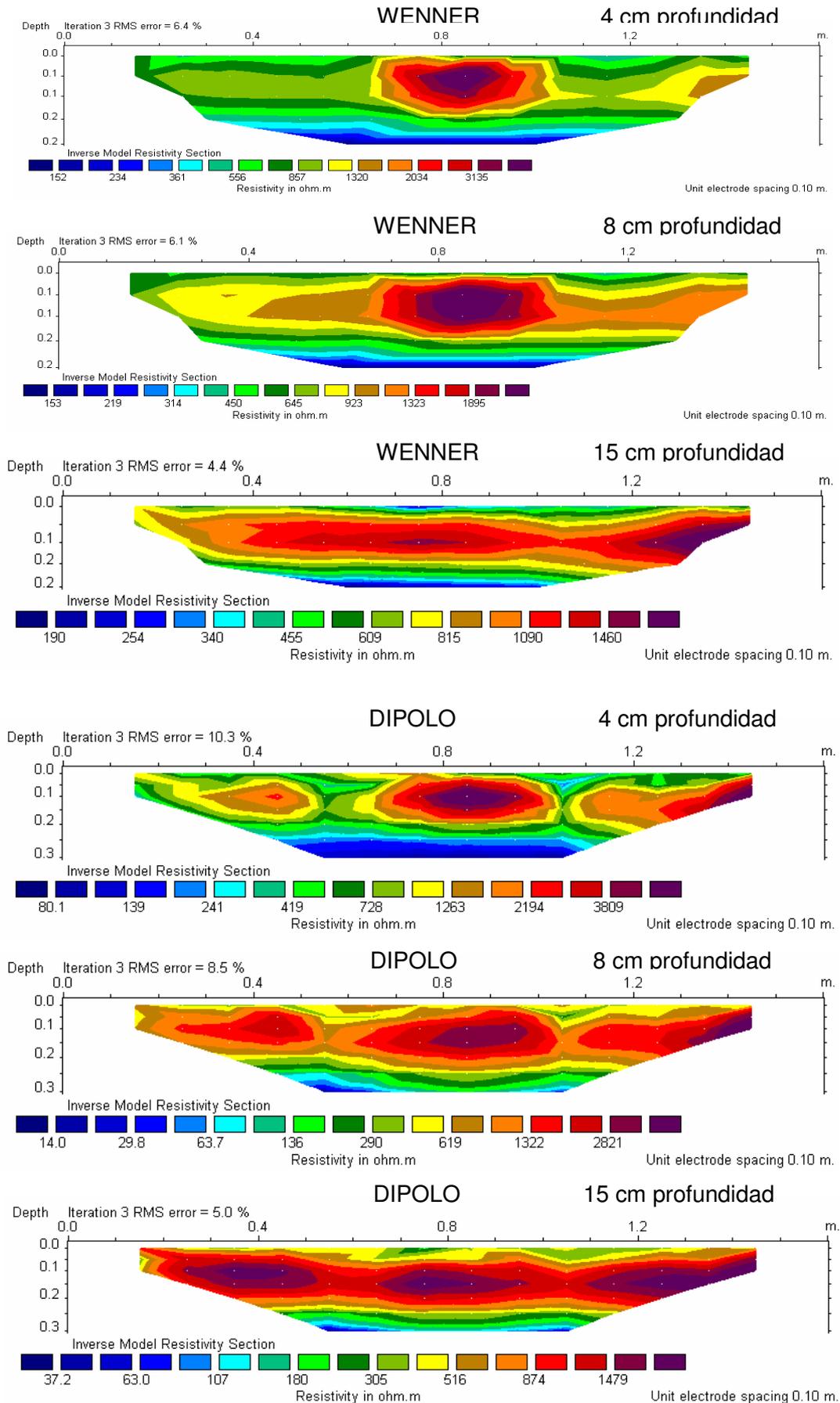
BOVEDILLA VERTICAL RELLENO AGUA -tras 24 horas-



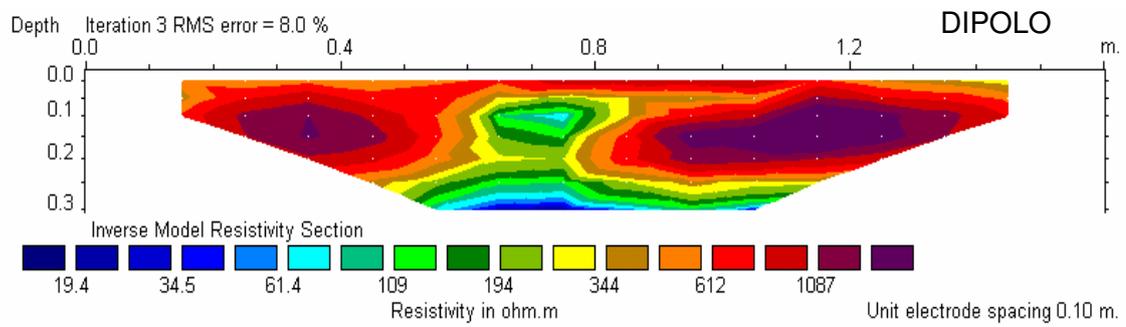
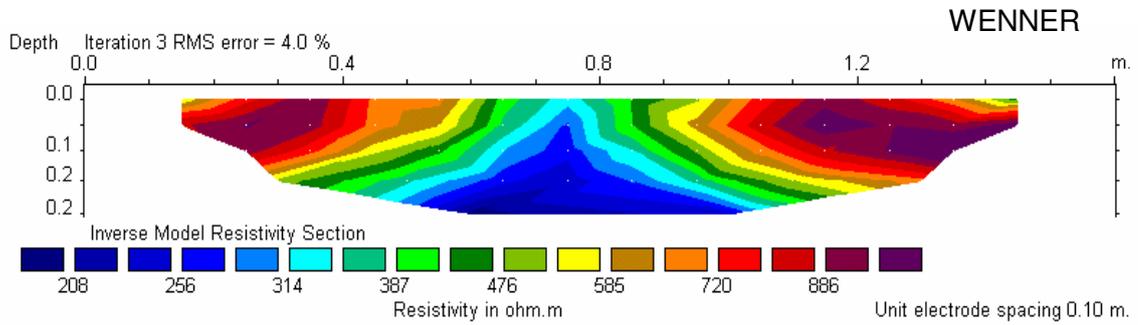
5.3.5.4 BOVEDILLA VERTICAL RELLENO DE AIRE - vaciado inmediato -



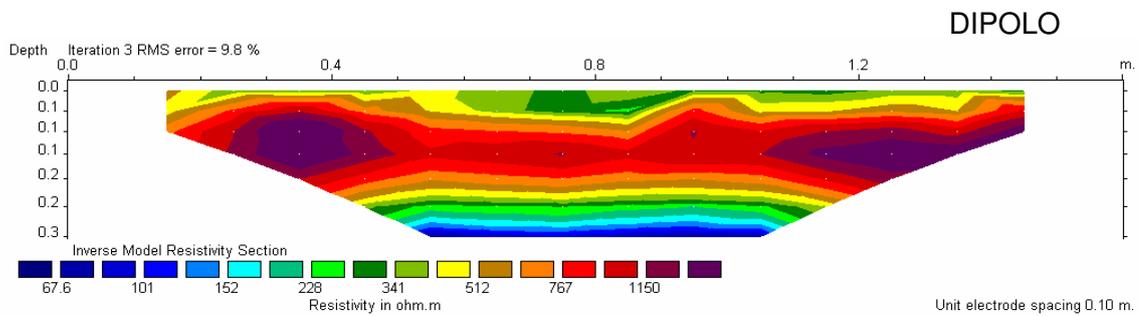
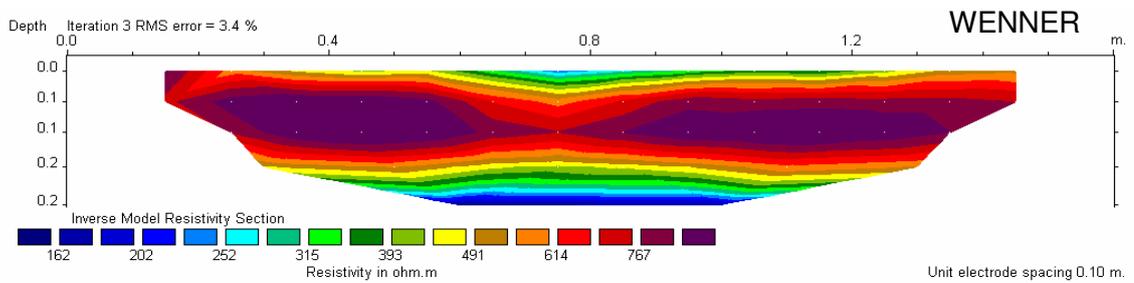
EXPERIENCIA 4: TUBO DE PVC 12 cm de diámetro



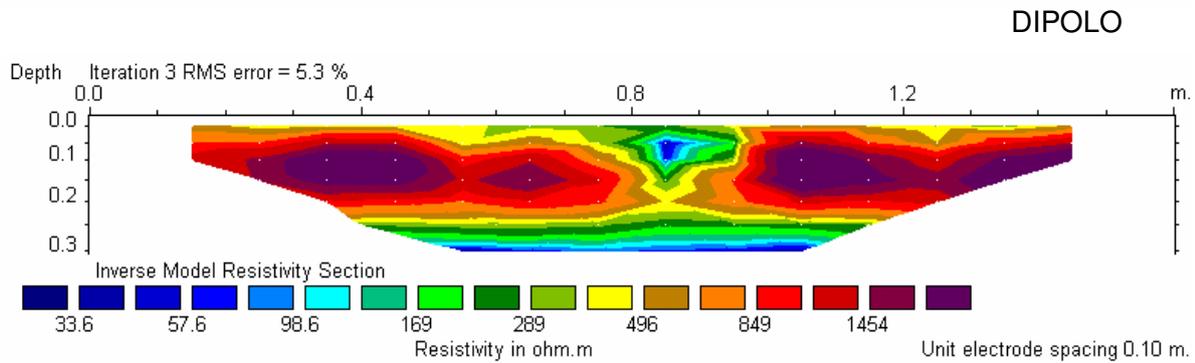
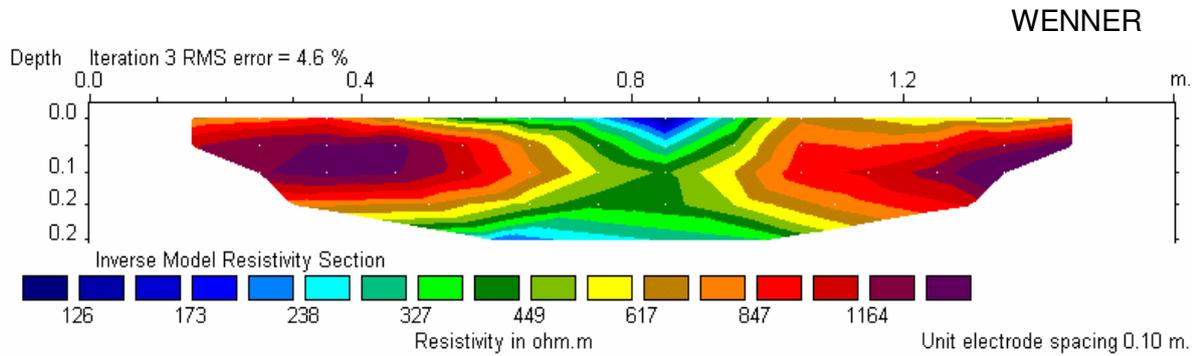
EXPERIENCIA 5: TUBO METÁLICO 15 cm de diámetro



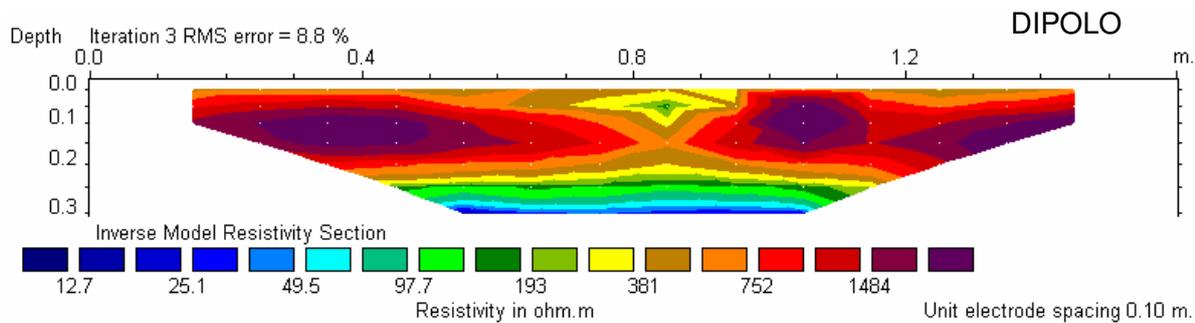
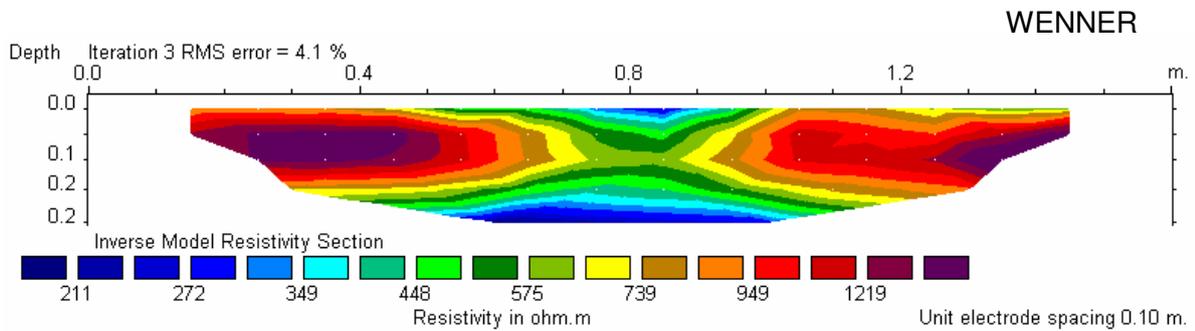
EXPERIENCIA 6: BLOQUE DE SAL COMÚN (Halita -NaCl-)



EXPERIENCIA 7: CILINDRO DE ARCILLA humedad 28%

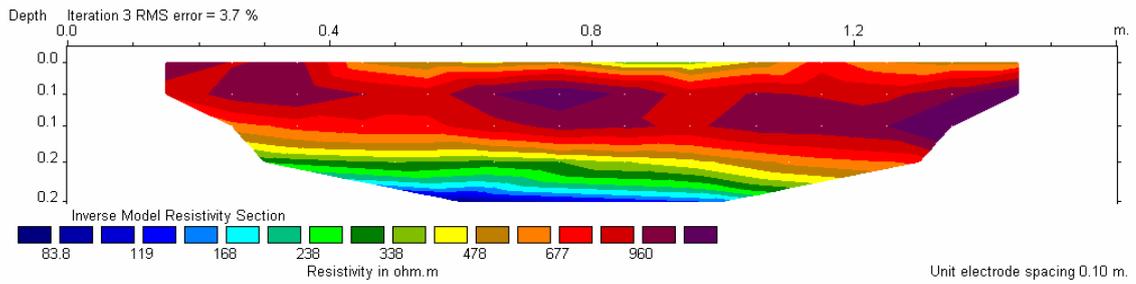


EXPERIENCIA 8: BLOQUE DE ARCILLA humedad 6%

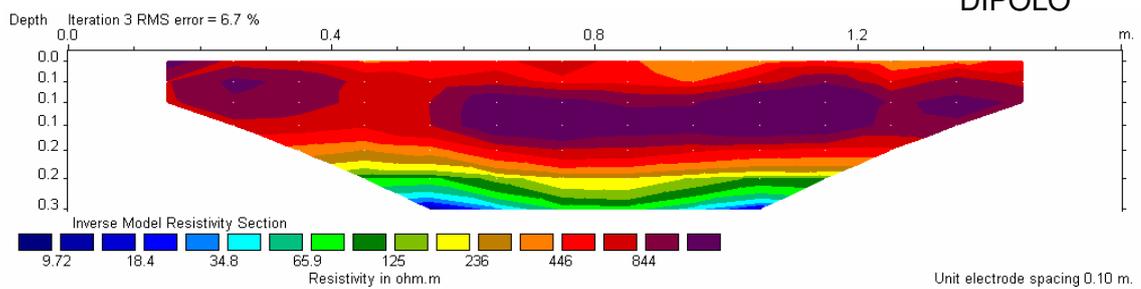


EXPERIENCIA 9: LOSA VERTICAL

WENNER

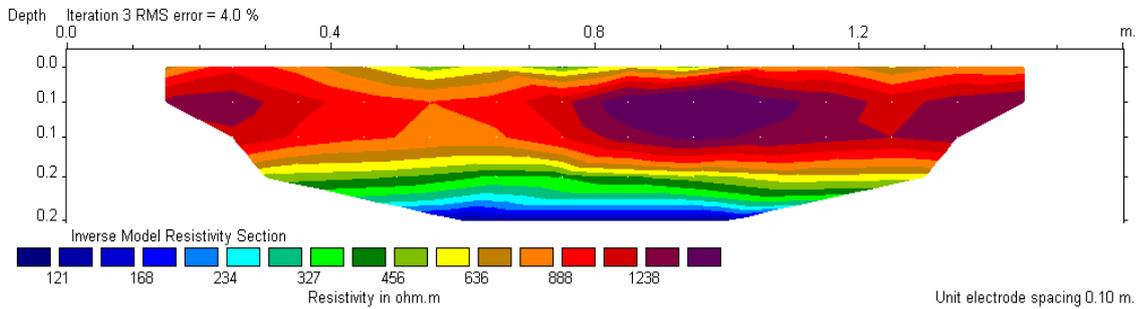


DIPOLO

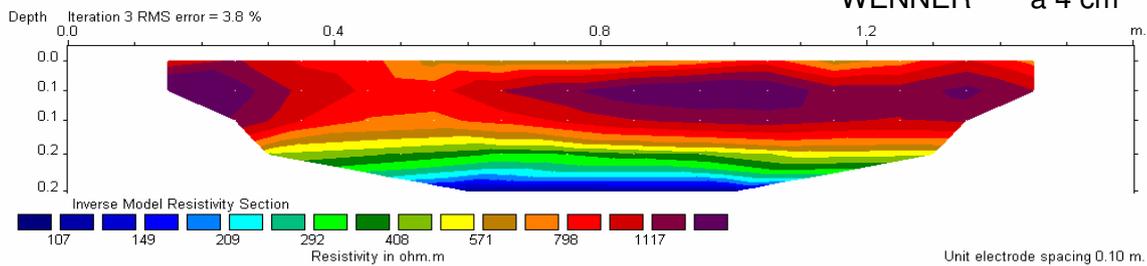


EXPERIENCIA 10: CILINDRO HUECO VERTICAL

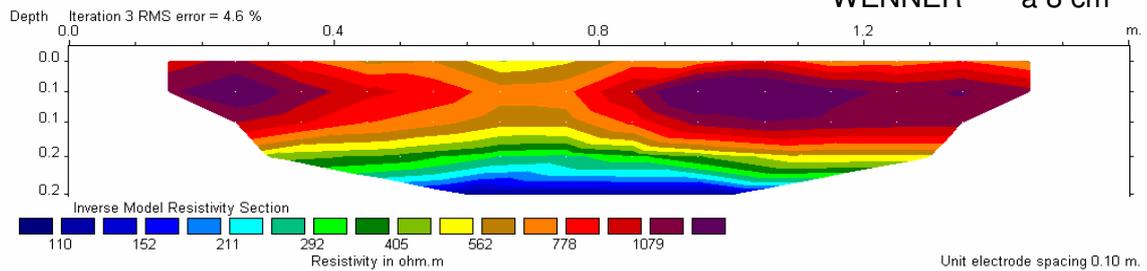
WENNER a 0 cm



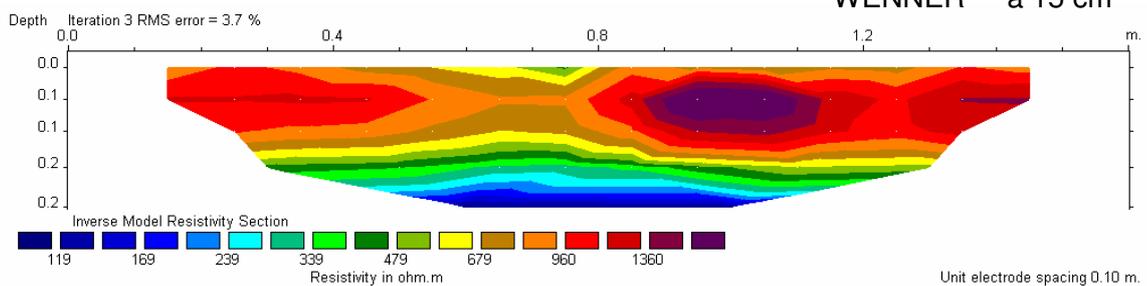
WENNER a 4 cm



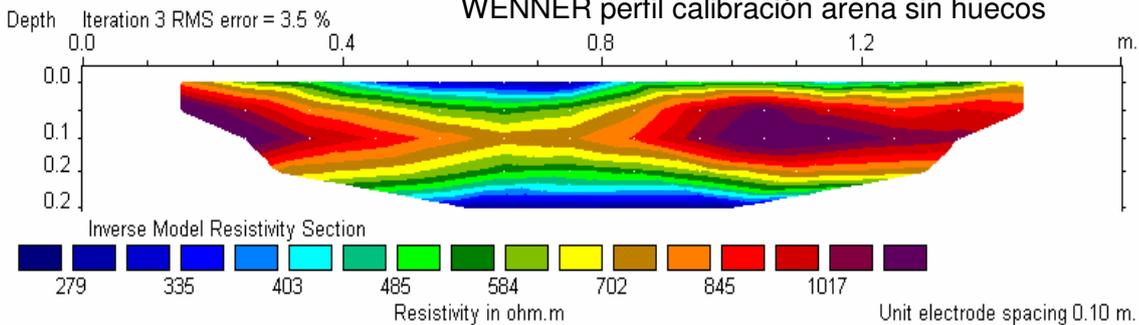
WENNER a 8 cm



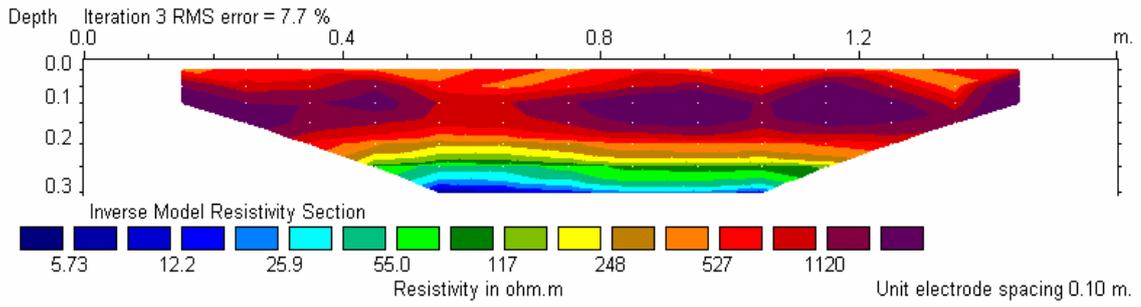
WENNER a 15 cm



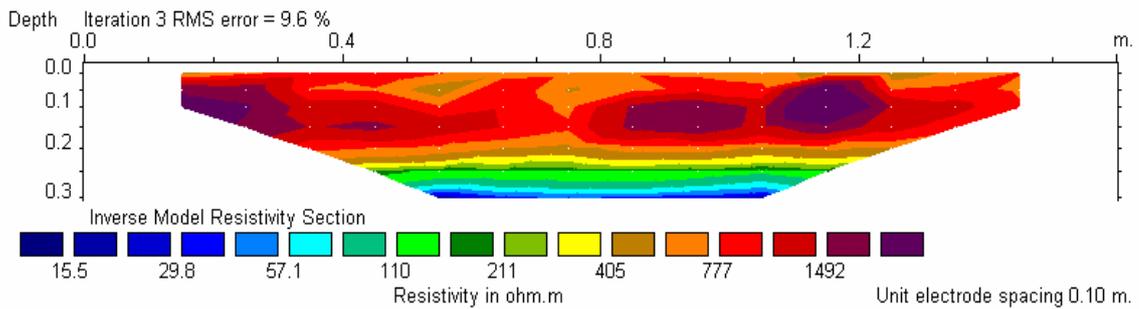
WENNER perfil calibración arena sin huecos



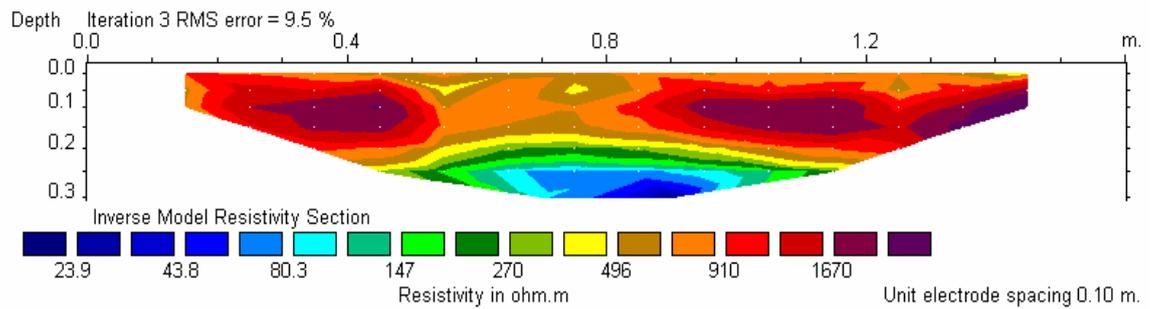
DIPOLO a 0 cm



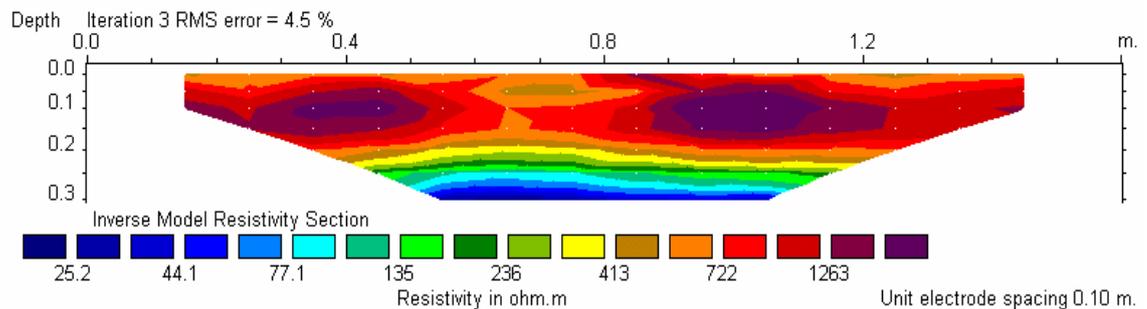
DIPOLO a 4 cm



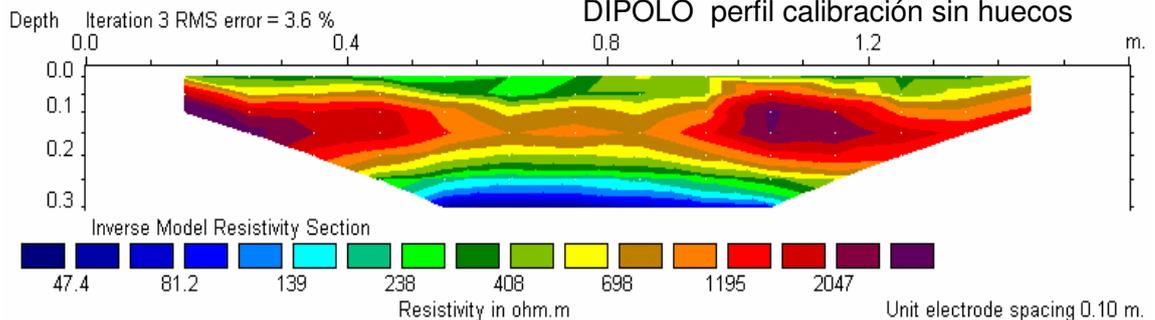
DIPOLO a 8 cm



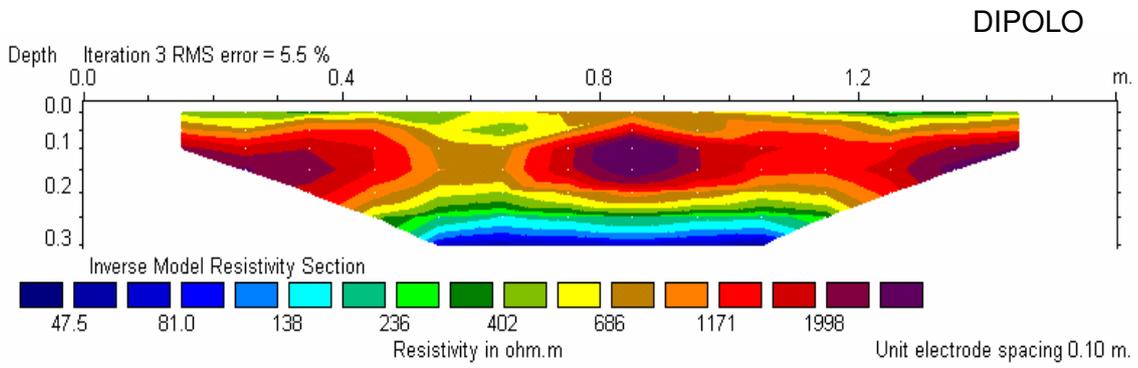
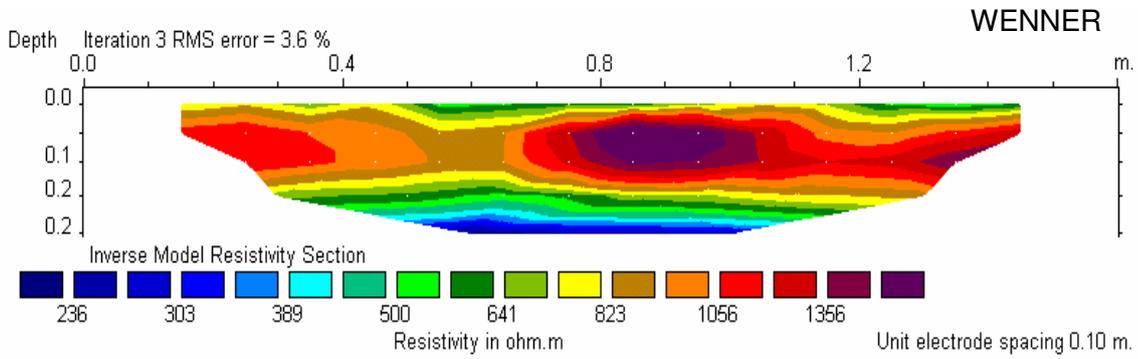
DIPOLO a 15 cm



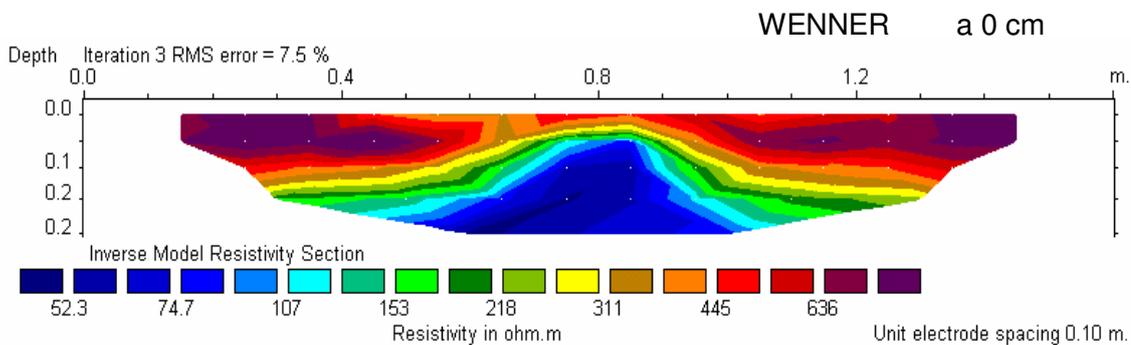
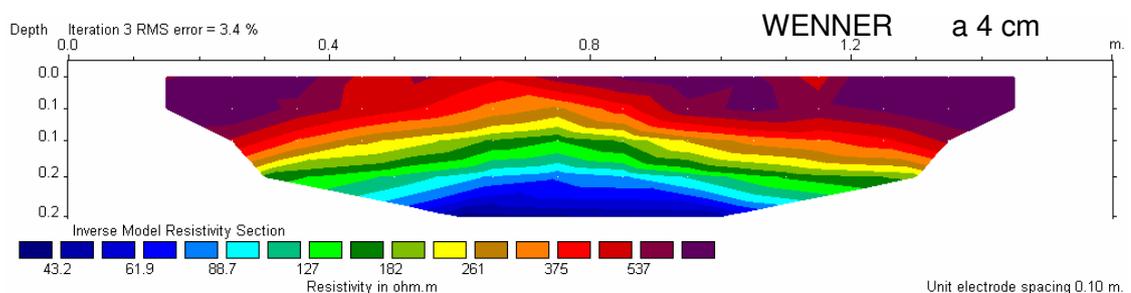
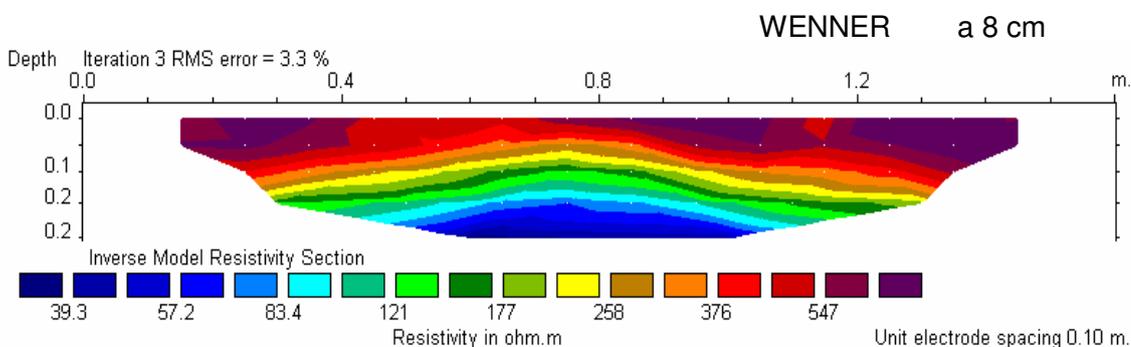
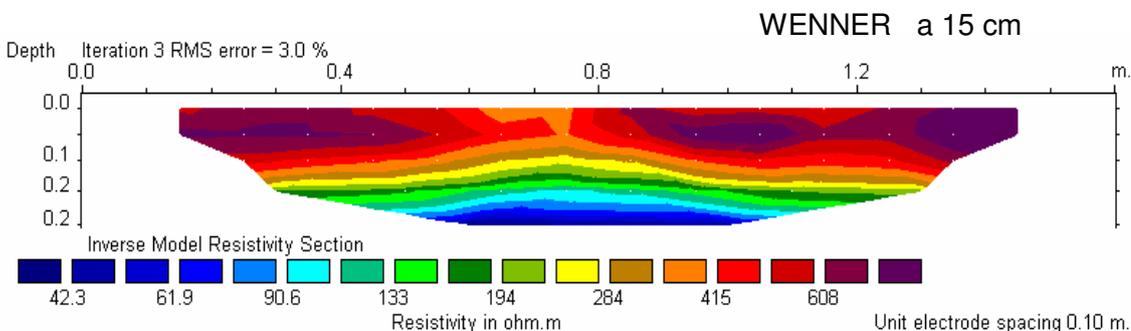
DIPOLO perfil calibración sin huecos

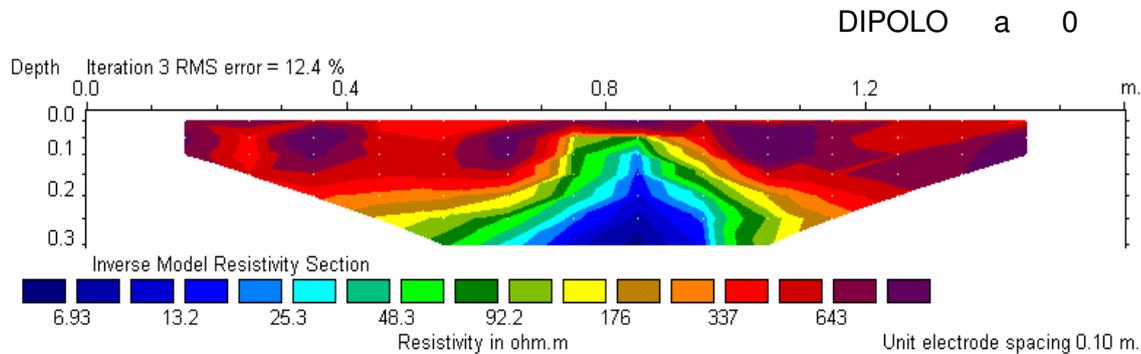
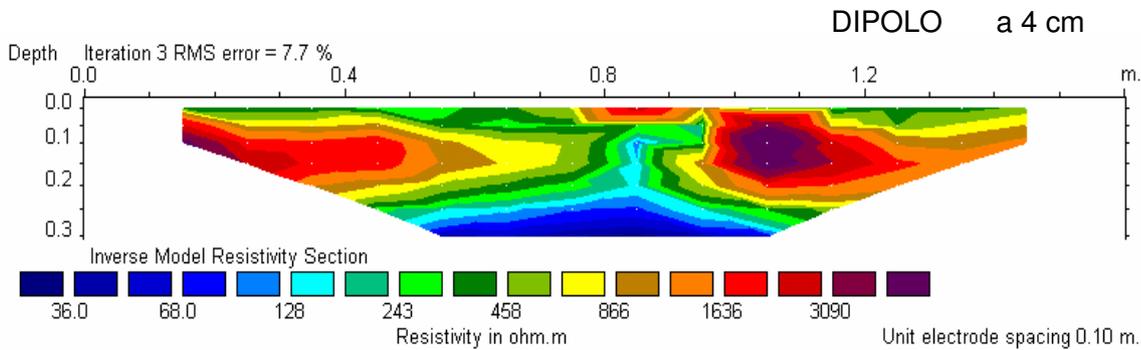
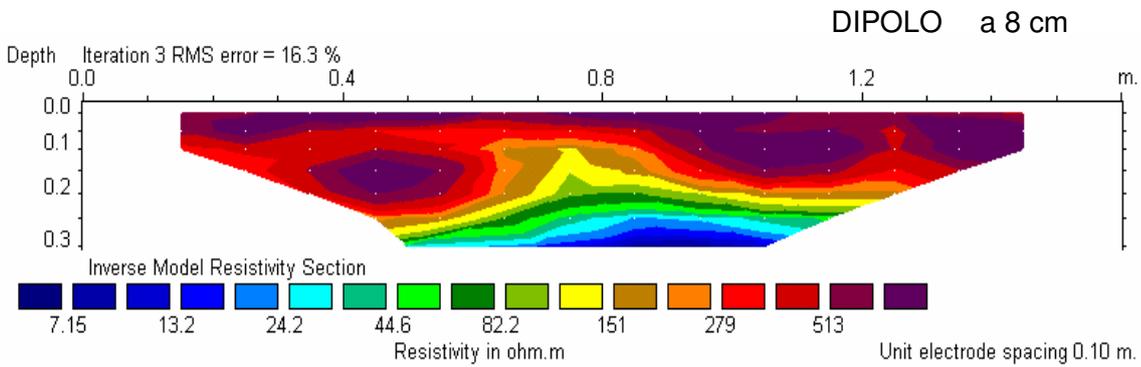
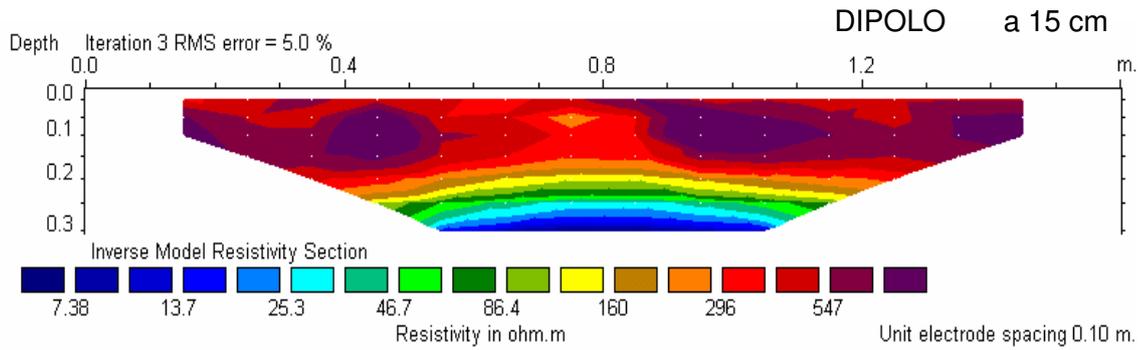


EXPERIENCIA 11: DOS CILINDROS HUECOS VERTICALES

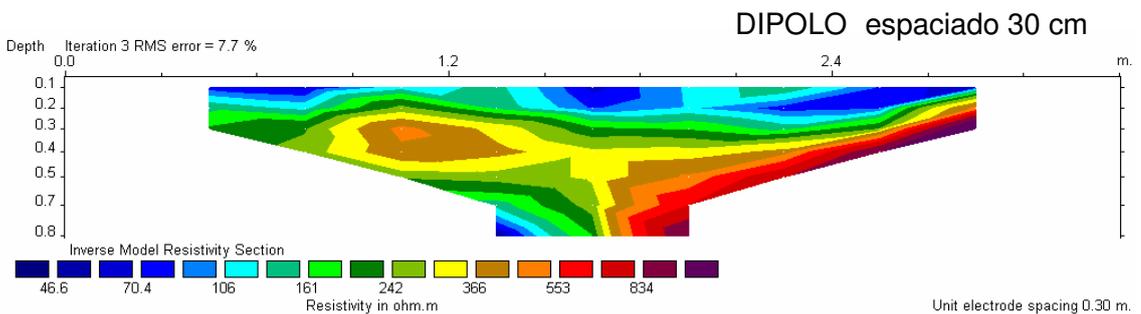
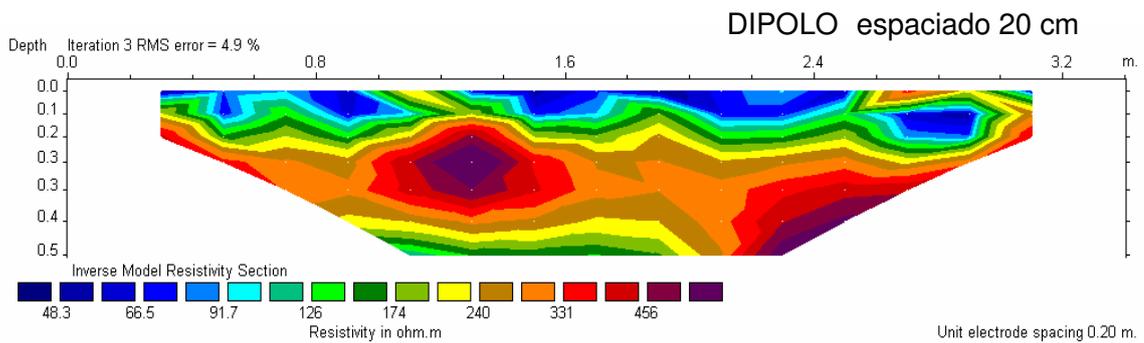
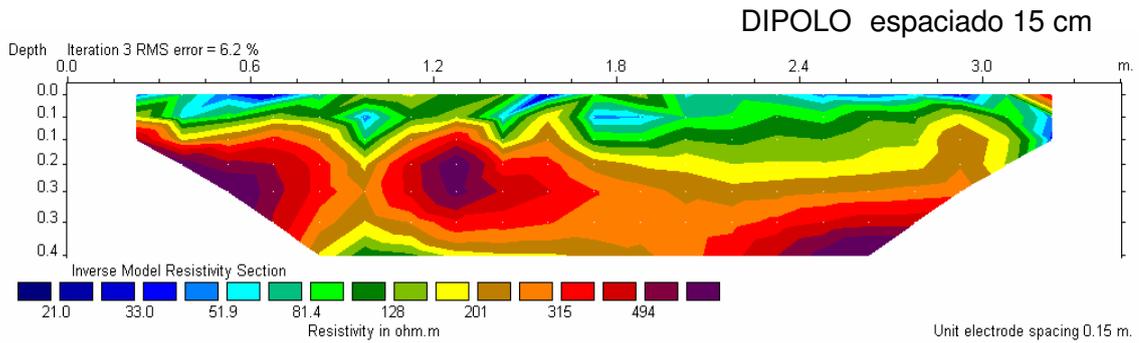
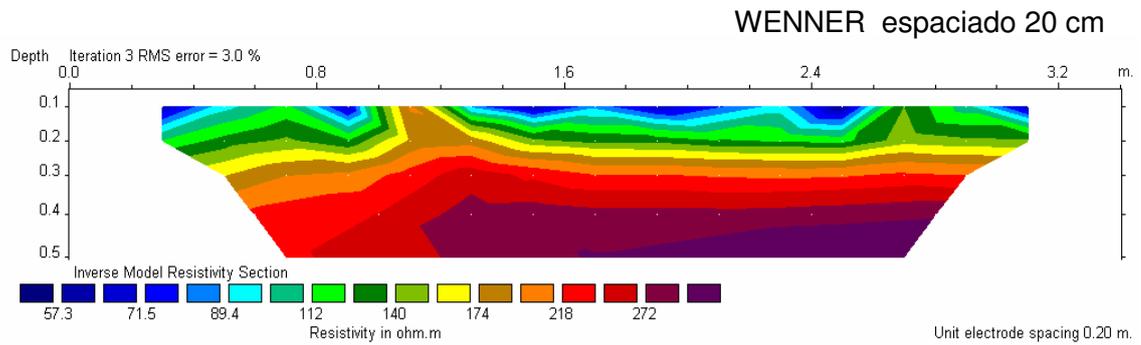
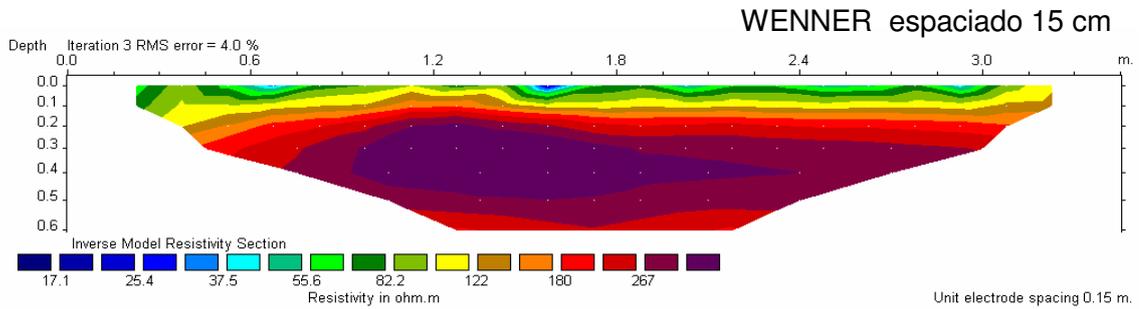


EXPERIENCIA 12: TUBO METÁLICO VERTICAL

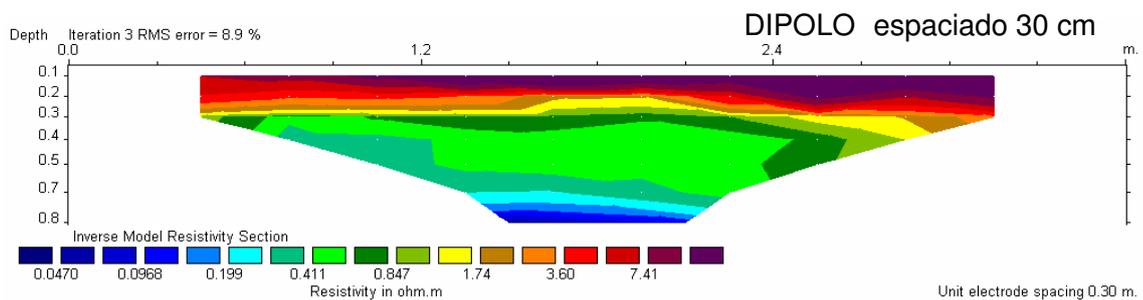
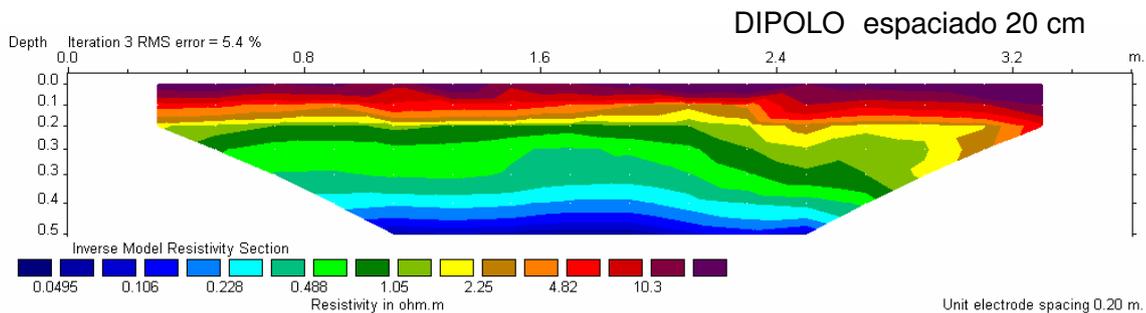
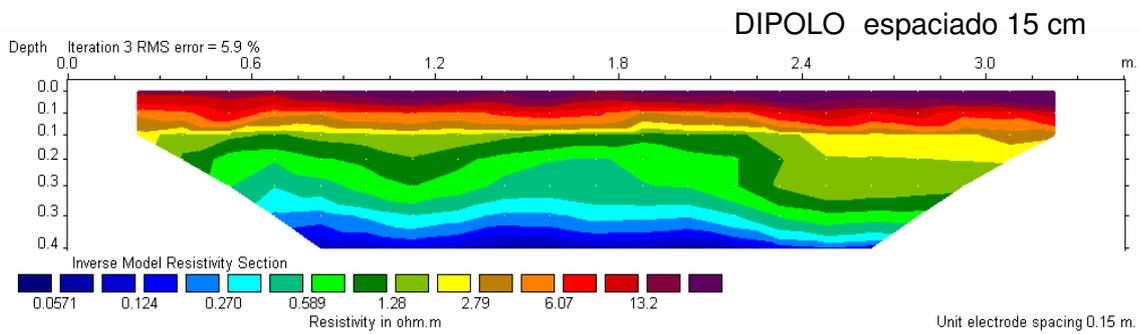
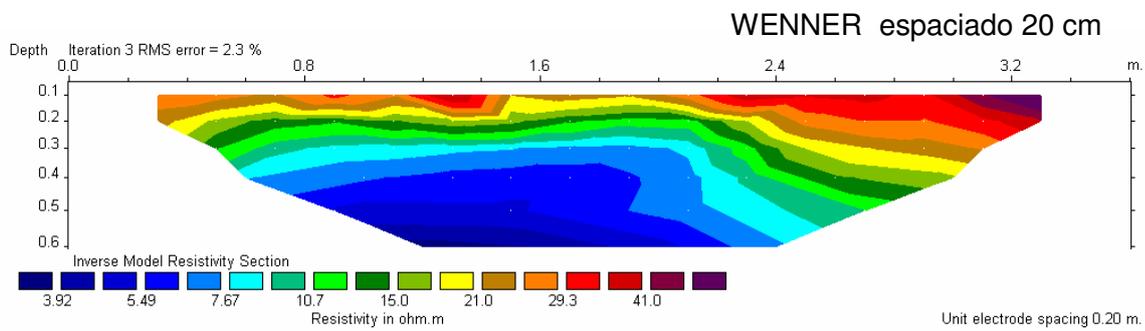
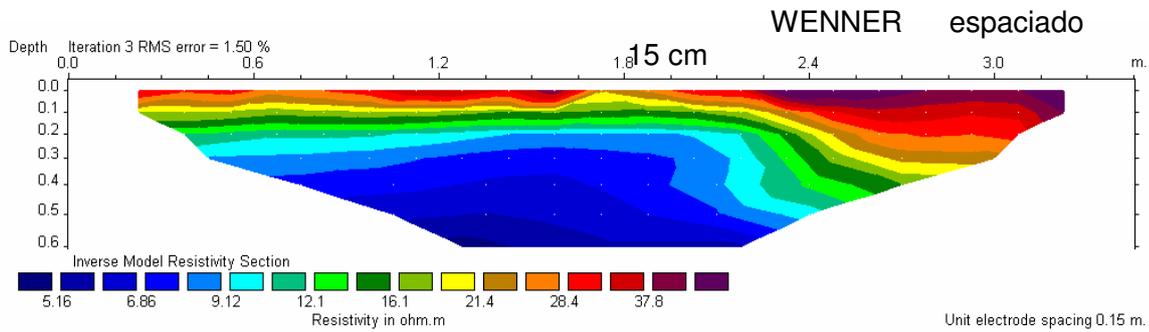




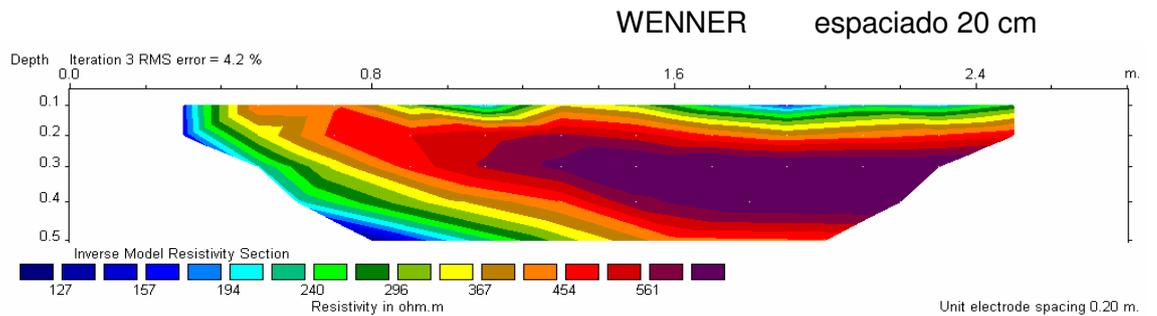
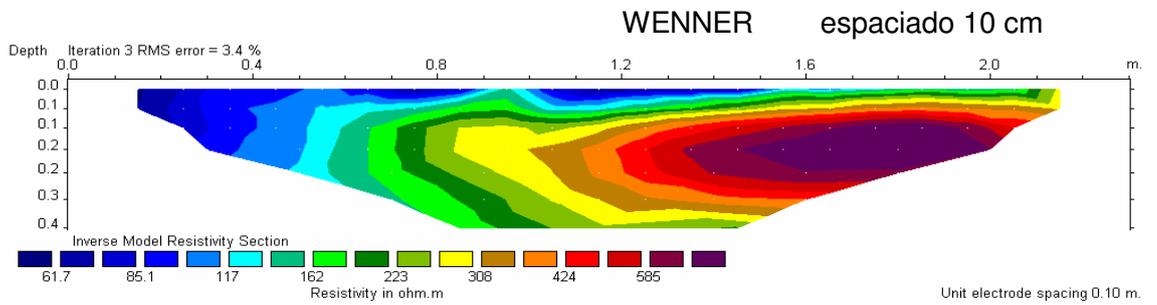
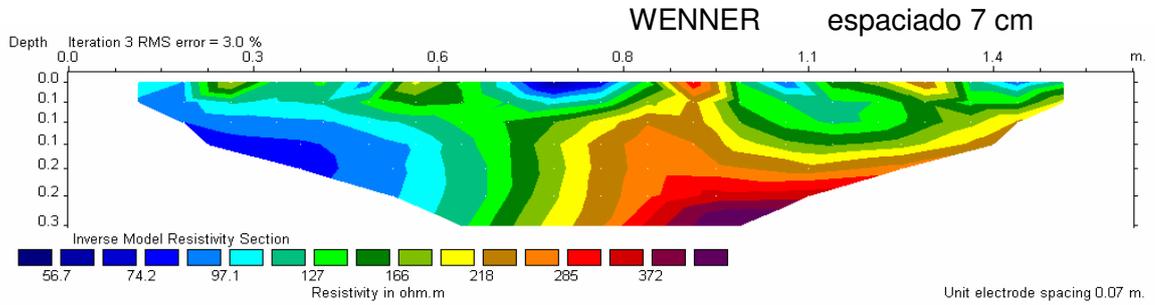
TRABAJO 0: TUBO DE CEMENTO DIÁMETRO 20 cm- RELLENO DE AIRE

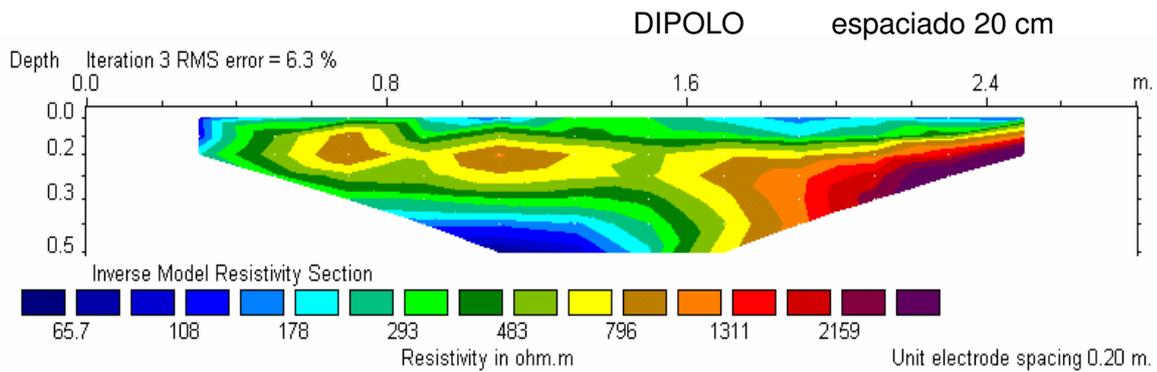
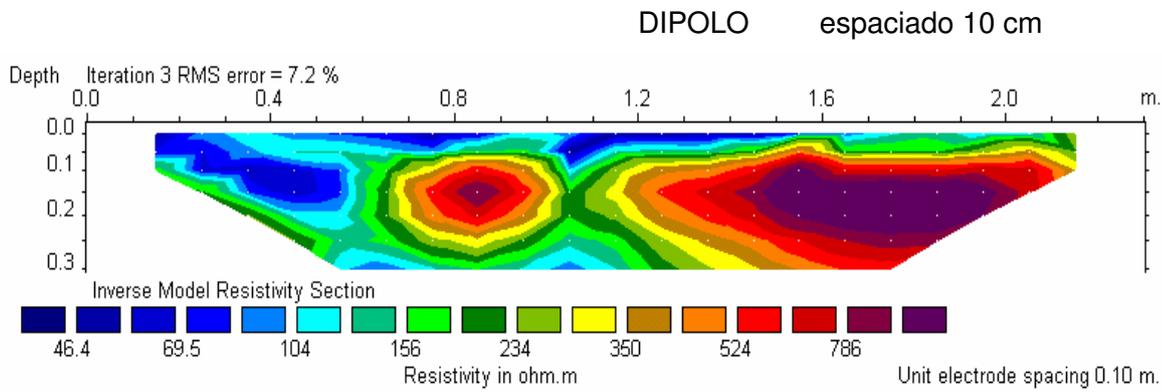
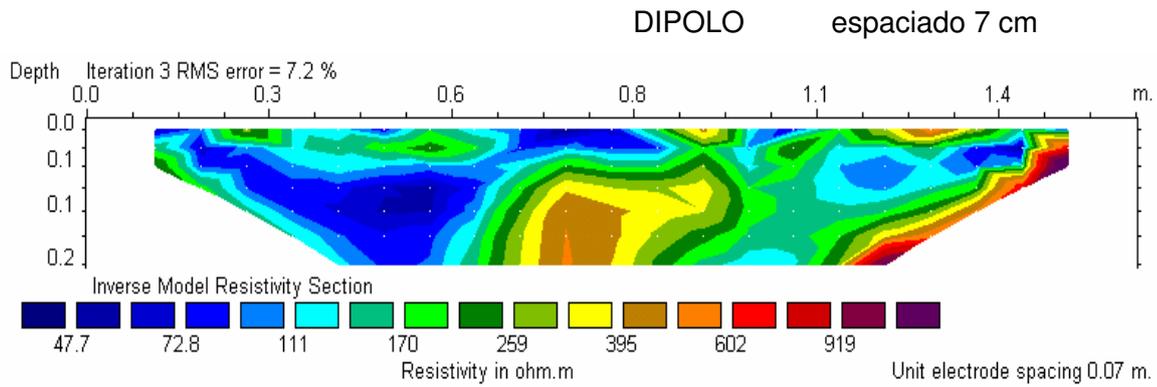


TRABAJO 1: TUBO DE CEMENTO DIÁMETRO 20 cm- RELLENO MITAD DE AGUA

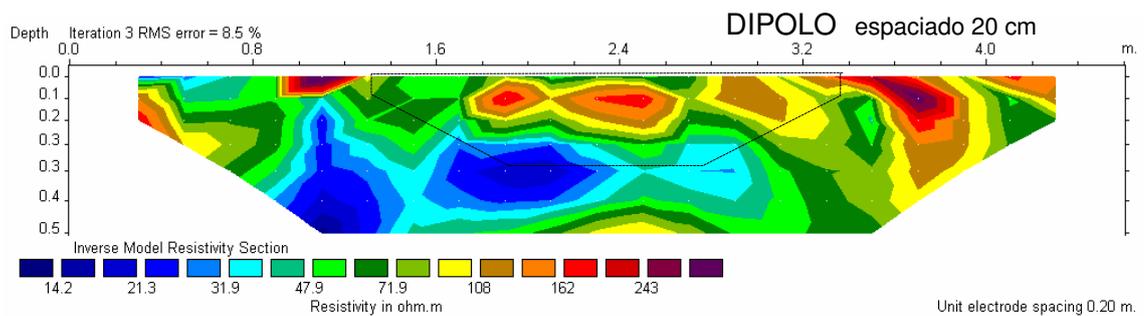
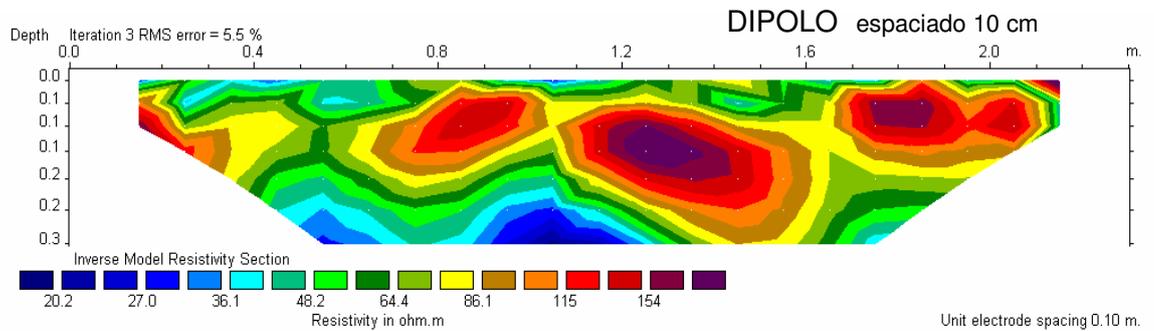
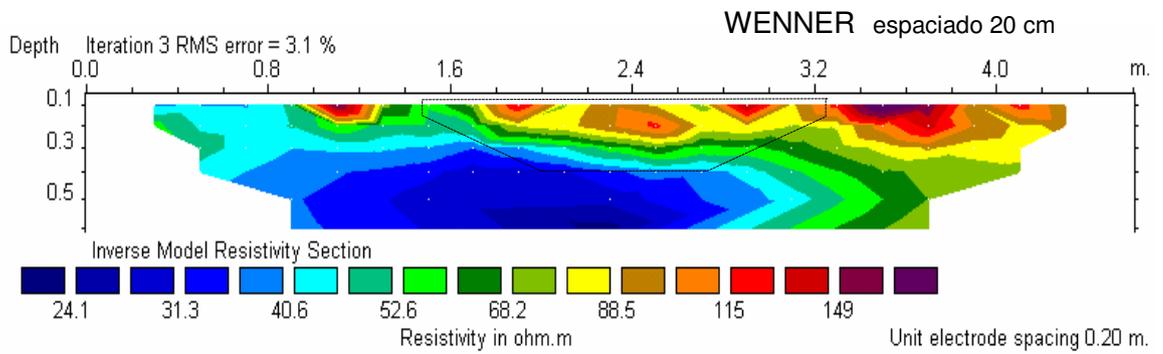
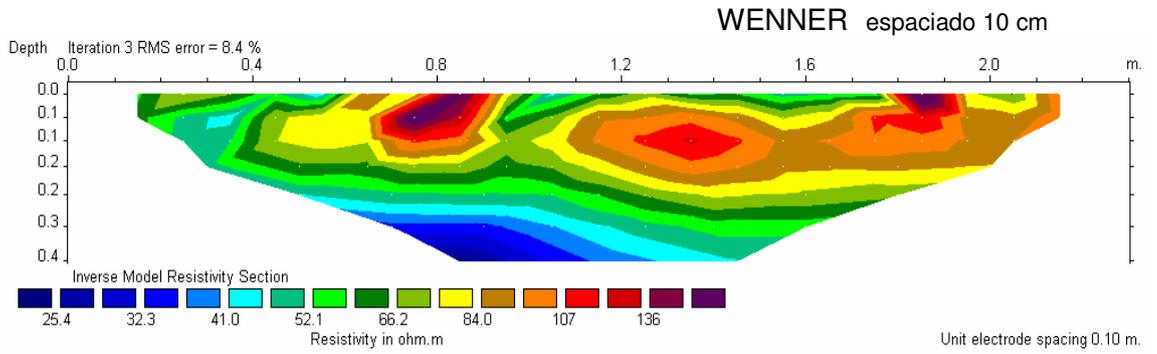


TRABAJO 2: TUBO DE PVC de diámetro 16 cm

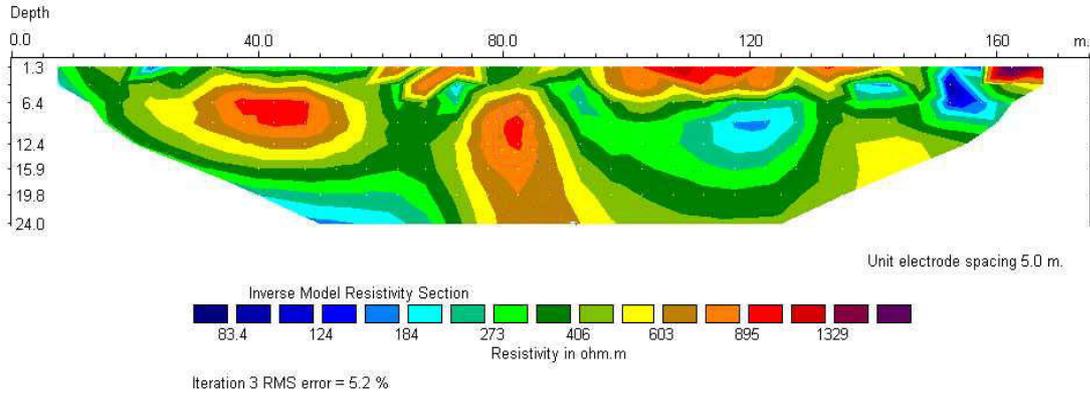




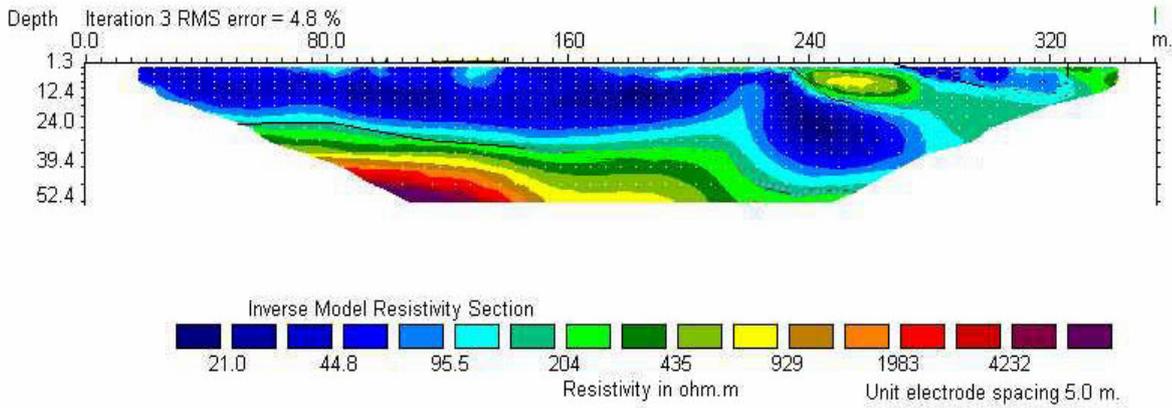
TRABAJO 3: PEQUEÑO MURO DE LADRILLO ENTERRADO



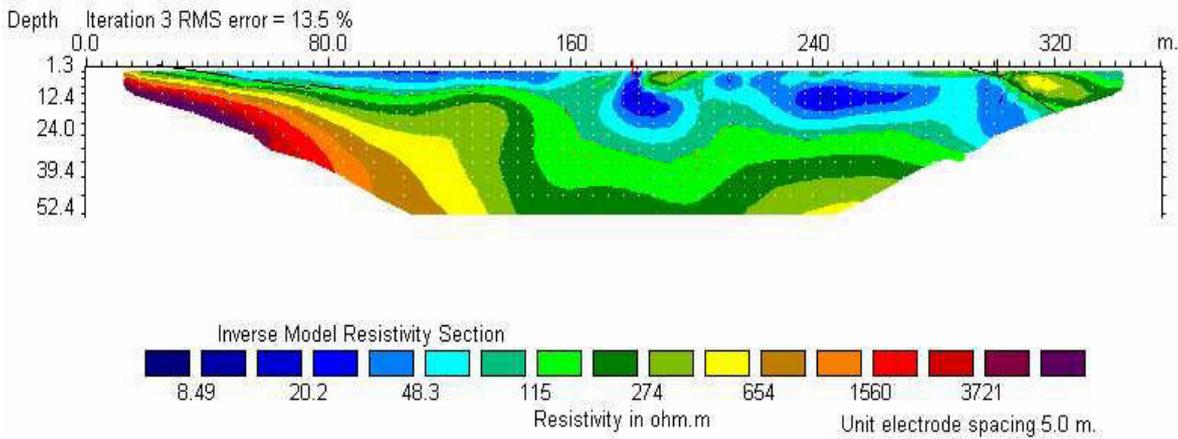
TRABAJO 4: BÚSQUEDA DE TÚNELES Y GALERÍAS MINERAS EN MINA GALLARTA (Vizcaya)



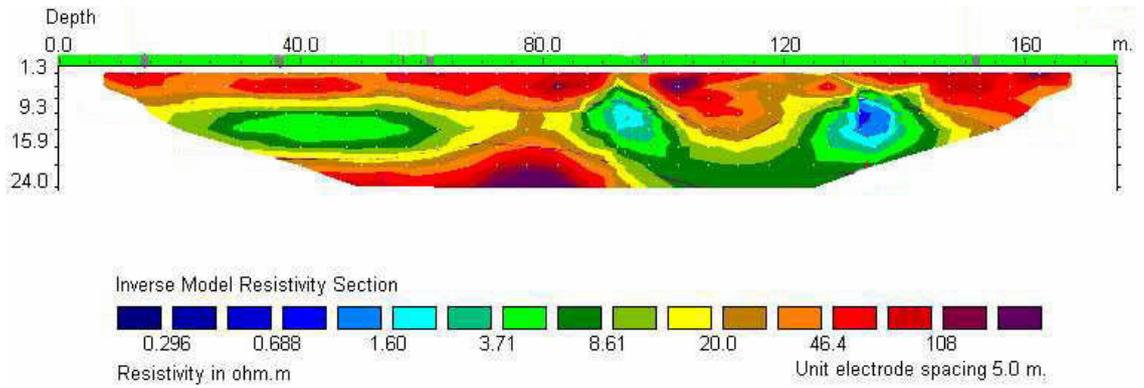
TRABAJO 5.1 DOLINA EN COMILLAS (Cantabria)



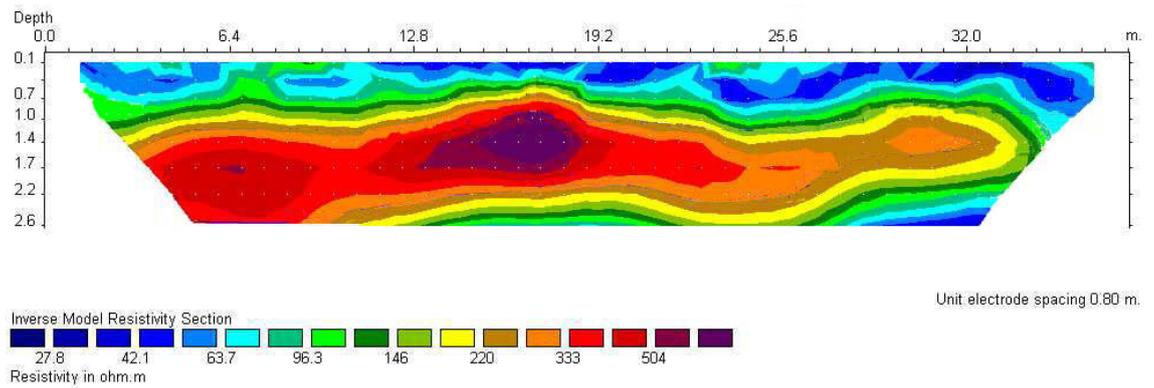
TRABAJO 5.2 HUNDIMIENTO EN COMILLAS



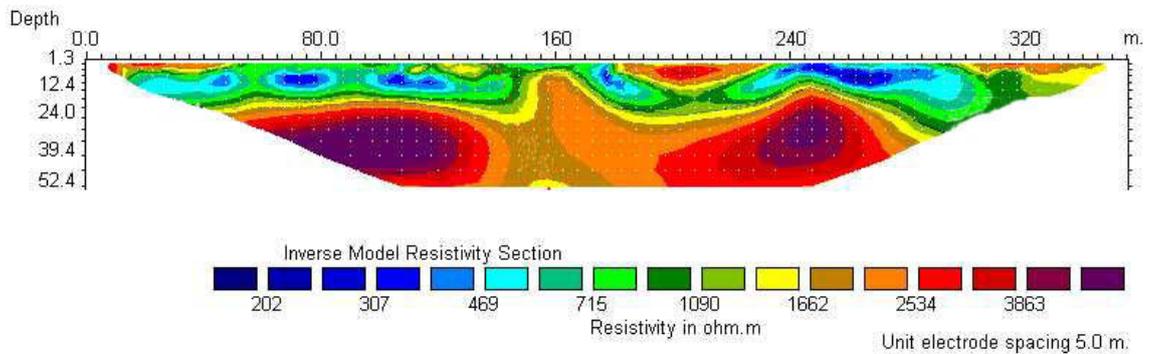
TRABAJO 6: LOCALIZACIÓN DE CANALIZACIONES METÁLICAS



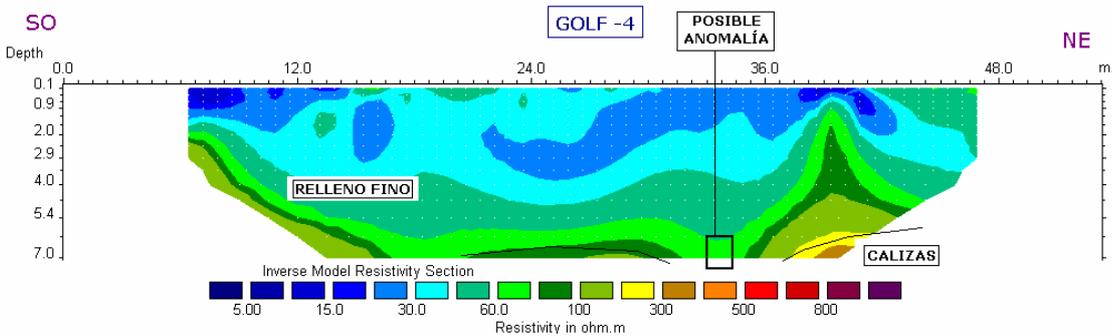
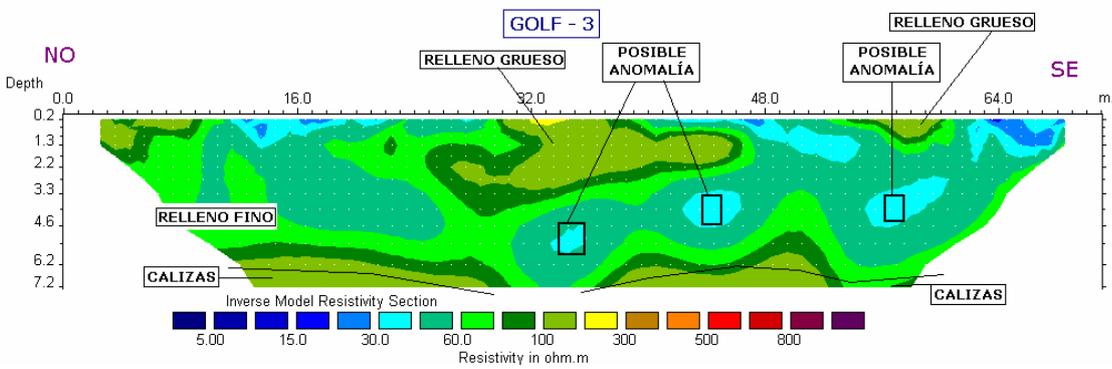
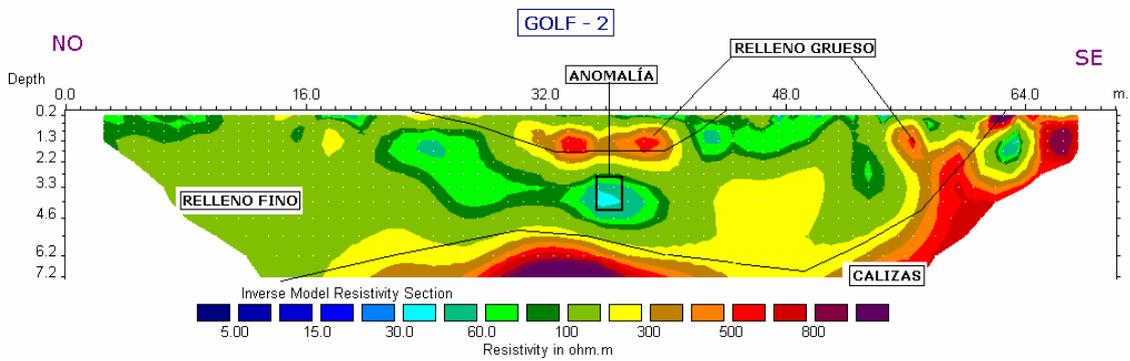
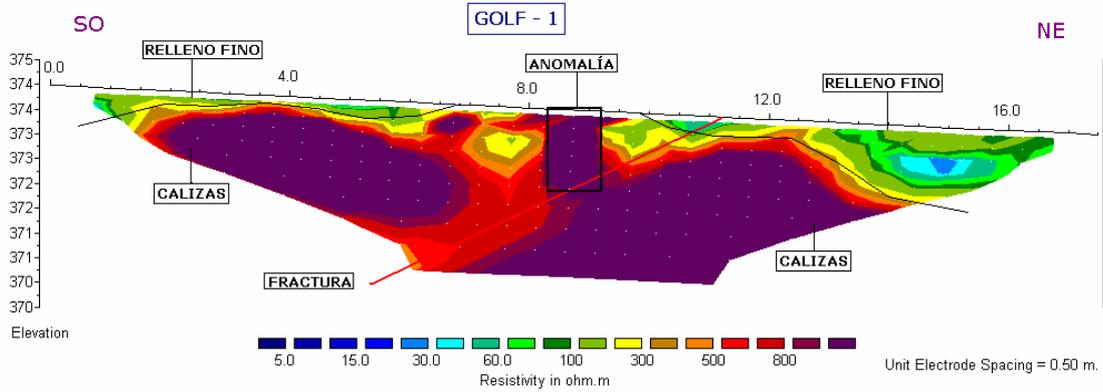
TRABAJO 7.1 DETERMINACIÓN DE ESPESORES

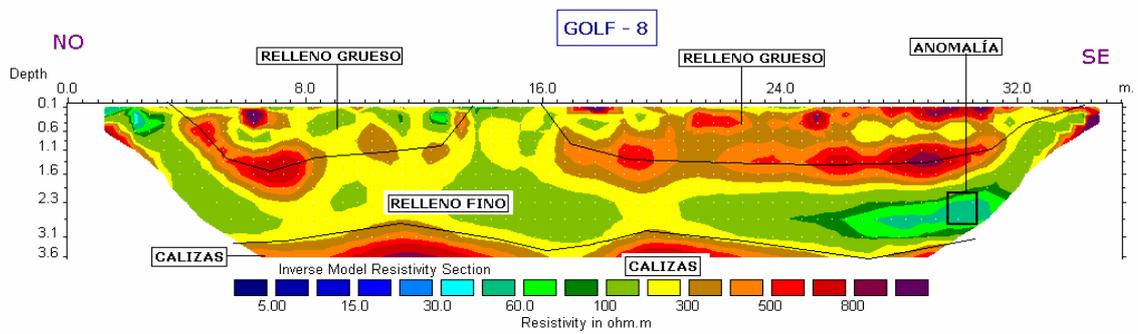
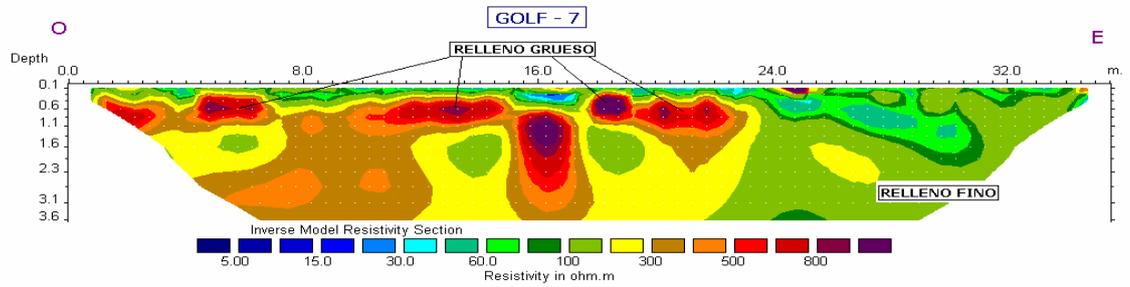
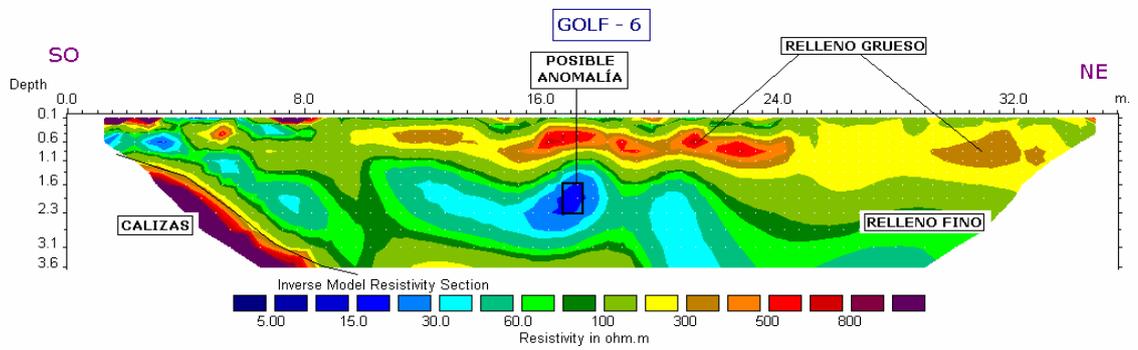
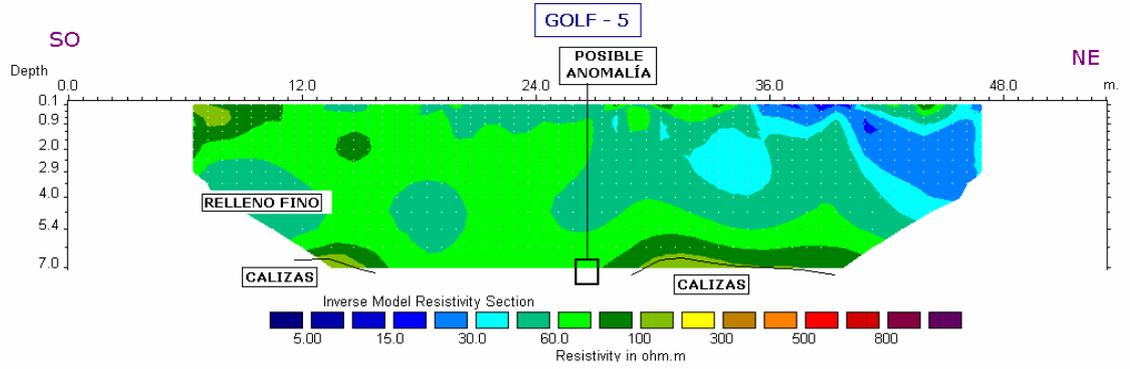


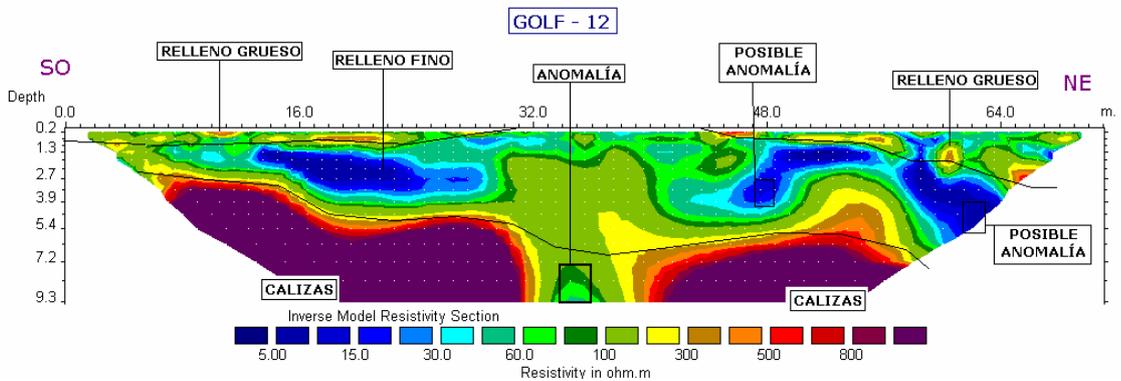
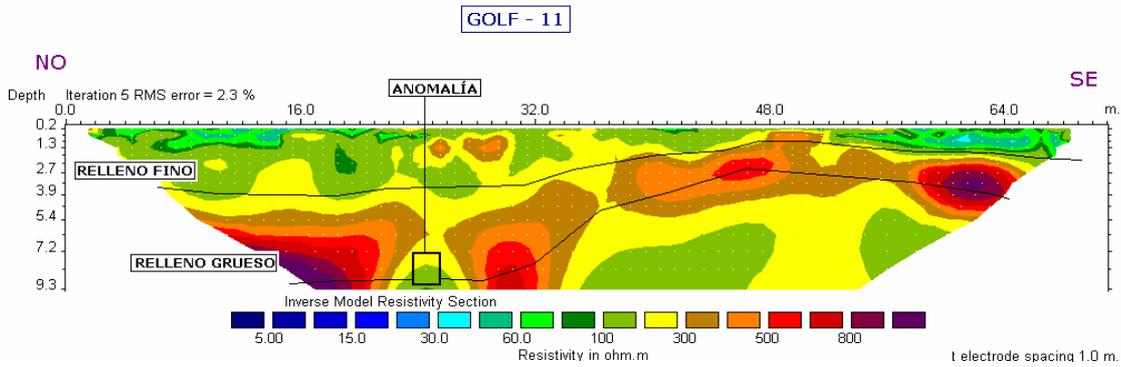
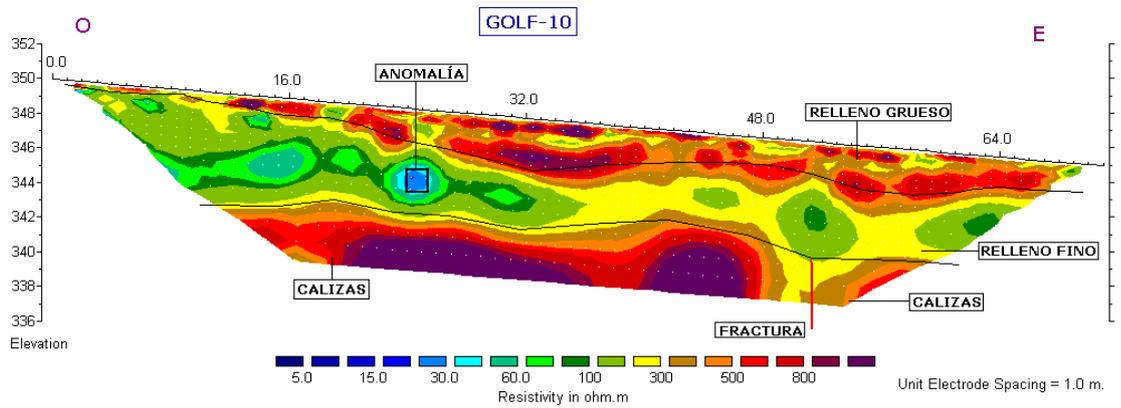
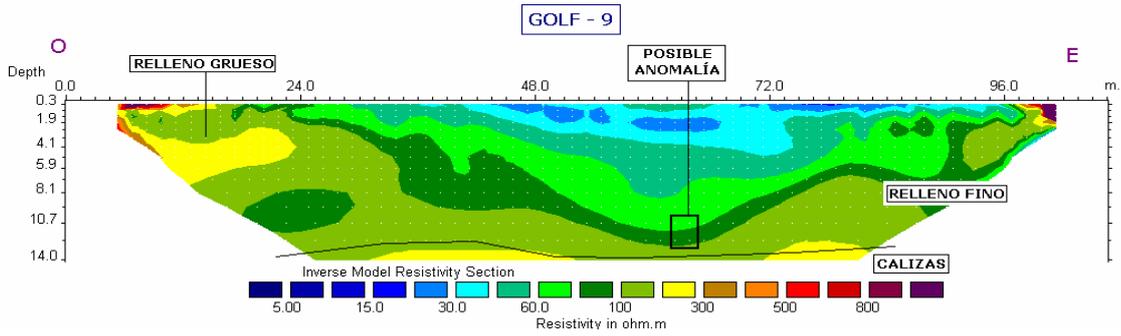
TRABAJO 7.2 DETERMINACIÓN DE ESPESORES Y FRACTURAS

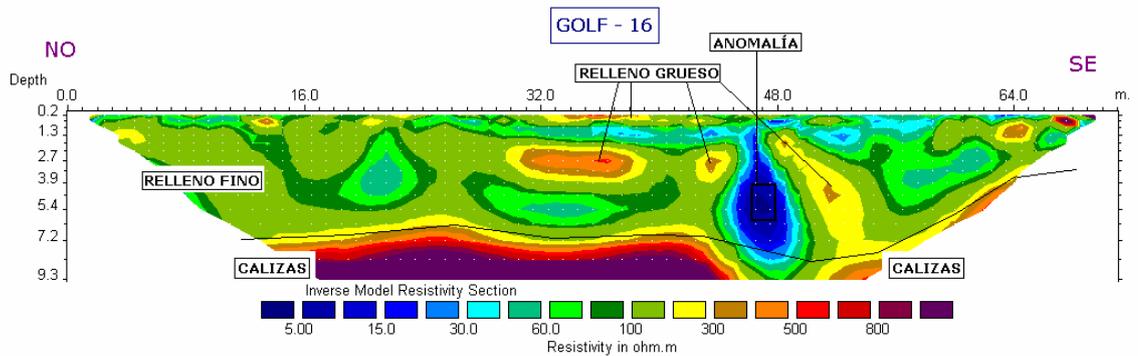
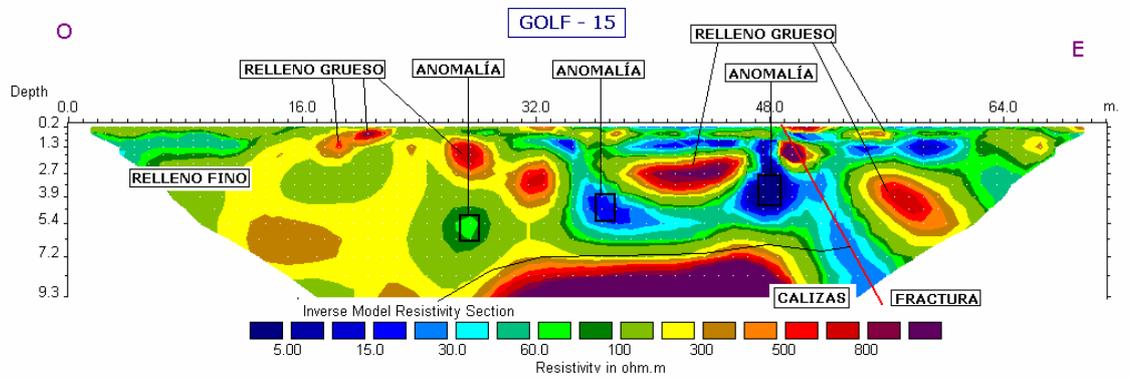
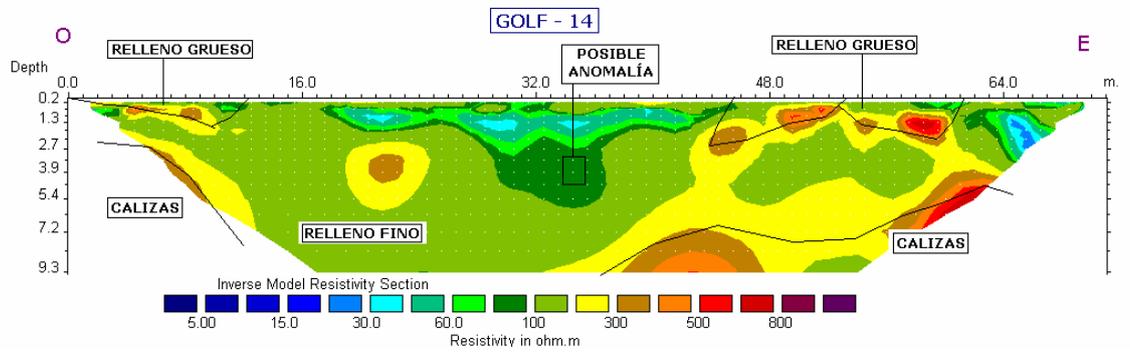
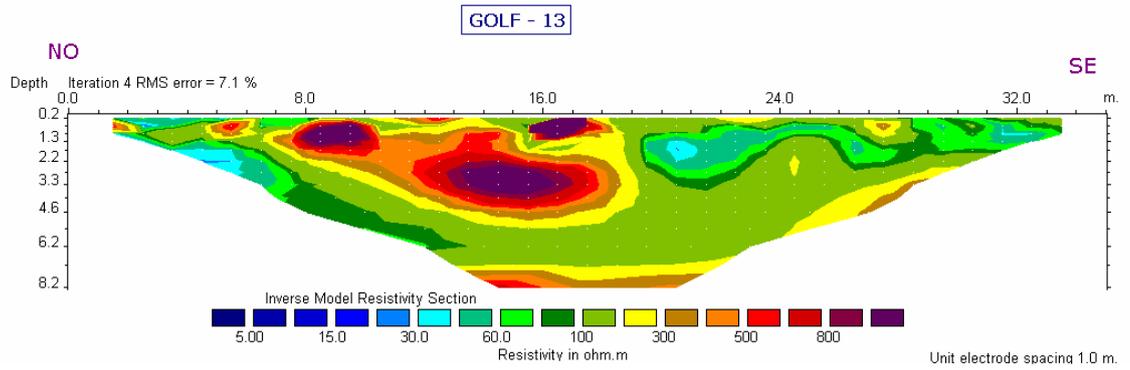


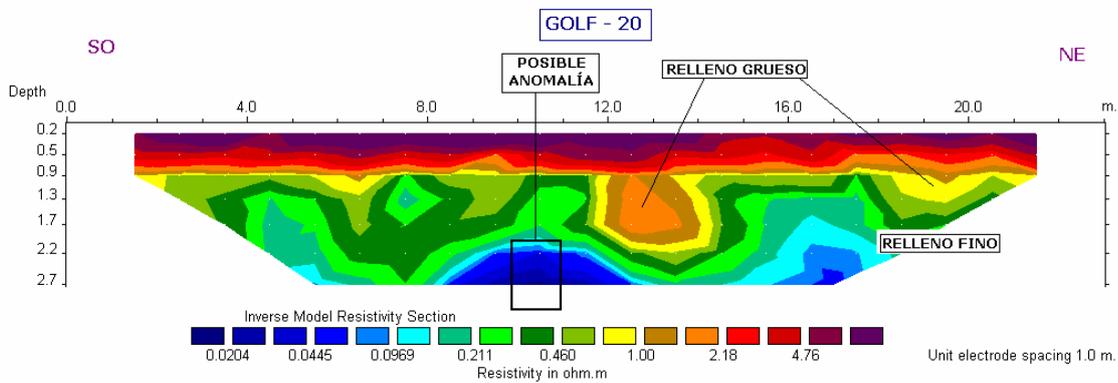
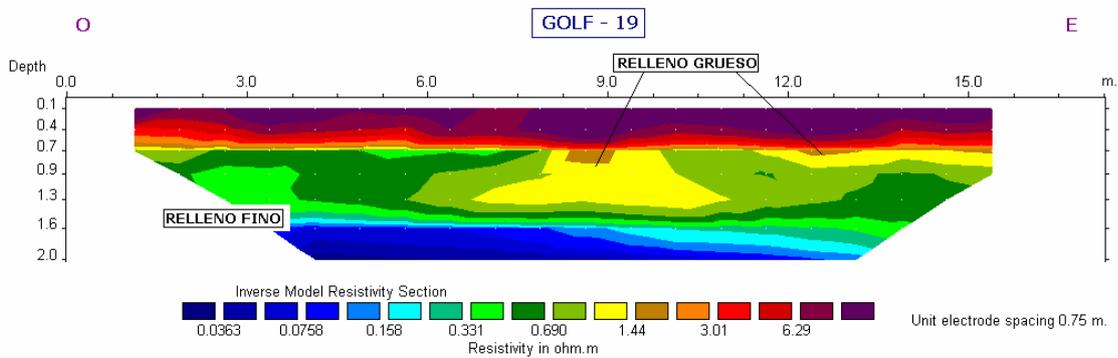
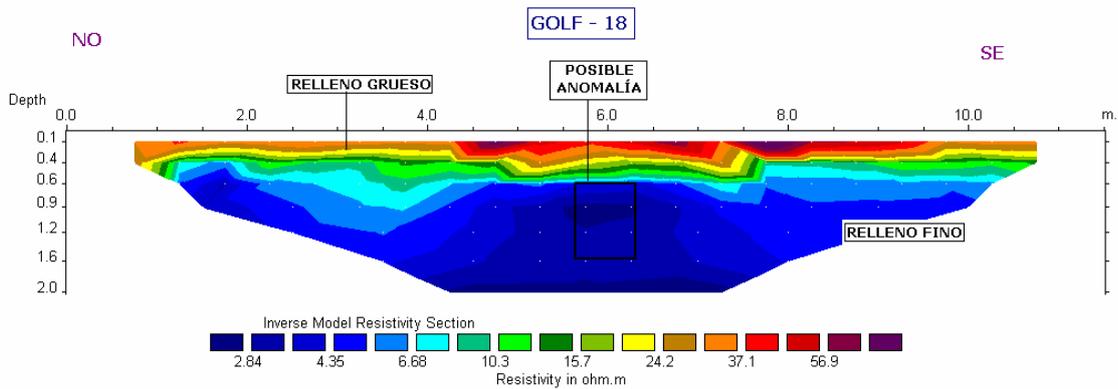
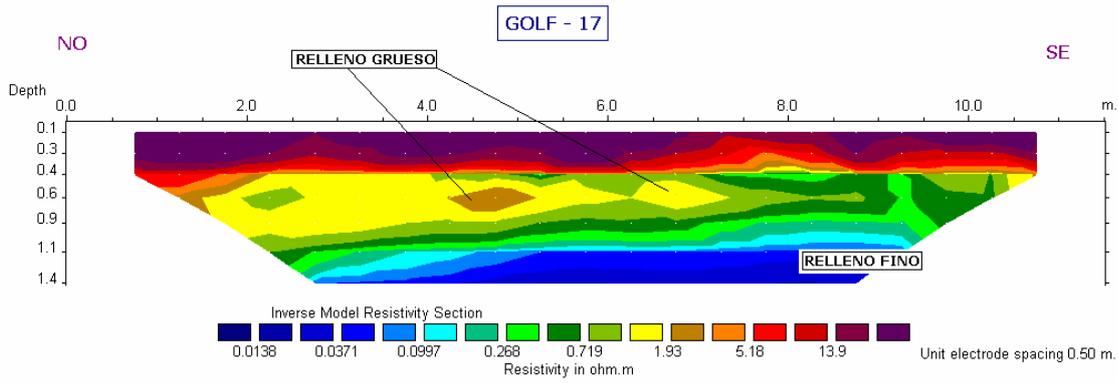
TRABAJO 8 LOCALIZACIÓN DE UN COMPLEJO DE GALERÍAS MINERAS A DISTINTAS PROFUNDIDADES: LA ARBOLEDA (Vizcaya)











ANEXO III

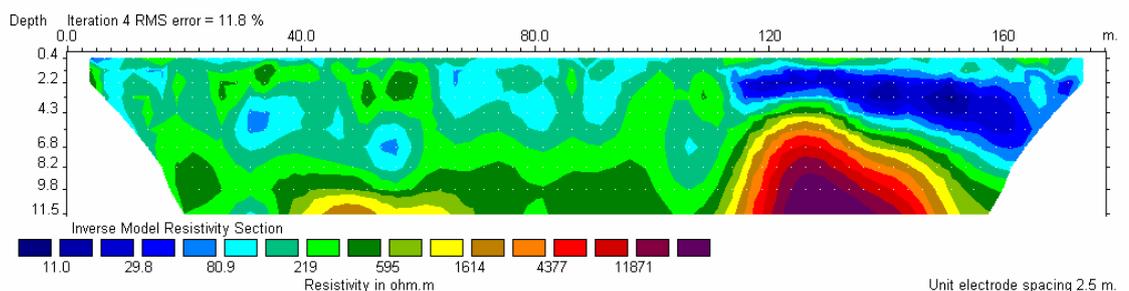
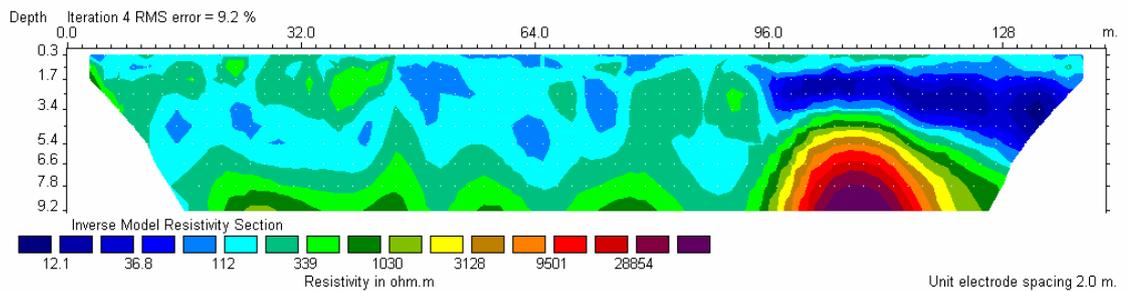
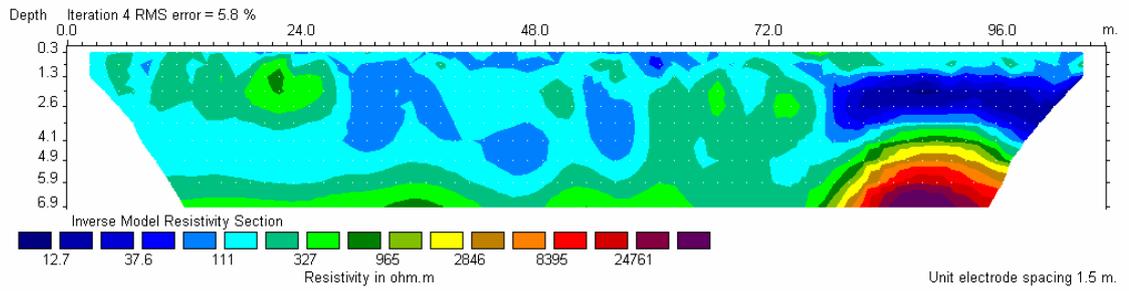
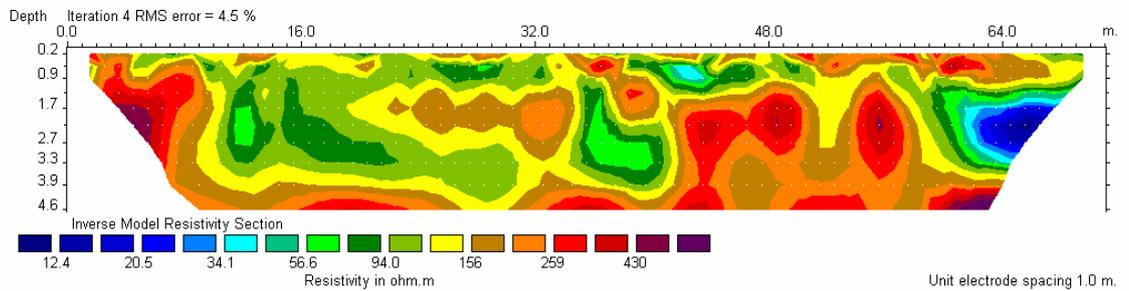
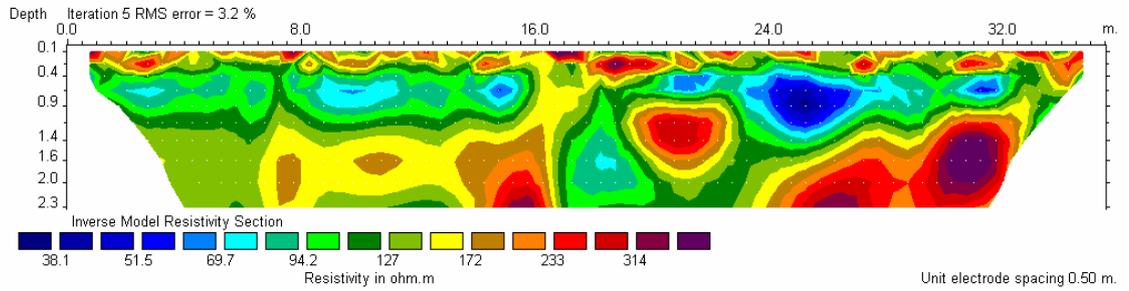
PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y FOTOGRAFÍAS DEL CAPÍTULO 6

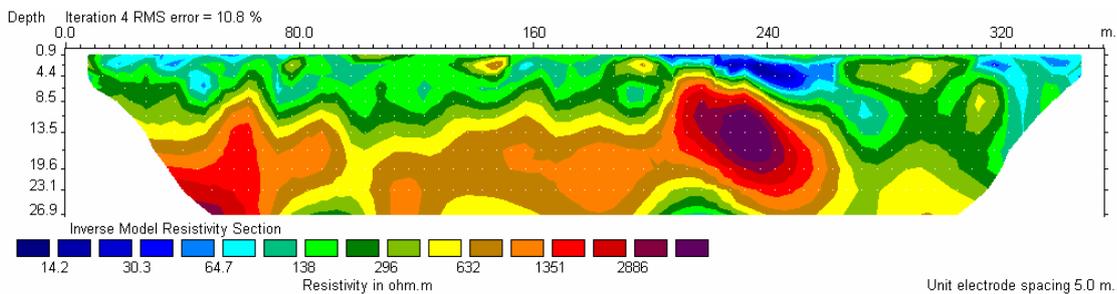
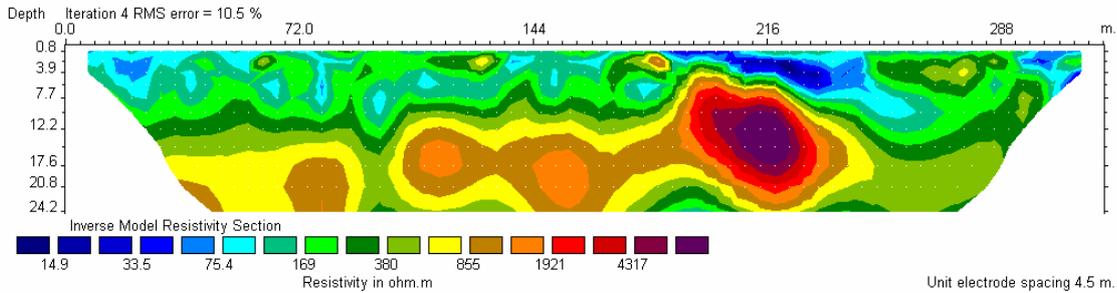
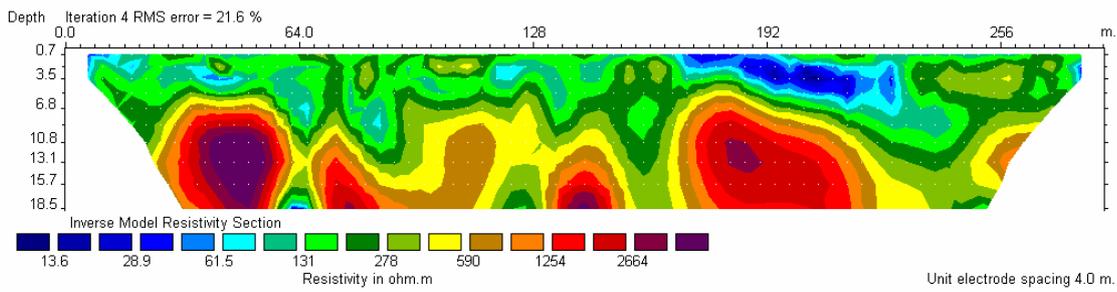
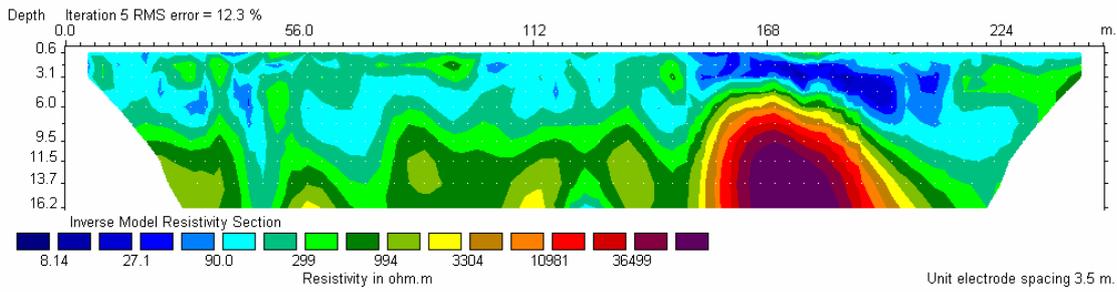
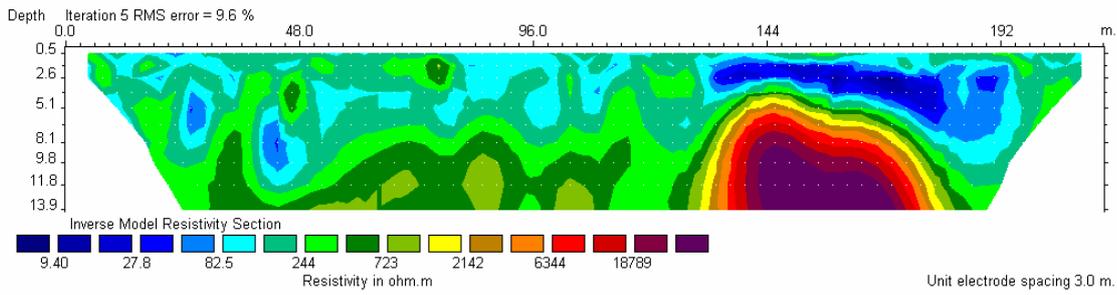
**-APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA AL PARAJE KÁRSTICO Y
YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DE COLONIA CLUNIA SULPICIA-**

PERFILES Zona I – Dipolo-Dipolo

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos

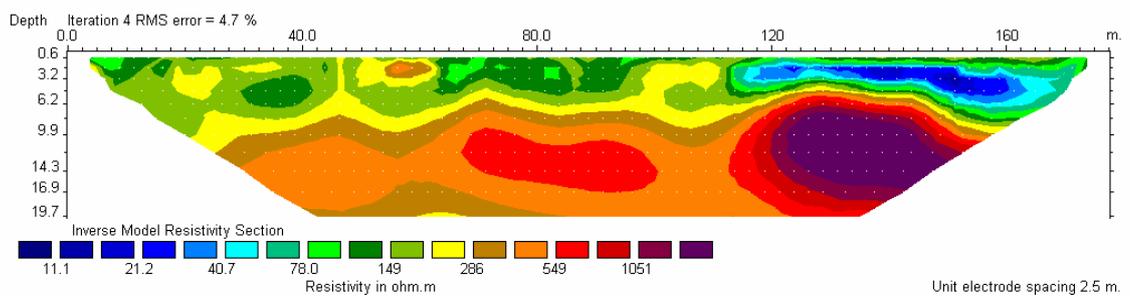
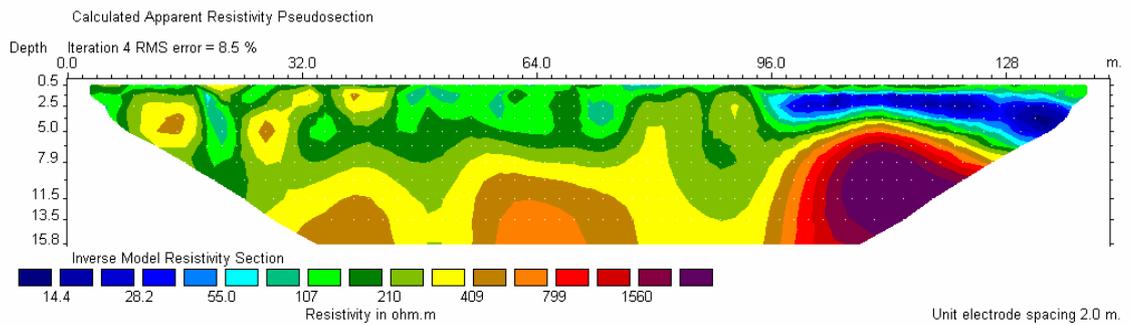
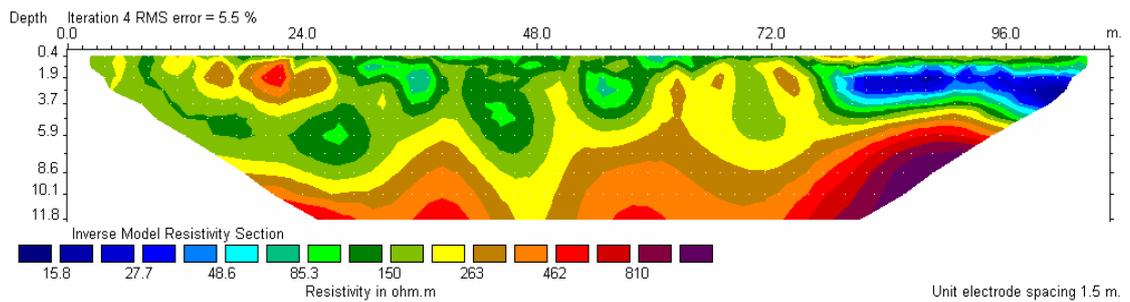
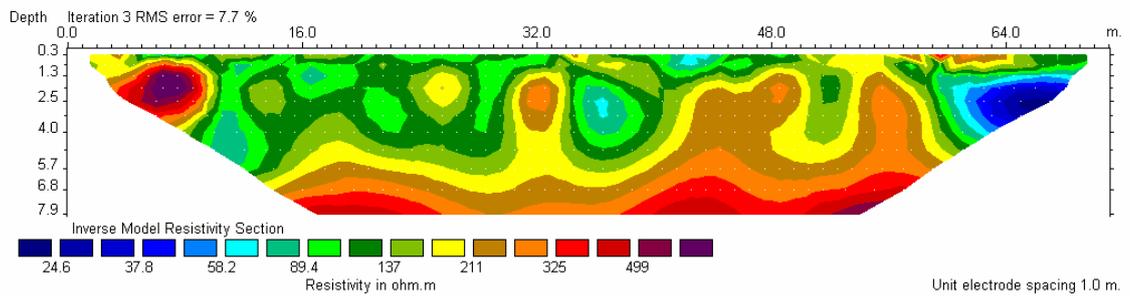
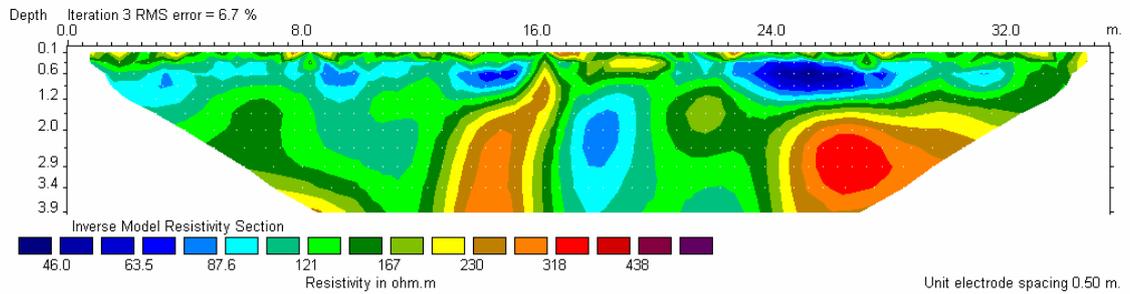
10 perfiles con espaciado de 0,5 m hasta 5 m

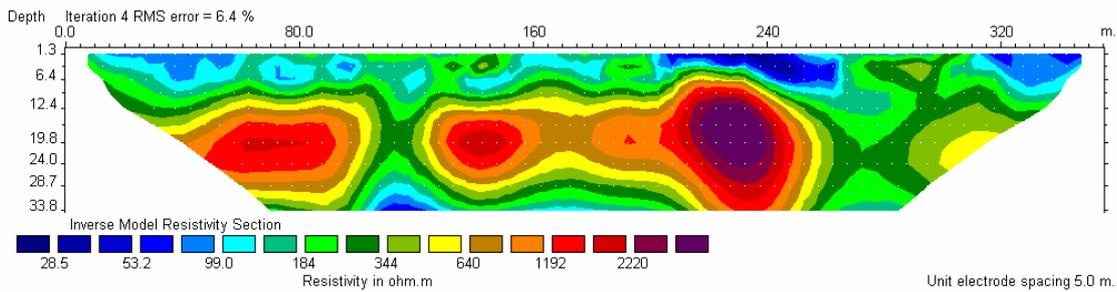
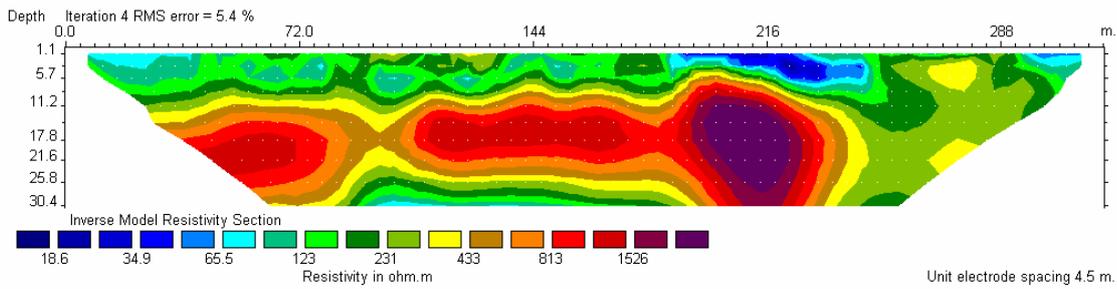
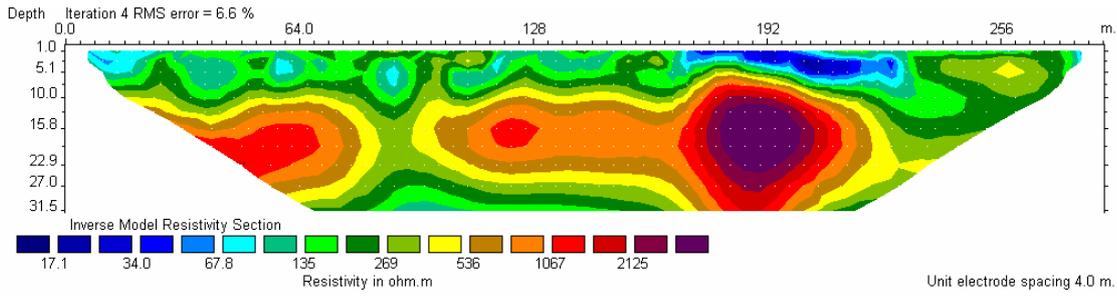
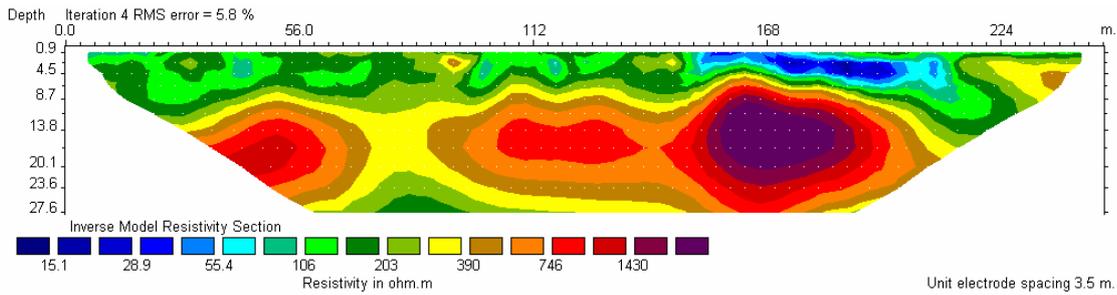
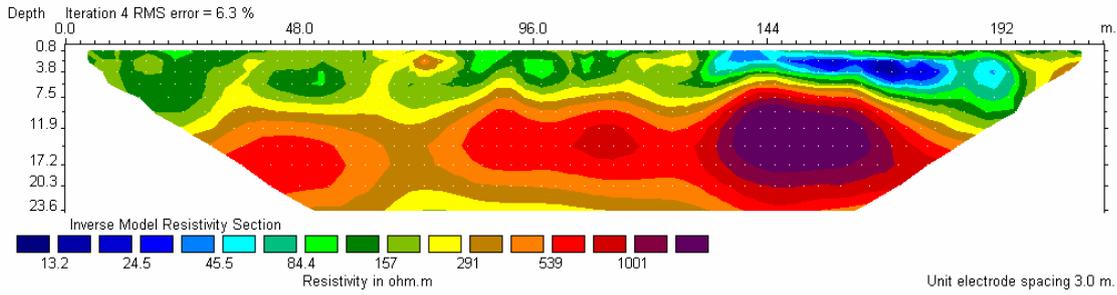




PERFILES Zona I – Schlumberger-Wenner

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos 10 perfiles con espaciado de 0,5 m hasta 5 m

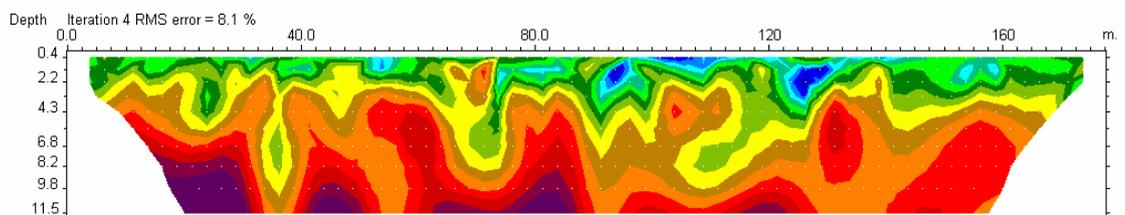
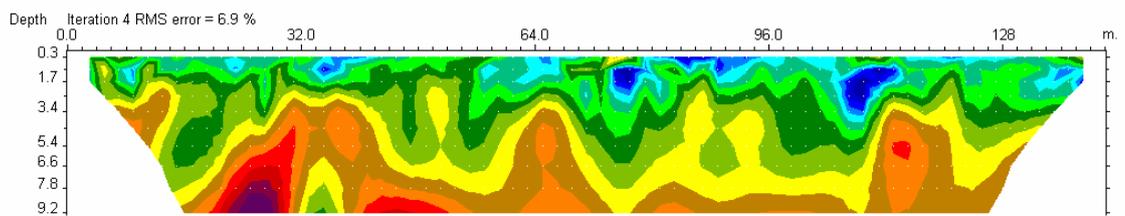
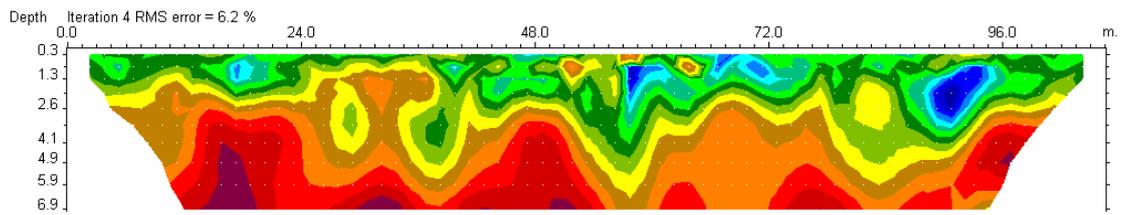
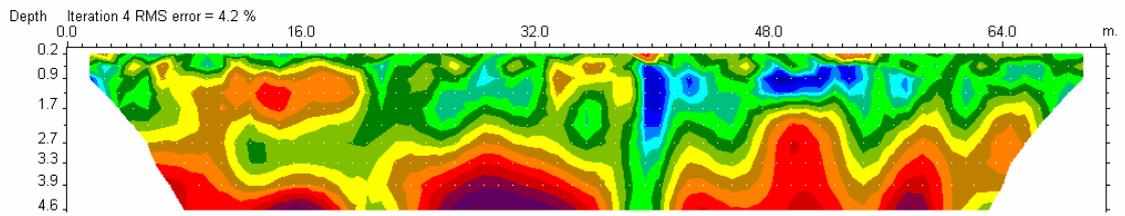
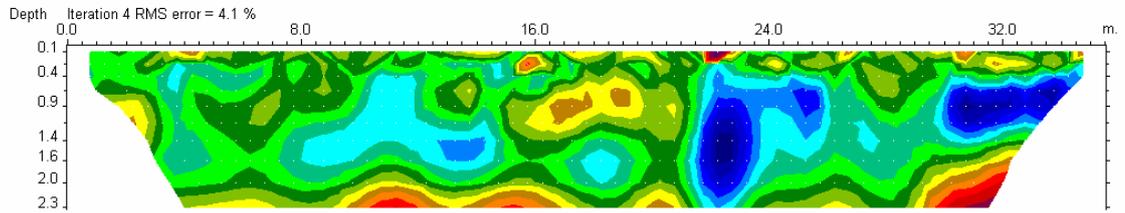


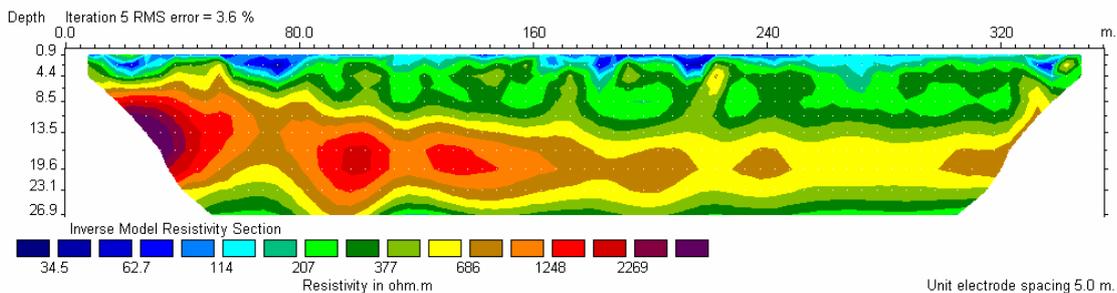
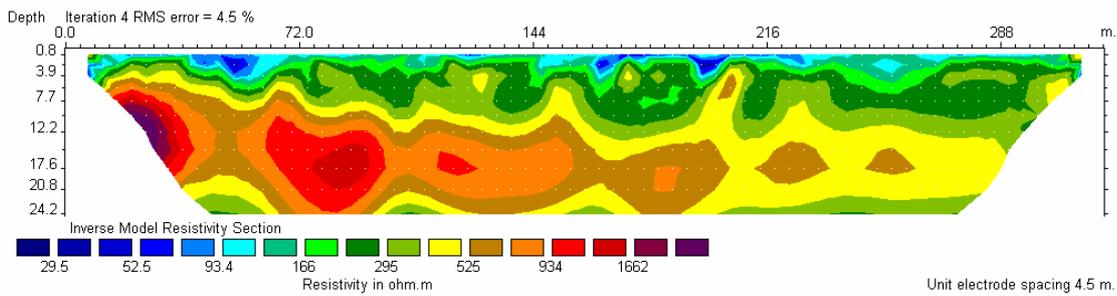
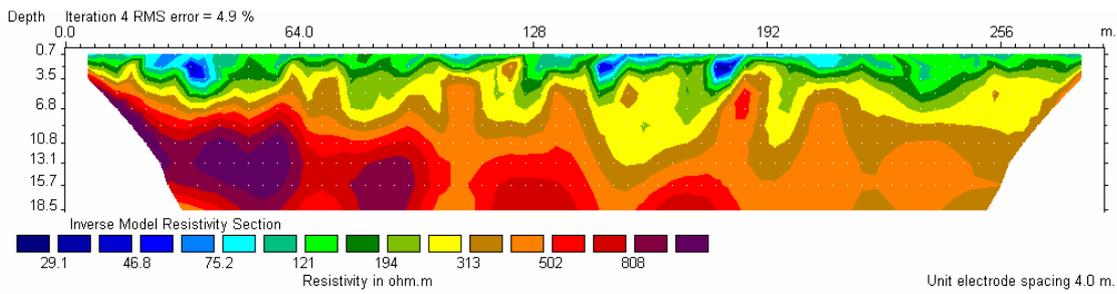
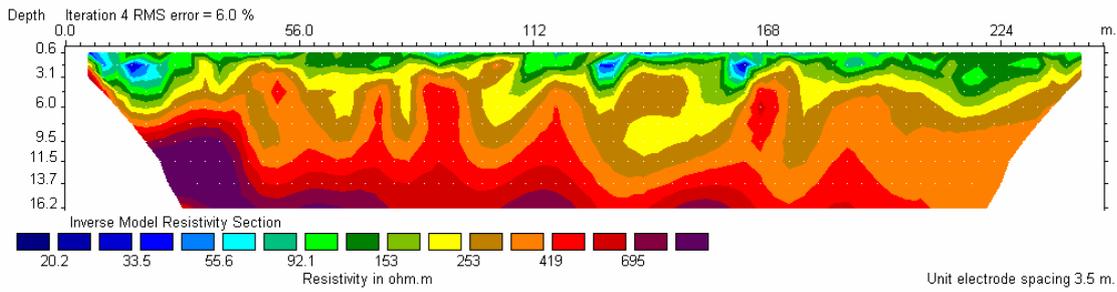
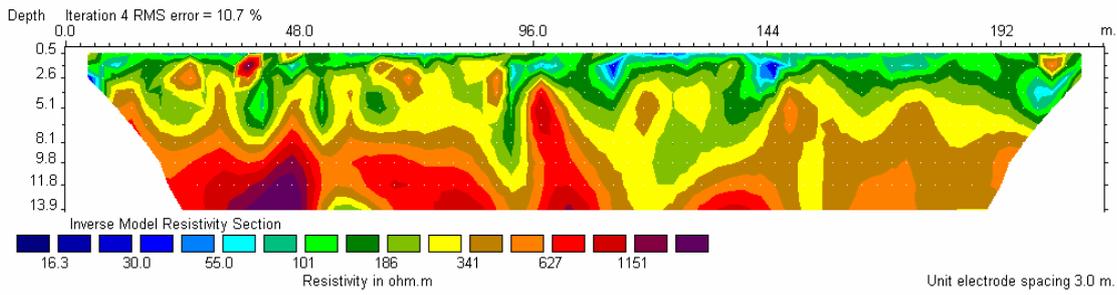


PERFILES Zona II – Dipolo-Dipolo

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos

10 perfiles con espaciado de 0,5 m hasta 5 m

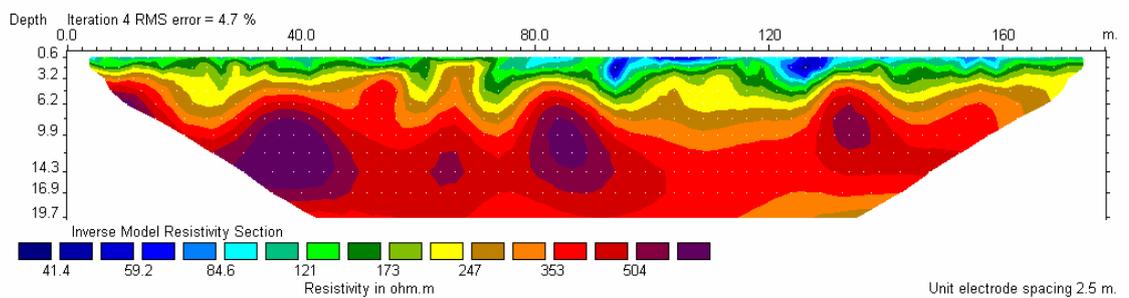
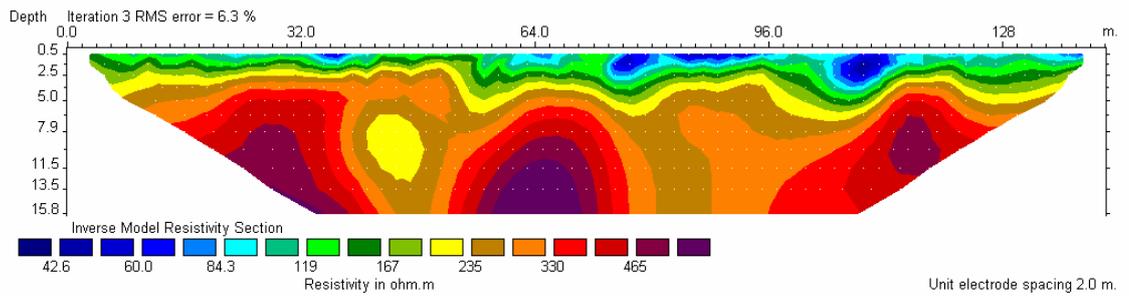
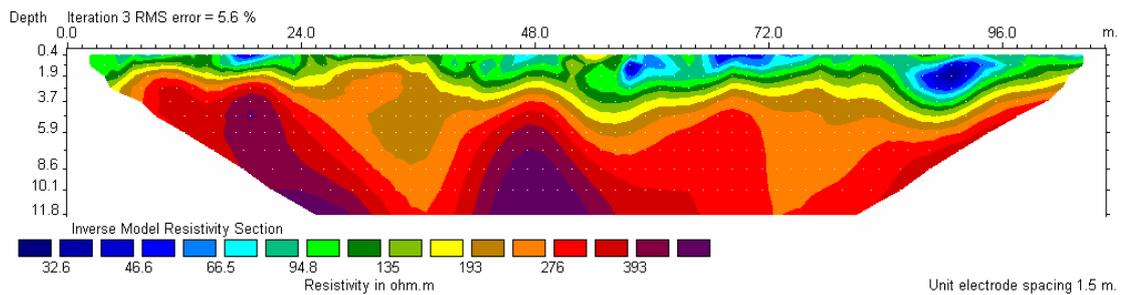
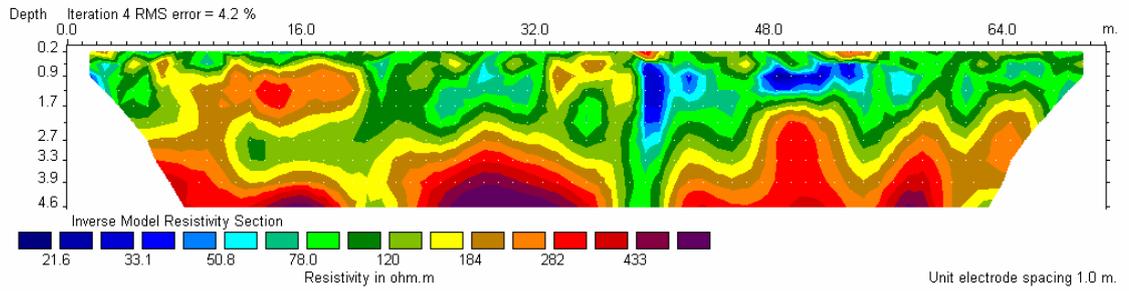
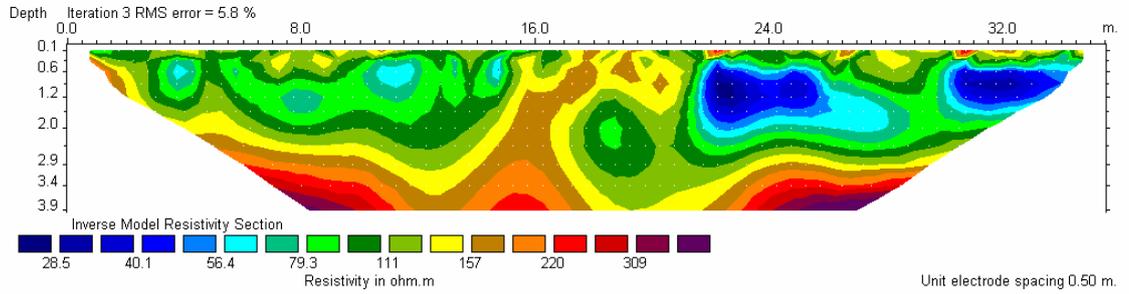


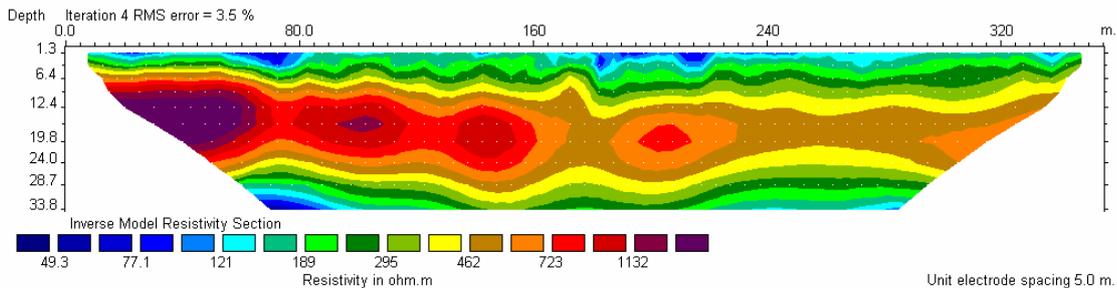
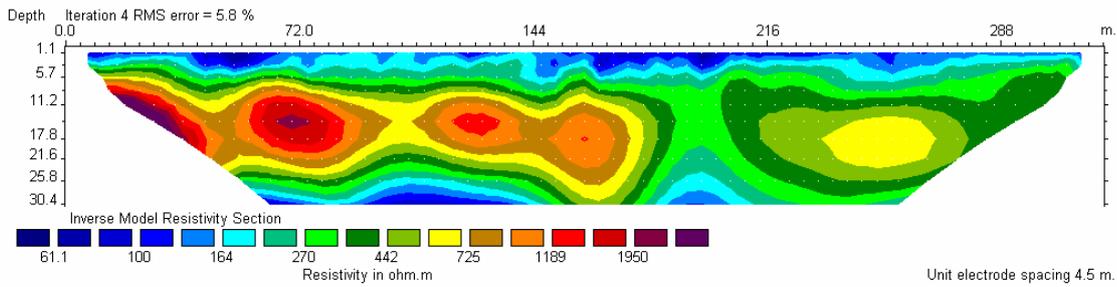
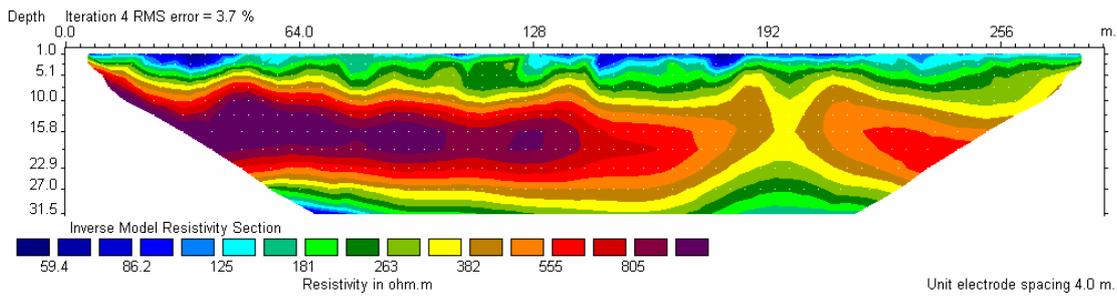
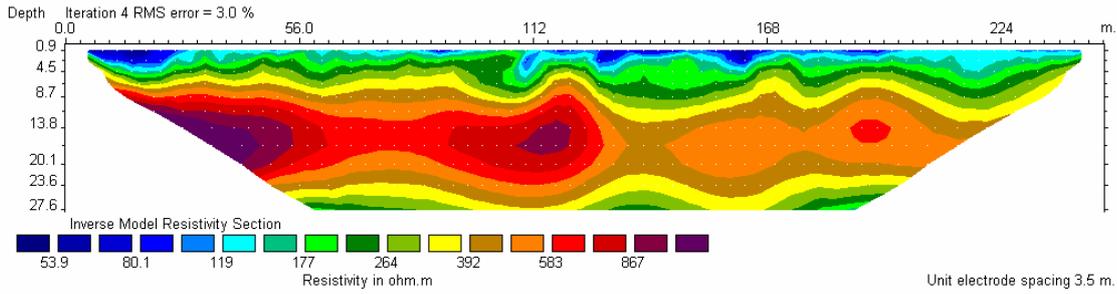
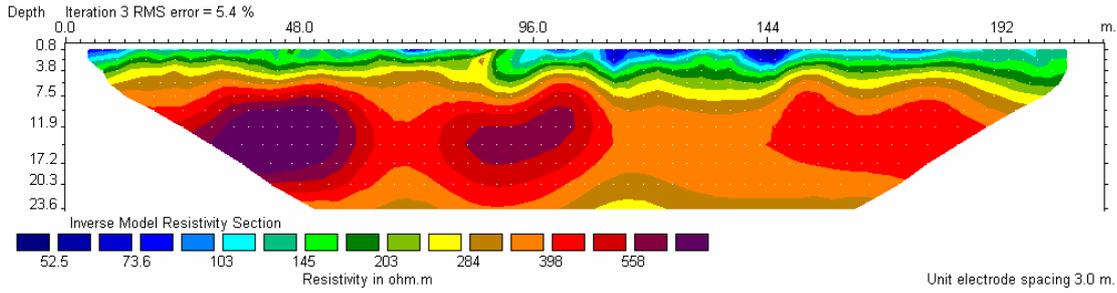


PERFILES Zona II – Schlumberger-Wenner

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos

10 perfiles con espaciado de 0,5 m hasta 5 m

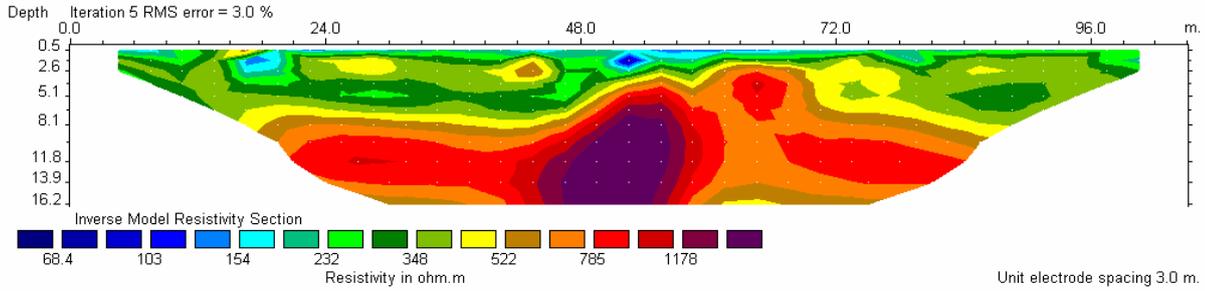




PERFILES Zona IV – Dipolo-Dipolo

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos

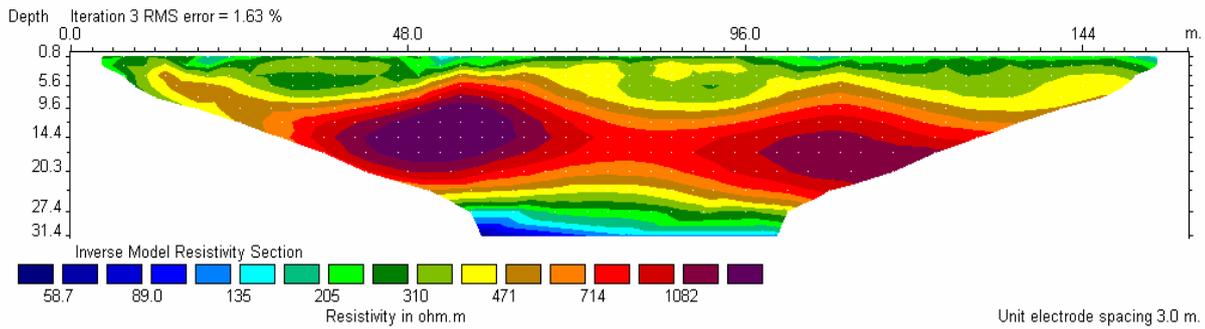
1 perfil con espaciado 5 m



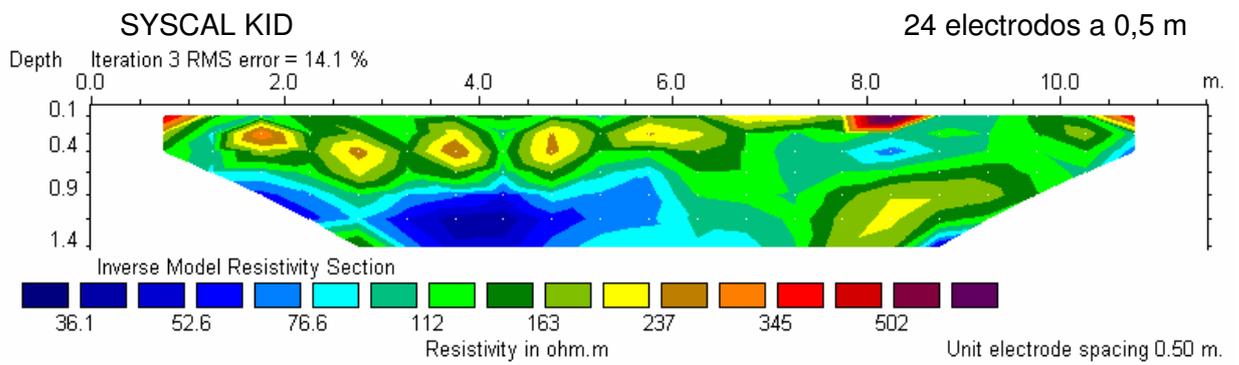
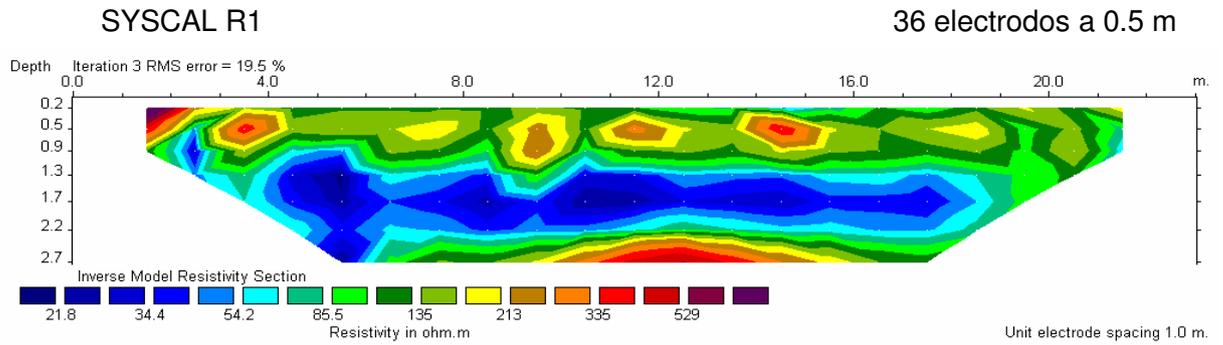
PERFILES Zona IV – Schlumberger-Wenner

Equipo SYSCAL R1 72 electrodos

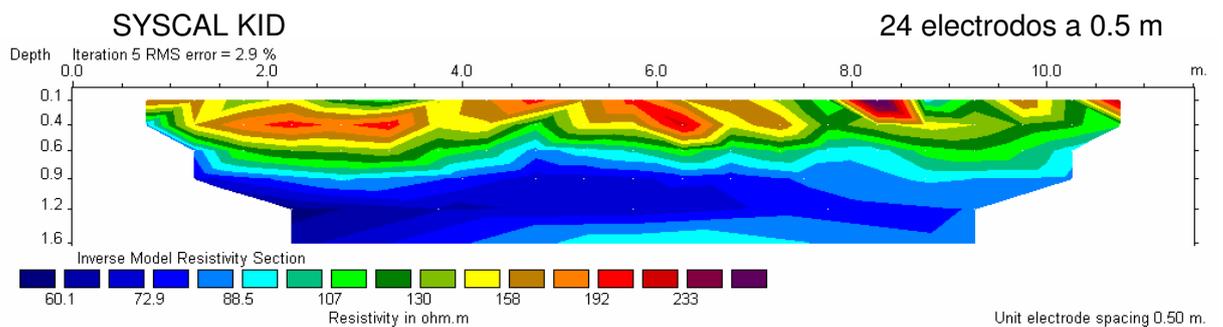
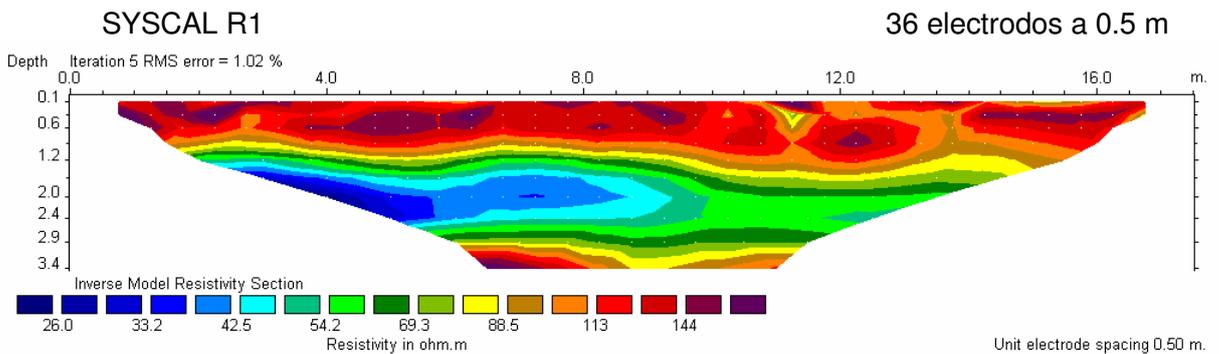
1 perfil con espaciado 5 m



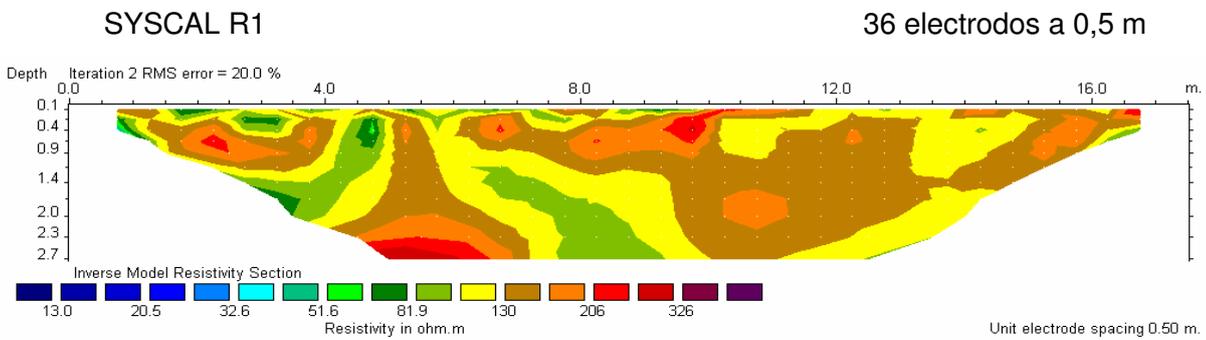
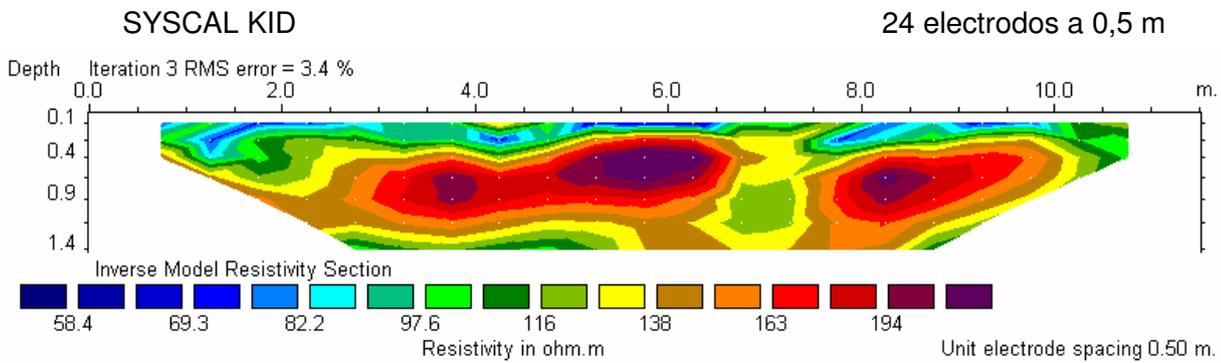
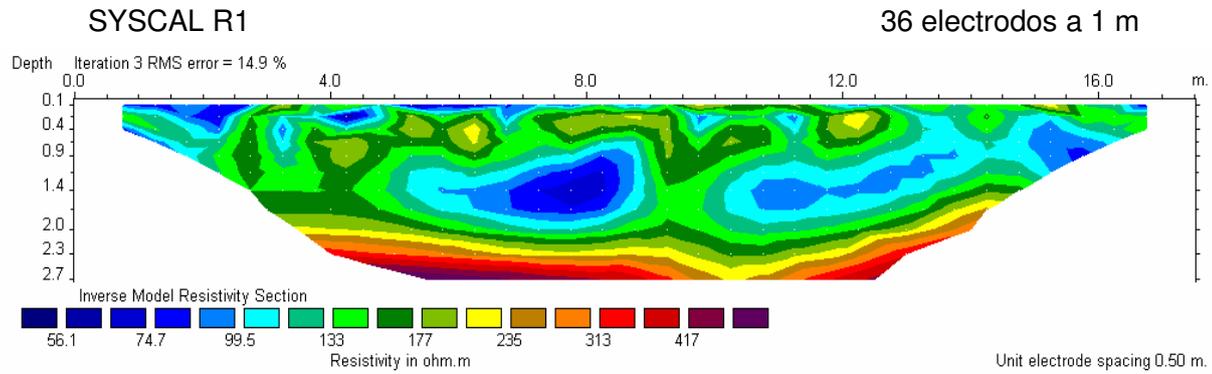
PERFILES Ruinas Termas – Dipolo-Dipolo



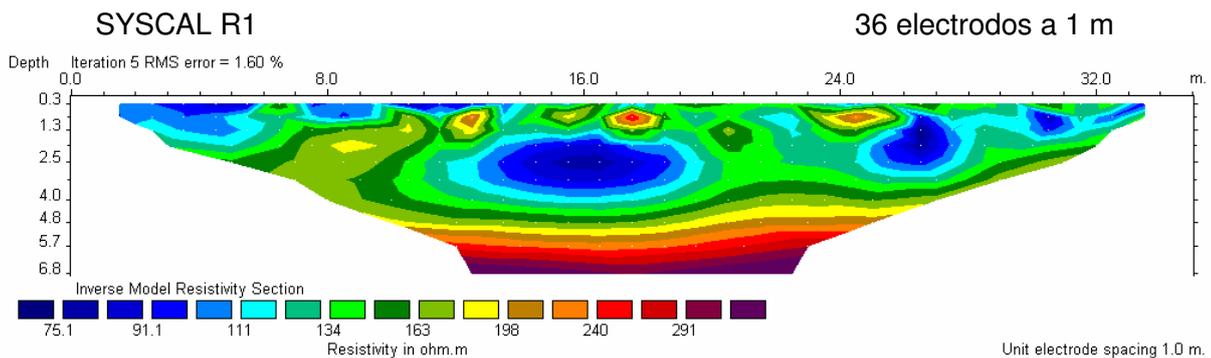
PERFILES Ruinas Termas – Schlumberger-Wenner

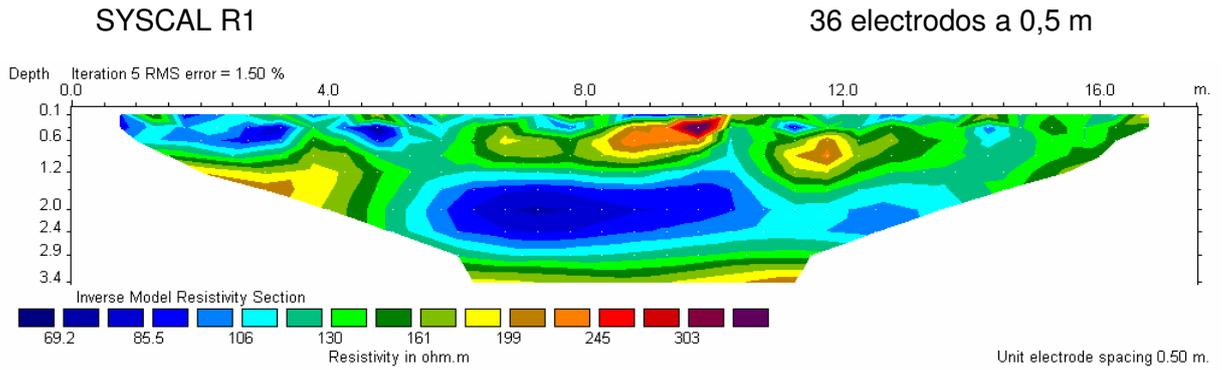
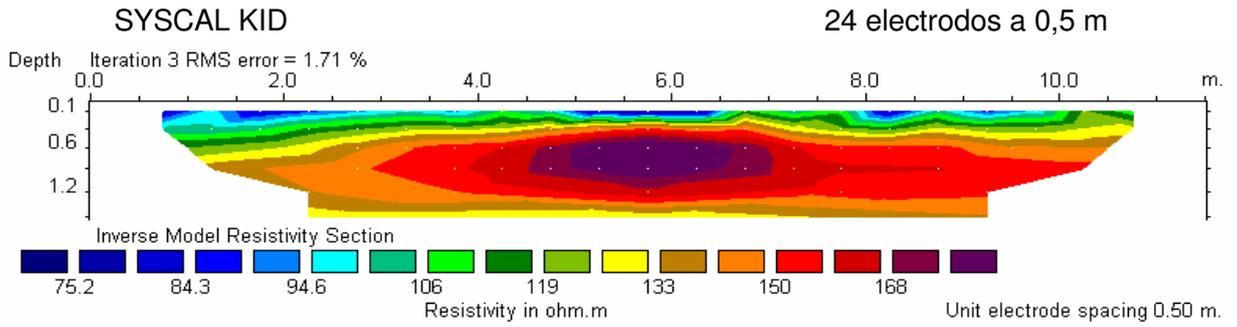


PERFILES Muro enterrado – Dipolo-Dipolo

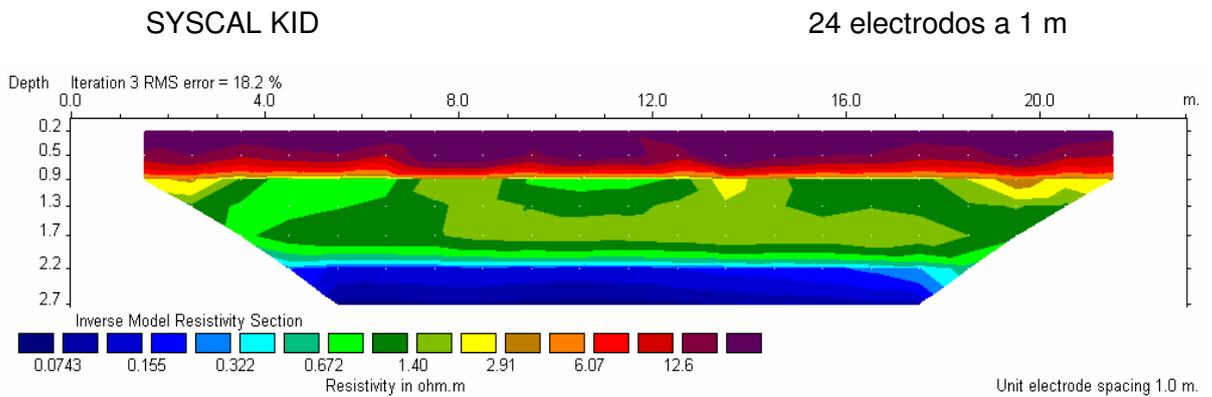


PERFILES Muro enterrado – Schlumberger-Wenner

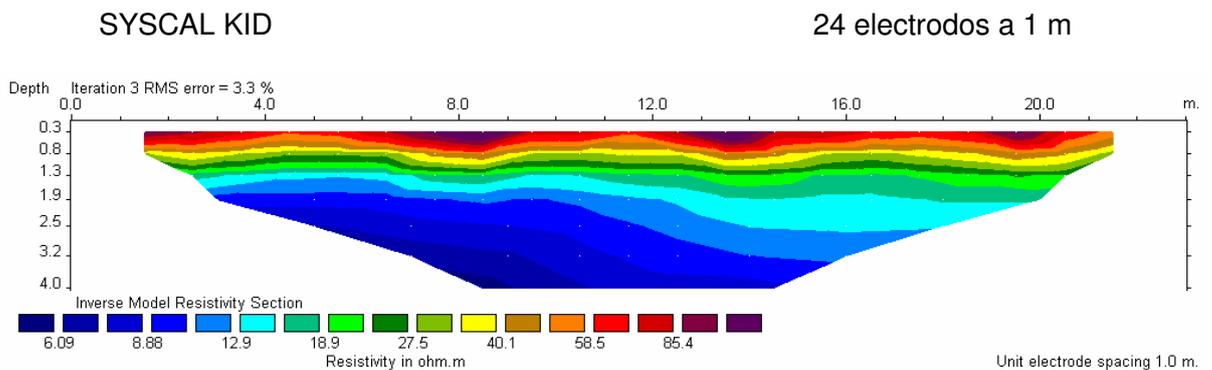




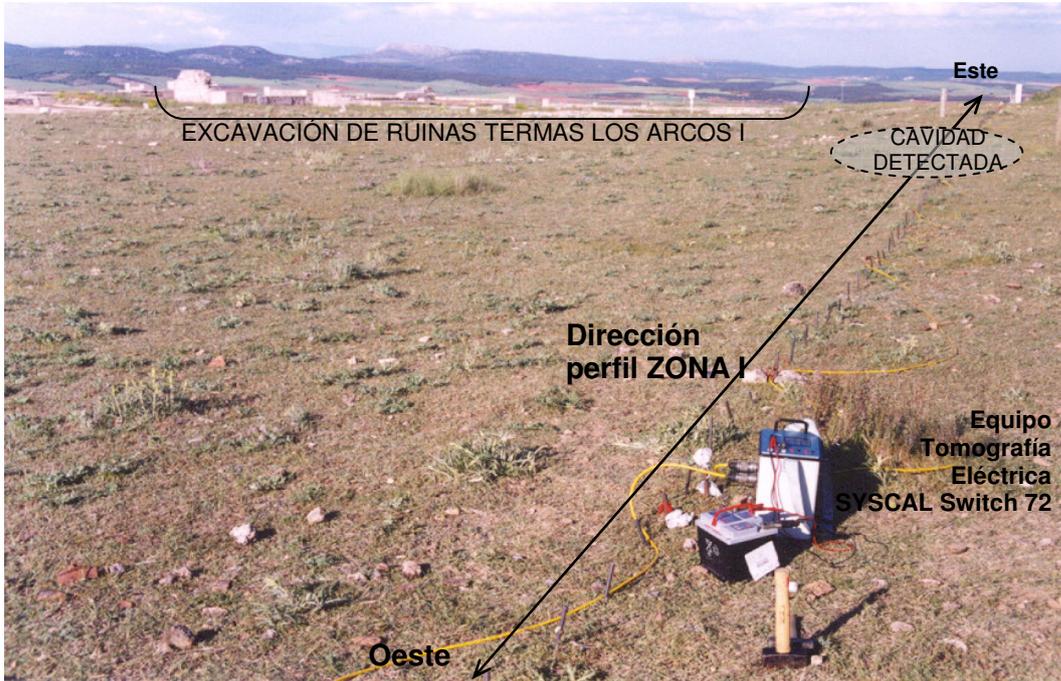
PERFILES Foro – Dipolo-Dipolo



PERFILES Foro – Schlumberger-Wenner

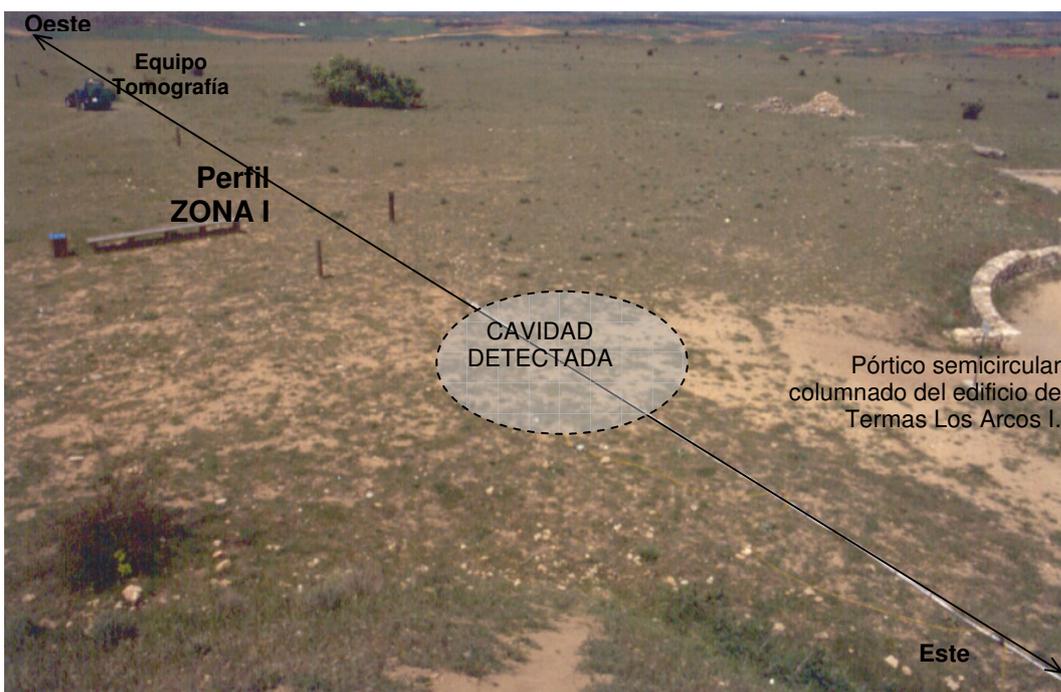


PERFILES Zona I



ARRIBA: La fotografía muestra el lugar que corresponde al centro de los perfiles Zona I. En este lugar se sitúa el Resistímetro SYSCAL R1, y desde él se despliegan a derecha e izquierda los cables multinodo que se conectan al dispositivo. Al fondo se distinguen las excavaciones arqueológicas correspondientes a las Termas denominadas “Los Arcos I”.

ABAJO: La fotografía muestra el terreno cercano a las Termas cuyo subsuelo oculta una cavidad desconocida hasta ahora, y cuya existencia queda claramente reflejada en los perfiles comentados en el capítulo 6 PERFILES Zona I.



PERFILES Zona II

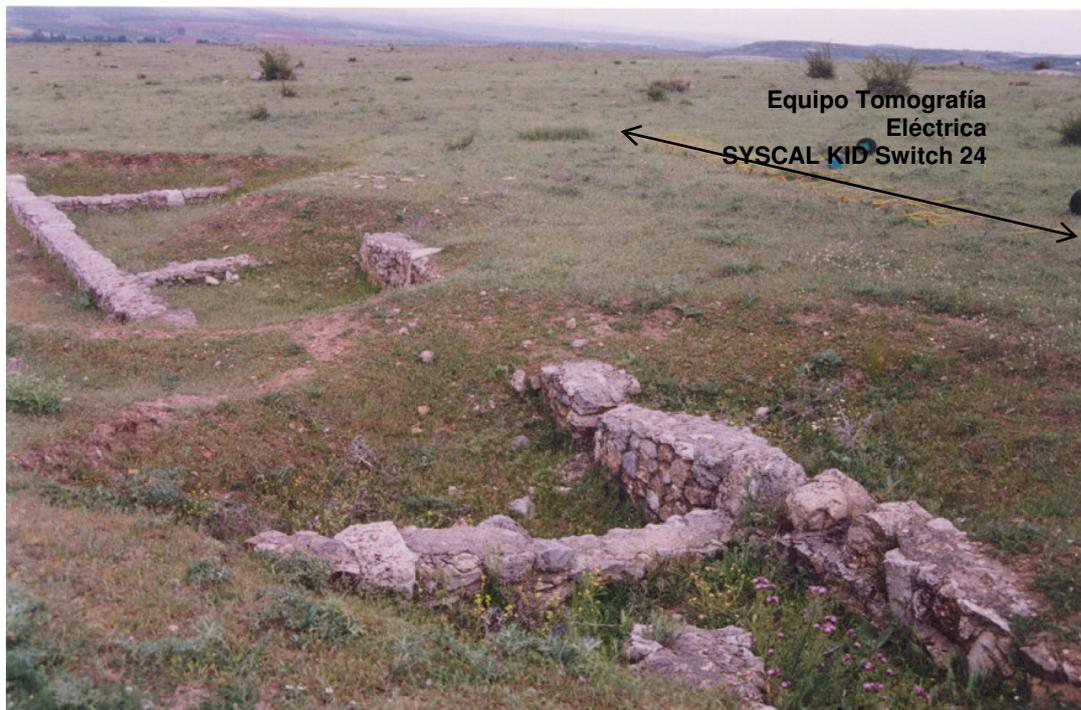


ARRIBA: Lugar que corresponde al centro de los perfiles Zona II. Se pueden distinguir los electrodos de corriente clavados cada 0,5 m y los cables multinodo que se irán conectando al dispositivo con separación creciente de 0,5 m a 5 m hasta completar 10 perfiles.

ABAJO: Labores de adquisición de medidas en Clunia utilizando el equipo SYSCAL R1 Switch 72 y volcado de datos al PC portátil. El procesado de datos mediante software RES2DINV permite visualizar los perfiles en la pantalla de manera inmediata.



PERFILES Ruinas Termas

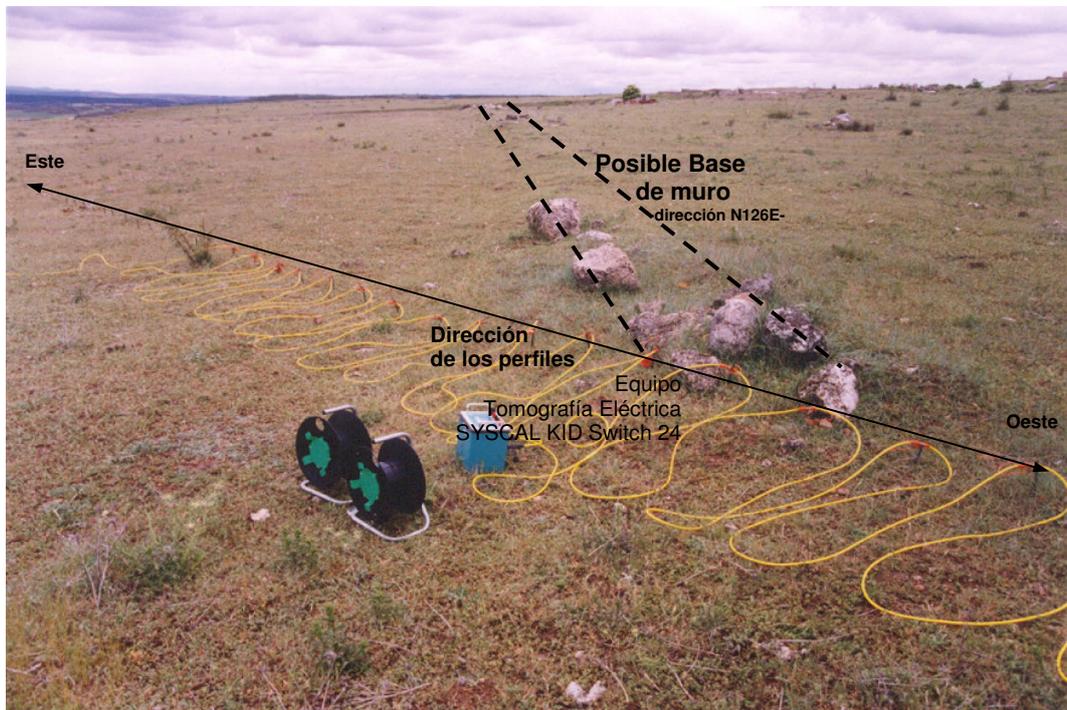


ARRIBA: Detalle de los muros enterrados en las termas "Los Arcos II" y que sirven de calibración para la interpretación de perfiles con fines arqueológicos. Al fondo se distingue la posición del resistímetro SYSCAL KID 24 y los cables extendidos.

ABAJO: Vista general del emplazamiento de los perfiles "Ruinas Termas". Al fondo se observan los muros ya excavados y en primer plano el equipo de tomografía.



PERFILES MURO enterrado



ARRIBA: Emplazamiento de los perfiles denominados "MURO enterrado". Se ha señalado con línea discontinua la posible traza del muro. El equipo SYSCAL KID utiliza 24 electrodos con un espaciado de 0,5 m.

ABAJO: Perfiles realizados con el equipo SYSCAL R1 y 36 electrodos separados 1 m.

