

Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es, probablemente, el método de prospección geofísica más versátil a la hora de realizar análisis del subsuelo con fines relacionados con la contaminación del medio ambiente dado que permite trabajar en profundidades muy variables y abordar múltiples objetivos como, entre otros, identificar rellenos de vertederos, cubicar sus volúmenes, caracterizar antiguas balsas mineras e identificar plumas de contaminación.

One of the better geophysical prospecting techniques is the electrical tomography, useful for detailed knowledge about subsurface features in environmental applications. It allows making measurements of electrical resistivity in detailed profiles and different depths penetration. It can provide us information about dimensions and volumes of dumps, mining settling basin characterization and pollution plumes identification.

Existen sobre la superficie numerosos restos de actividad antrópica que, por su naturaleza y características, es conveniente que sean eliminados. Por ejemplo, casos de contaminación del subsuelo por la presencia de vertederos, por hidrocarburos o por restos de antiguas balsas de lodos de lavado de mineral son, en la actualidad, problemas de necesaria solución que requieren, para su correcta ejecución, de la investigación previa de los terrenos que afectan.

Salvo excepciones, la extensión en el subsuelo de los materiales contaminantes no es posible conocerla sin que se realice una prospección para delimitar su extensión y su profundidad, prospección que puede hacerse tanto por métodos directos (*perforación de sondeos, catas*), como indirectos (*prospección geofísica*) o mixtos (combinando ambas técnicas).

El contenido de este trabajo pretende defender la importancia de hacer una investigación del terreno previamente a cualquier actuación sobre el mismo y, al mismo tiempo, enfatizar la prospección mixta (investi-

gación geofísica y comprobación con algunos sondeos) como metodología más adecuada y económica.

Son muchos los elementos que pueden estar ocultos en el subsuelo, desde características geológicas, como litología, contactos, rocas con diferente grado de alteración, fracturas o cavidades kársticas, hasta los elementos antrópicos antes mencionados, como vertederos, balsas mineras y elementos contaminantes.

La prospección del subsuelo por métodos sísmicos, eléctricos, electromagnéticos o gravimétricos vendrá condicionada, en la mayoría de los casos, por el objetivo perseguido y las condiciones del terreno. La *tomografía eléctrica* se presenta, entre todos los métodos, quizás como el más polivalente y de resultados más inmediatos.

Podría decirse que la mayor parte de los objetivos perseguidos en el subsuelo pueden acometerse mediante el empleo de esta técnica que, gracias a la tecnología actual, permite ver los resultados obtenidos casi en tiempo real.

Enrique ARACIL ÁVILA (*)
Unai MARURI BROUARD (*)
Javier VALLÉS IRISO (*)
Pedro MARTÍNEZ PAGÁN (**)
José Ángel PORRES BENITO (***)

(*) ANÁLISIS Y GESTIÓN DEL SUBSUELO, S.L.
(**) U. P. DE CARTAGENA.
(***) UNIVERSIDAD DE BURGOS.

Palabras clave: GEOFÍSICA, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA, MEDIOAMBIENTE.

Key words: GEOPHYSICS, ELECTRICAL TOMOGRAPHY, ENVIRONMENTAL.

Descripción del método

La *tomografía eléctrica* es un método prospectivo geoelectrico no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándolos en función de resistividad eléctrica, propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a su través.

La resistividad de las rocas va a depender, además de su naturaleza y composición, de factores como la porosidad, la disposición geométrica de los poros, la proporción de poros rellenos de agua frente a huecos secos y la resistividad de agua de relleno. Por lo tanto, su textura más o menos alterada o más o menos porosa y el contenido en fluidos de sus poros o fracturas condicionan la concentración de iones, cuya mayor movilidad tiene como consecuencia una menor resistividad o, lo que es lo mismo, una mayor conductividad (Orellana, 1982).

Estos aspectos teóricos son los que dan la pauta de comportamiento a los diferentes materiales (Aracil, et al., 2002). Consecuen-

temente, a partir de la ejecución de la campaña de prospección geoelectrica mediante tomografía se determinarán diferentes valores de resistividad que, por atribución, permitirán identificar unidades litológicas de distinta naturaleza, litologías con distinta textura o grado de alteración, aspectos estructurales (fallas) y geomorfológicos (cuevas y rellenos), etc.

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de perfiles, con una separación determinada que vendrá condicionada por el grado de resolución que se necesite (a menor separación entre electrodos, mayor resolución) y la profundidad de investigación que se precise (a mayor separación de electrodos, mayor profundidad). Con todos los electrodos conectados al equipo de medida, y mediante un programa secuencial específico que se crea para cada objetivo, el aparato *ordena* cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición (Loke, 2000).

Cada uno de estos cuádrupolos hace una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuádrupolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman. Los perfiles de tomografía eléctrica son, en definitiva, secciones del terreno que reflejan la distribución de valores de resistividad a esas distintas profundidades correspondientes a diferentes capas de investigación.

La profundidad de investigación, por tanto, va a depender del espaciado entre electrodos y del dispositivo seleccionado pudiendo superarse fácilmente los 100 m de profundidad, si bien menores penetraciones en el subsuelo repercuten positivamente en una mayor resolución, ya que se emplean menores separación entre geófonos. En principio, para perfiles con el mismo número de electrodos, la resolución de la investigación disminuye con la profundidad logarítmicamente (Dahlin y Loke, 1998).

Cuando se trata de estudios sobre estructuras complejas, la densidad de medidas es un factor primordial, especialmente cuando existe ruido (distorsión que algunas heterogeneidades geológicas de pequeña escala originan en la medición de un perfil), ya que una malla de medidas demasiado dispersa podría dejar pasar por alto rasgos del subsuelo verdaderamente importantes o podría generar falsas estructuras (Dahlin y Loke, 1998).

Como ejemplo, puede verse en la **Fig. 1** un dispositivo compuesto por 72 electrodos, separados 2,5 metros entre sí, capaz de pro-

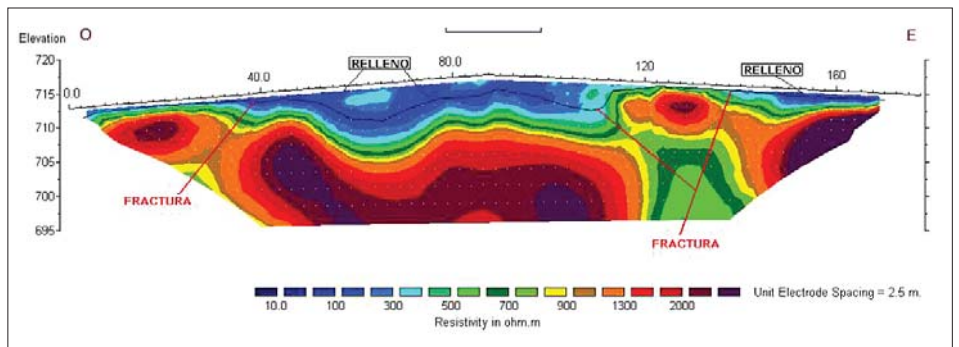


Fig. 1. - Perfil de tomografía eléctrica en un vertedero.

porcionar un perfil de 178 metros de longitud y una profundidad de investigación de 20 metros.

Estos perfiles muestran los valores de resistividad representados por colores para una mejor y más fácil observación de sus variaciones y se acompañan de una carta de distribución de colores que es característica y específica de cada perfil, aunque puede modificarse en rangos y tonalidades. Esta gama de colores representa los distintos valores de resistividad de las formaciones analizadas (ver Fig. 1).

Aplicaciones

Aunque las aplicaciones de este método son muy variadas, se expone a continuación una serie de ejemplos relacionados con tres tipos de objetivos diferentes: el estudio del relleno de vertederos, la determinación de las características de las balsas mineras y la identificación de plumas de contaminación por hidrocarburos.

Vertederos

En el caso de los vertederos, aunque en ocasiones no es fácil determinar los límites, sí suele observarse su extensión superficial. Sin embargo, la profundidad de su contacto con el substrato y las características de relleno no son identificables salvo que se realice una prospección. Es lógico pensar que la ejecución de sondeos permitirá conocer la naturaleza y espesor del relleno en los puntos de actuación y esta información será muy valiosa para poder hacer posteriores cálculos de volúmenes.

El problema surge cuando son importantes tanto las variaciones de espesor como la naturaleza del relleno, aspectos éstos que caracterizan por norma general a los vertederos. Una pretensión de investigar la morfología y distribución de rellenos sólo mediante perforaciones se hace, cuando me-

nos, ilógica pues requeriría un importante número de sondeos, transformándose la investigación en inviable desde el punto de vista económico.

La manera de abordar la investigación debería comenzar por una prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica capaces de delimitar el contacto entre el relleno y el substrato, con distintas o similares direcciones pero siempre abarcando sobradamente los límites del vertedero con los extremos de los perfiles.

En la Fig. 1 se presenta un ejemplo de un perfil de tomografía eléctrica realizado en un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU) en una localidad al sur de Granada. En él se pueden observar dos conjuntos de colores que representan diferentes tipos de materiales. Los colores azules se identifican con los materiales de relleno del vertedero, que se diferencian claramente de los materiales resistivos (resaltados por colores amarillentos y rojizos) que forman el substrato rocoso.

La figura permite identificar el contacto y su profundidad y, con ello, el espesor de relleno en cada punto del perfil. La combinación de varios perfiles sería lo más recomendable para cubrir la superficie de investigación y, mediante el empleo de programas adecuados, poder determinar la distribución espacial de espesores y, consecuentemente, determinar los volúmenes de material de relleno (Fig. 2).

Una vez definido el relleno, la caracterización del mismo se realizará a partir del análisis de la distribución de valores de resistividad en esos materiales. Si estos son homogéneos, significará que la naturaleza del relleno presentará escasas variaciones frente a las diferenciaciones que pueden estimarse si se observan anomalías (ver anomalía más resistiva entre los metros 57 y 67 del perfil). La investigación mixta defiende como necesaria la comprobación posterior de las interpretaciones geofísicas con algunos sondeos convenientemente situados.

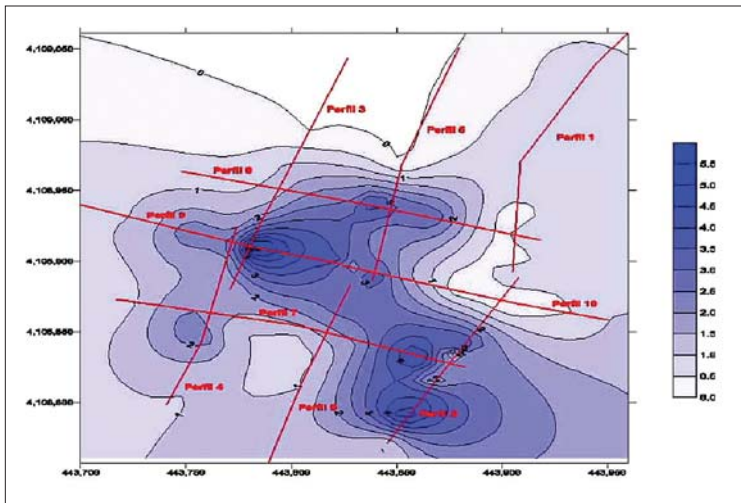


Figura 2.- Mapa de isopacas de relleno.

También la *tomografía eléctrica* se muestra como una herramienta útil aunque se conozca la posición del contacto inferior del relleno. Esto sucede en los casos en los que se quiere hacer una monitorización de la posible contaminación del sustrato por lixiviado.

En el ejemplo de la **Fig. 3** se puede ver cómo una pluma de contaminación de lixivios, generalmente líquidos con una alta conductividad, penetra en el terreno tras la rotura de la membrana de aislamiento. La medición periódica de las resistividades permitirá hacer un seguimiento de la evolución de esa pluma contaminante.

Balsas mineras

En el Diario Oficial de las Comunidades Europeas C65E/385 de jueves 5 de julio de 2001 se desprende la preocupación del Parlamento Europeo por el grave problema que ocasionan tanto las minas abandonadas como los residuos de las balsas mineras abandonadas, que llegan a constituir, al menos, el 18% de la producción total de residuos en la Comunidad Europea, pues consideran que: *existe una gran cantidad de residuos mineros sin inventariar*".

Entre las conclusiones generales del Parlamento Europeo ante este problema: *subraya la importancia de reforzar la I+D en las técnicas de mejorar la eliminación de los residuos*. Para ello, entre otras propuestas, *apoya la (...) eliminación de los residuos mineros y garantiza la financiación necesaria para hacer que estos lugares sean seguros desde el punto de vista medioambiental*.

También considera que deberían existir *disposiciones relativas a los programas de acción sobre residuos mineros así como (...) facilitar (...) la eliminación de estériles secos en el caso de residuos mineros metá-*

licos (...) y *responsabiliza a la Comisión Europea* de la restauración de las minas abandonadas y de las balsas de residuos.

Ante este escenario es fácil pensar que tendrá unas ciertas garantías de éxito cualquier aplicación a la investigación y el desarrollo de cualquier tecnología y/o metodología de trabajo para estos fines. Así, la tomografía eléctrica se presenta como una herramienta muy determinante para conocer tanto la extensión y espesores de los rellenos de una balsa minera como su naturaleza. Es un caso parecido al de los vertederos pero con una característica común y que se muestra ventajosa: los rellenos suelen ser muy finos y homogéneos lo que favorece la

determinación de los límites del relleno y la búsqueda de anomalías en el mismo.

La **Fig. 4** corresponde a una balsa minera abandonada, localizada al suroeste de Vizcaya, cerca del límite con Cantabria. La homogeneidad que caracteriza los materiales de relleno facilita claramente su delimitación con respecto a los materiales que forman el sustrato rocoso. Del mismo modo, las anomalías resistivas que se presentan cerca de superficie, entre los metros 26 y 70 del perfil, permiten delimitar en extensión y profundidad los materiales de origen desconocido.

Como es lógico, el control de espesores de las diferentes unidades de relleno permitirá representarlos en mapas de *isopacas* (distribución de espesores) y en mapas de *facies* (distribución de tipos de rellenos). Estos mapas serán los que permitan, en etapas posteriores, definir el número y posición de los sondeos de comprobación de resultados.

Contaminación

En este apartado se muestran dos ejemplos que permiten apreciar el grado de precisión que tiene este método de prospección geofísica para identificar las anomalías debidas a hidrocarburos (**Fig. 5**) y a lindano (**Fig. 6**). El carácter resistivo de ambos residuos contrasta como anomalías dentro de la masa conductora de los materiales limosos en los que se han vertido.

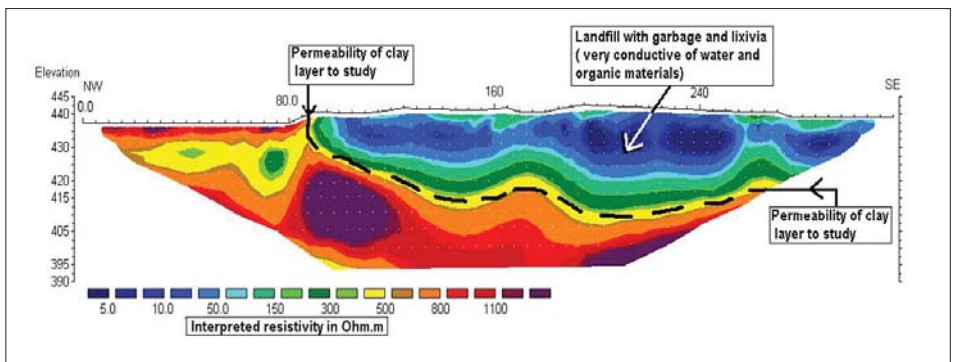


Fig. 3.- Perfil de tomografía en vertedero.

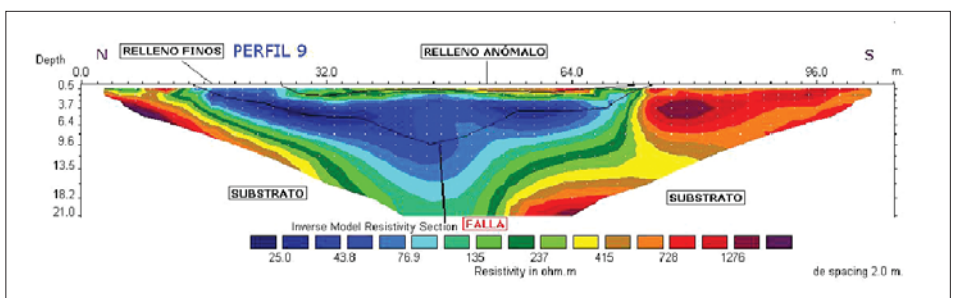


Fig. 4.- Perfil de tomografía en balsa minera.

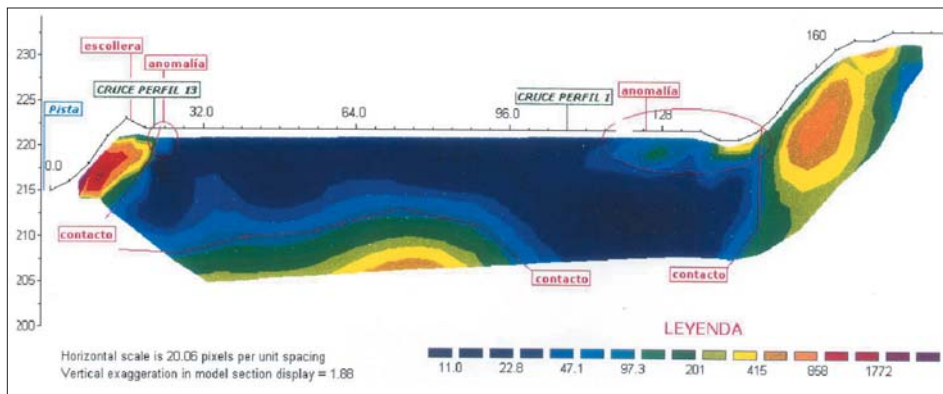


Figura 5. - Identificación de hidrocarburos.

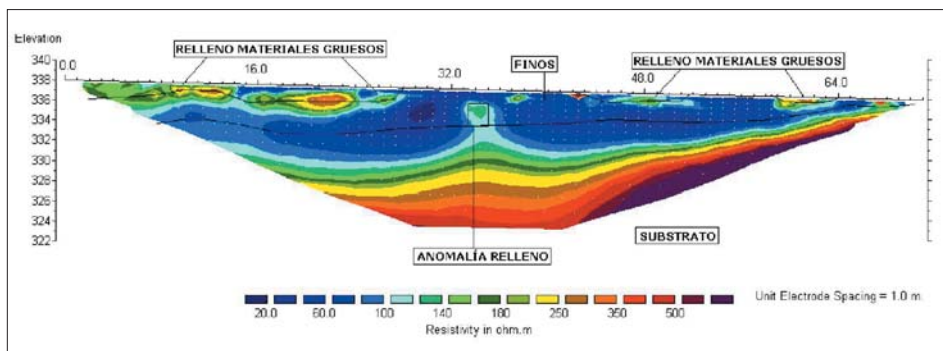


Figura 6. - Identificación de lindano.

En el primer caso (*Figura 5*) se trataba de identificar con la prospección geofísica la presencia y extensión de la pluma de contaminación por hidrocarburos al descubrirse en las proximidades manchas de alquitranes. La utilización de estos terrenos, unas décadas antes, como zonas de incontroladas vertido, hizo pensar que pudiera haber hidrocarburos bajo superficie. La atribución de las anomalías a hidrocarburos se resolvió con unas escasas catas de comprobación (ver *Foto 1*) en los puntos caracterizados con valores más altos de resistividad.

El carácter homogéneo y conductor de los materiales limosos y arcillosos de los dos ejemplos facilita que los rellenos de hidrocarburos y de lindano se manifiesten en forma de anomalías resistivas.

Por lo que respecta a la contaminación por lindano, a finales de la década de 1950, se comenzaron a utilizar como pesticidas los productos organoclorados. Uno de los más utilizados, el lindano, se empleó en agricultura, veterinaria, e incluso en el ámbito de la salud humana al tratarse de un insecticida de amplio espectro cuya toxicidad ha sido hoy día su comprobada, y está siendo prohibido en varios países.

Desde el punto de vista ambiental, el lindano se biodegrada lentamente y es muy es-

table en condiciones ambientales normales, necesitándose muchos años para que desaparezca completamente. A pesar de todo esto, durante muchos años no se han tomado en serio los peligros que podía conllevar su uso y en muchos lugares, entre ellos el País Vasco, ha sido vertido al medio ambiente sin ningún tipo de control, lo que incrementa la dificultad de solucionar el problema pues todavía no existe un proceso viable para destruir con seguridad el lindano mezclado con tierra y otros residuos.



Foto 1.- Alquitrán enterrado.

De entre las soluciones que podrían darse a los suelos contaminados destaca la incineración, la única que cumple las condiciones establecidas por las instituciones internacionales, pero al tratarse de grandes cantidades de tierra, su costo es excesivo.

Una mejora dentro de la línea de tratamiento podría ser reducir al mínimo el volumen de tierra mezclada. Mediante un análisis previo del terreno con tomografía eléctrica se pueden delimitar los terrenos contaminados y, al mismo tiempo, no mezclarlos mediante la ejecución indiscriminada de catas.

En el segundo caso que se expone en este apartado (*Fig. 6*) se puede observar un terreno en el que se pretendían localizar posibles enterramientos de lindano. El carácter homogéneo y conductor de los limos entre los que se enterraron fue una ventaja a la hora de identificar anomalías resistivas correspondientes a acumulaciones de este material. La comprobación del origen de la anomalía central del perfil con una cata fue el paso previo a la ejecución de varios perfiles en el terreno a investigar para delimitar la extensión de esos vertidos.

Si hay que eliminar ese material de esa zona ya se sabe dónde está, qué extensión ocupa, hasta qué profundidad se encuentra y, en definitiva, qué volumen representa. La eliminación del mismo con ese conocimiento previo favorece el no tener que extraer más material que el contaminado.

Valoración de resultados

Las actuaciones medioambientales sobre el terreno como las que aquí se han comentado muchas veces son *a ciegas*, esto es, sin conocimiento exacto de lo que hay por debajo de superficie o, cuando menos, con datos de sondeos que, si bien son muy exactos

y precisos, tienen un carácter muy puntual. Cuando ocurre esta situación, es decir, que sólo se dispone de datos puntuales de sondeos, sigue desconociéndose lo que existe en el tramo comprendido entre sondeos próximos. En definitiva, que es muy infrecuente tener un conocimiento del subsuelo de forma continua lo que muchas veces convierte en arriesgadas las actuaciones previas a una descontaminación: mala definición y previsión del volumen de material a retirar, mezcla de materiales contaminados con no contaminados, etc.

Según lo visto en los ejemplos antes comentados, la prospección geofísica del subsuelo por diversos métodos y, concretamente, mediante perfiles continuos a partir de la tomografía eléctrica, se muestra como una importante herramienta para obtener una visión de las características presentes por debajo de superficie de un manera rápida, no destructiva y económica (Aracil, 2002), no sólo por los presupuestos poco relevantes que se manejan en ese tipo de campañas sino, fundamentalmente, por los gastos innecesarios y elevados que pueden provocar las sorpresas no previstas o, al menos, no intuidas.

Entre las ventajas de realizar estudios previos mediante tomografía eléctrica destaca que se puede reducir drásticamente la ejecución de sondeos y catas y, con ello, los presupuestos de investigación, ya que no se destinará la ejecución de los mismos al conocimiento de las características de las formaciones superficiales o de las plumas de contaminación sino a la comprobación de las interpretaciones previamente realizadas. Esta ventaja también redundará en una menor alteración de los materiales y en una menor mezcla de los mismos al actuar sobre ellos sólo de forma puntual y reducida.

Bibliografía

- ARACIL, E. (2002): **La tomografía eléctrica como técnica versátil aplicable a la obra civil.** En: *IV Jornadas de Geotecnia. Vías de Comunicación. Burgos, 9-10 de Mayo de 2002. Servicio Publicaciones Escuela Politécnica Superior de Universidad de Burgos.*
- ARACIL, E.; MARURI, U.; PORRES, J.A.; ESPINOSA, A.B. (2002): **La tomografía eléctrica: Una herramienta al Servicio de la obra pública.** *Rock Máquina, n° 76, 30-34 pp.*
- DAHLIN, T., LOKE, M.H. (1998): **Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling.** *Journal of Applied Geophysics, 38, 237-249 pp.*
- FLINT, R.C., JACKSON, P.D., MCCANN, D.M. (1999): **Geophysical imaging inside masonry structures.** *NDT&E International, 32, 469-479 pp.*
- 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*
- ORELLANA, E. 1982. **Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua.** 2ª ed. Madrid. Paraninfo. Vol.1.
- RITZ, M., PARISOT, J-C., DIOUF, S., BEAUVAIS, A., DIONE, F., NIANG, M.: **Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa.** *Journal of Applied Geophysics, 41, 335-344 pp.*