

Caracterización geoambiental de balsas de lodos mineros mediante tomografía eléctrica

Geoenvironmental characterization of mine ponds by means of electrical resistivity tomography

D. Gómez Ortiz, T. Martín Crespo, S. Martín Velázquez, F.J. Lillo, y C. de Ignacio

Area de Geología, Departamento de Biología y Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Madrid)
david.gomez@urjc.es, tomas.martin@urjc.es, silvia.martin@urjc.es, javier.lillo@urjc.es, cristina.deignacio@urjc.es

ABSTRACT

The mining of copper from sulphide ores, besides the metal production, generates large amounts of mine tailings that are deposited, e.g. in impoundments. Furthermore, due to natural leaching from these impoundments, contamination of the environment close to the deposits often occurs. In order to characterize the internal structure and groundwater flow of abandoned mine ponds in the Iberian Pyritic Belt, an electrical resistivity tomography study has been carried out. Two different mine ponds have been studied: the Monte Romero mine pond reveals a homogeneous internal structure with a maximum infilling thickness of about 4.5 metres; the La Nava mine pond has a more heterogeneous internal structure with an infilling thickness ranging from 15 to 20 metres. In both cases, the resistivity contrast between the infilling and the shales constituting the base of the pond is high enough to clearly define the bottom pond boundary. Whereas the Monte Romero mine pond is nearly fully saturated in water, the La Nava one shows a low resistivity area that defines the groundwater flow scheme inside the pond. The low resistivity values (lower than 5 ohm · m) obtained for the mine pond infilling are explained by the high concentration of pyrite in the tailings and the occurrence of acidic waters. No metal rich water fluxes outside the pond have been observed, indicating a good isolation of the two studied mine ponds.

Key words: mine ponds, electrical resistivity tomography, Iberian Pyritic Belt, Huelva

Geogaceta, 42 (2007), 47-50
ISSN: 0213683X

Introducción

Las balsas mineras constituyen lugares de acumulación de los materiales derivados de los procesos de metalurgia extractiva de las menas metálicas. El tratamiento clásico de las minerales sulfuros de Cu, Pb, o Zn, pasa por su molienda a fracción fina, y posterior tratamiento en una planta de flotación donde las partículas sin interés económico o no deseables (p.e. pirita, arsenopirita) pasan a formar parte de la cola del proceso, que es transportada como un lodo acuoso a la balsa de lodos en la que decanta. Así, una balsa de lodos abandonada está constituida por materiales de granulometría fina-media que contienen, entre otras especies minerales, sulfuros de escaso interés económico que fueron en su día rechazados en la planta de flotación, además de una pequeña proporción de partículas de la mena metálica que no llegaron a ser aprovechadas a causa de una tecnología extractiva deficiente o mal desarrollada. Por ello, las balsas mineras constituyen un problema ambiental, al representar una acumulación y subsiguiente fuente de emisión de metales pesados y formación de drenaje ácido por oxidación

de los sulfuros. Los materiales de las balsas forman una pila de niveles sedimentarios de espesor no superior al centimétrico, diferenciados entre sí por pequeñas variaciones granulométricas y/o composicionales. Tales variaciones van a generar a su vez variaciones en la respuesta desde el punto de vista de comportamiento geofísico (por ejemplo, transmisión de radiación electromagnética), de tal forma que el análisis de dicha respuesta puede ser utilizado para identificar y localizar las variaciones en la naturaleza del material, además de variaciones en el contenido en agua. En el presente trabajo se utiliza la técnica de prospección geoelectrica para la delimitación y caracterización del relleno, así como a la detección de posibles filtraciones en el vaso, de dos balsas mineras localizadas en la Faja Pirítica Ibérica.

Objetivos

Los objetivos planteados en este trabajo son:

- ▶ Determinar la distribución vertical y horizontal de los diferentes materiales.
- ▶ Establecer la morfología del vaso de las balsas.

- ▶ Identificar la presencia de agua sub-superficial, y posibles flujos internos y filtraciones en el vaso de las balsas.

Metodología

La tomografía eléctrica utiliza la medida de las resistividades de los materiales geológicos subsuperficiales para determinar su espesor y profundidad (Telford *et al.*, 1990; Reynolds, 1997; entre otros). Se pueden usar diferentes configuraciones de electrodos, dispuestos a lo largo de una línea con un espaciado constante, de tal manera que cuando las medidas de resistividad se realizan entre electrodos próximos, la profundidad de investigación es pequeña, pero cuando se realiza entre electrodos muy separados, la profundidad de investigación es mayor. De esta forma se obtiene un perfil bidimensional de los valores de resistividad según una malla uniforme. El espaciado entre electrodos también condiciona la resolución y la profundidad de investigación. Si el espaciado es pequeño, la profundidad de penetración disminuye y la resolución de los datos aumenta.

Los valores de resistividad obtenidos en la prospección eléctrica son interpreta-

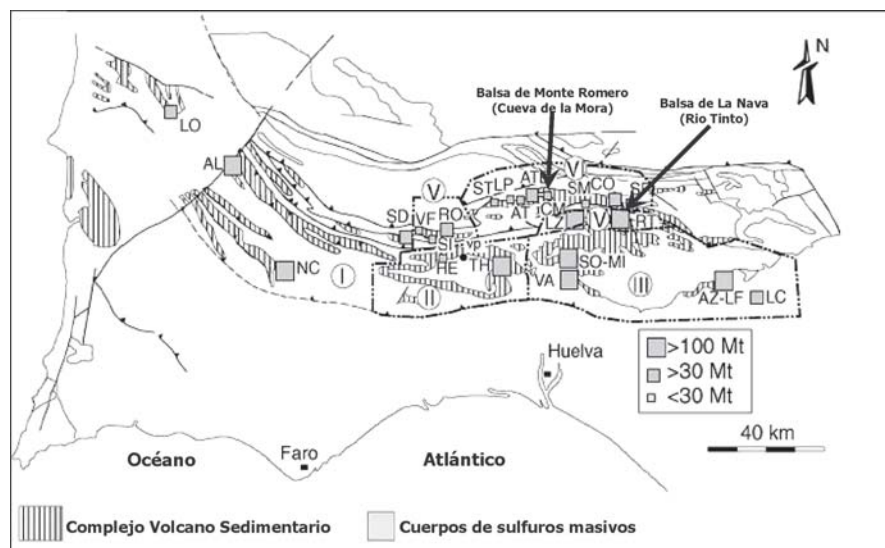


Fig. 1.- Localización de los distintos dominios metalogénicos y de los depósitos más importantes de sulfuros masivos de la Faja Pirítica. Modificada de Tornos (2006). Dominios metalogénicos: I: Dominio Oeste, II: Dominio de Puebla de Guzmán, III: Dominio de Sotiel-Aznalcóllar, IV: Dominio de Río Tinto, V: Dominio de Paymogo, VI: Dominio Norte. Depósitos: AL: Aljustrel, AT: Aguas Teñidas, ATE: Aguas Teñidas Este, AZ: Aznalcóllar, CM: Cueva de la Mora, CO: Concepción, HE: Herrerías, LF: Los Frailes, LC: Las Cruces, LO: Lousal, LP: Lomero-Poyatos, LZ: La Zarza, MI: Migollas, NC: Neves Corvo, RT: Río Tinto, SI: Silos, RO: Romanera, SD: Sao Domingos, SO: Sotiel, SM: San Miguel, SP: San Platón, ST: San Telmo, TH: Tharsis, VA: Valverde, VF: Vuelta Falsa, VP: Virgen de la Peña.

Fig. 1.- Location of the different metallogenic domains and major massive sulfide deposits from the Iberian Pyritic Belt. Modified from Tornos (2006). Metallogenic Domains: I: Western Domain, II: Puebla de Guzmán Domain, III: Sotiel-Aznalcóllar Domain, IV: Río Tinto Domain, V: Paymogo Domain, VI: Northern Domain. Ore Deposits: AL: Aljustrel, AT: Aguas Teñidas, ATE: Aguas Teñidas Este, AZ: Aznalcóllar, CM: Cueva de la Mora, CO: Concepción, HE: Herrerías, LF: Los Frailes, LC: Las Cruces, LO: Lousal, LP: Lomero-Poyatos, LZ: La Zarza, MI: Migollas, NC: Neves Corvo, RT: Río Tinto, SI: Silos, RO: Romanera, SD: Sao Domingos, SO: Sotiel, SM: San Miguel, SP: San Platón, ST: San Telmo, TH: Tharsis, VA: Valverde, VF: Vuelta Falsa, VP: Virgen de la Peña.

dos mediante un software específico que permite determinar la geometría y los espesores de las unidades con diferentes resistividades mediante un proceso iterativo de inversión. Dicho proceso es rápido y permite obtener resultados con bastante fiabilidad si se dispone de información geológica previa acerca de la naturaleza de los materiales en la zona o de información procedente de sondeos u otra técnica geofísica

Este método de prospección es especialmente útil en la determinación de agua en el subsuelo, debido al carácter poco resistivo de la misma cuando su contenido en iones es moderado o alto, así como en la detección de plumas contaminantes. Otra aplicación habitual es la localización de cavidades en el subsuelo, puesto que los huecos rellenos de aire presentan una resistividad mucho mayor que el material que lo rodea (Gómez-Ortiz *et al.*, en prensa).

En el caso de las balsas mineras, existe un buen contraste de resistividad entre los materiales que constituyen el relleno de la balsa y los que definen la base de la misma, lo que permite obtener buenos resulta-

dos acerca de la geometría y espesores del relleno. Se ha empleado con buenos resultados en el estudio de balsas mineras del distrito de Cartagena (Aracil *et al.*, 2006; Martínez Pagán, 2006).

En este trabajo se ha utilizado el equipo de tomografía eléctrica Syscal Junior Switch 48. De las diferentes configuraciones, se ha elegido la configuración Wenner-Schlumberger, puesto que presenta una buena relación entre resolución, tanto horizontal como vertical, y profundidad (p.ej. Sasaki, 1992). La longitud de los perfiles ha variado entre 70,5 y 235 m, con un espaciado entre electrodos entre 1,5 y 5 m. La profundidad máxima de penetración obtenida ha sido de 25 m. El software empleado en la obtención de los modelos de resistividades ha sido RES2DINV.

Objeto del estudio

La Faja Pirítica Ibérica alberga 82 minas (Fig. 1), tanto activas como inactivas, así como más de 38 yacimientos de sulfuros masivos o *stockworks*, con un ratio de 15.000-20.000 toneladas por superficie de afloramiento de Complejo Volcanosedi-

mentario (Tornos, 2006). Contiene el 22% de los cuerpos de sulfuros masivos volcánogénicos del mundo. Además de su gran tamaño, la mayoría de los yacimientos son ricos en pirita, excepto 11 de ellos que presentan cantidades importantes de Cu-Zn-Pb. Estos yacimientos están definidos por grupos de 2 a 6 grandes lentejones individuales de sulfuros masivos en un área de pocos kilómetros cuadrados, como ocurre en los depósitos gigantes de Neves Corvo, Aljustrel, Tharsis, Sotiel-Migollas, Riotinto y Aznalcóllar-Los Frailes. En general, se puede hablar de dos tipos principales de materiales encajantes de estas mineralizaciones: pizarras y materiales volcánicos (Tornos, 2006).

Las balsas de lodos objeto de este estudio se localizan en las explotaciones mineras de dos mineralizaciones del distrito de Riotinto en la provincia de Huelva: dos balsas en el paraje de Monte Romero y una balsa en la zona de La Nava. En todas ellas se han acumulado lodos finos por flotación en presas (Figs. 1 y 2).

Las dos balsas de Monte Romero están localizadas en las proximidades de Cueva de la Mora y se sitúan sobre un sustrato de pizarras carboníferas. Los lodos proceden de una explotación minera de menas de blenda y galena, actualmente abandonada, y tienen una composición silíceas con contenidos variables de pirita (Blanco *et al.*, 2003). Tienen unas dimensiones en planta de 125 m x 80 m y 90 m x 70 m aproximadamente, y en ambos casos la altura es de unos 6 m. En la más grande, los datos sobre el nivel piezométrico indican que su profundidad varía desde los 0,5 m en invierno a casi 3 m en la época estival (Blanco *et al.*, 2003). En la época en la que se realizó la campaña de campo tenía agua embalsada en la zona septentrional, situándose el nivel freático a 0,5 m en la traza de la prospección.

La balsa abandonada de La Nava, en las proximidades de Minas de Riotinto, se sitúa en su mayor extensión sobre lavas y tobas básicas carboníferas aunque en la parte más meridional aflora una sucesión de pizarras, grauvacas y cuarcitas devónicas. Este depósito estuvo asociado a la extracción de pirita, cobre y oro, entre otros, del Distrito Minero de Riotinto. Tiene unas dimensiones 500 m x 300 m x 15 m.

Resultados

Balsa de Monte Romero

Se realizaron 4 perfiles de tomografía eléctrica de los que se ha escogido uno de ellos como el más representativo (Fig. 3). Su traza es paralela al dique de la balsa grande y tiene una longitud total de 141 m,

con un espaciado entre electrodos de 3 m. La profundidad máxima alcanzada es de 12 m. El error mínimo alcanzado durante el proceso de inversión fue de un 11,9% en la tercera iteración. Se aprecia la existencia de dos unidades con resistividades muy diferentes: una unidad superior (unidad A), que varía entre 1 y 100 $\text{ohm} \cdot \text{m}$ aproximadamente, que se extiende entre los 12 y 135 m del perfil, y una inferior (unidad B) de unos 100 hasta 2066 $\text{ohm} \cdot \text{m}$. La unidad A presenta una geometría en forma de artesa, con unos límites laterales que muestran una inclinación alta en la parte superficial pero que va disminuyendo a medida que la profundidad es mayor, y una base plana y muy constante hasta una profundidad media de unos 4,5 m.

Balsa de La Nava

Se realizaron 2 perfiles de tomografía eléctrica perpendiculares al dique de la balsa. El más representativo (Fig. 3) tiene una longitud total de 235 m, con un espaciado entre electrodos de 5 m. La profundidad máxima alcanzada es de 25 m. El error mínimo alcanzado durante el proceso de inversión fue de un 8,9% en la sexta iteración. Al igual que en el caso anterior, se aprecia la existencia de dos unidades con resistividades muy diferentes: una unidad superior (unidad A), que varía entre 1 y 50 $\text{ohm} \cdot \text{m}$ aproximadamente, presente a lo largo de todo el perfil, y una inferior (unidad B) de unos 50 hasta 650 $\text{ohm} \cdot \text{m}$. En este caso, la unidad A no es tan homogénea como en el caso de la balsa de Monte Romero, sino que se diferencian a su vez distintos niveles. Desde el inicio del perfil hasta los 185 m aproximadamente hay una subunidad (A1) de resistividades entre unos 10 y 50 $\text{ohm} \cdot \text{m}$, que se extiende desde la superficie hasta unos 10 m de profundidad y que puede correlacionarse con los materiales aflorantes en la superficie de la balsa. Por debajo de los 10 m y hasta los 20 m aproximadamente hay una subunidad (A2) donde la resistividad disminuye desde unos 20 $\text{ohm} \cdot \text{m}$ al inicio del perfil hasta menos de 5 $\text{ohm} \cdot \text{m}$ en la parte final. Es muy notable la disminución de resistividad observada a partir del metro 80 del perfil hasta el final, donde se alcanzan los mínimos de resistividad absolutos de todo el perfil. De nuevo, la unidad A ha sido interpretada como el relleno de la balsa, dentro del cual se reconoce una parte superior algo más resistiva (A1) y otra inferior de menor resistividad (A2), en concordancia con la presencia de dos niveles distintos fácilmente diferenciables en el campo a partir de la observación del relleno presente sobre el antiguo dique de

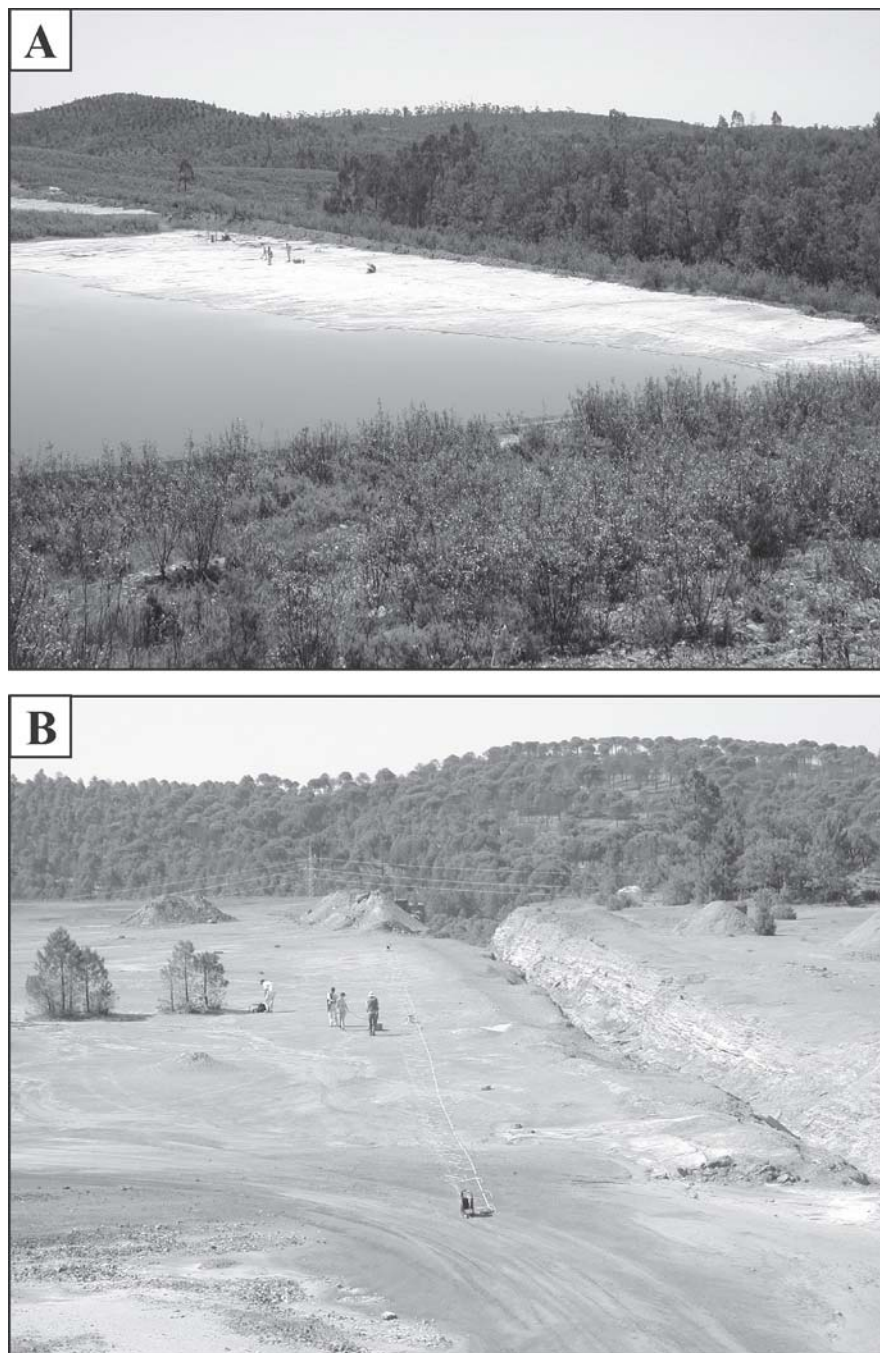


Fig. 2.- A. Balsa del paraje de Monte Romero, en la zona minera de Cueva de la Mora. B. Balsa de la zona de La Nava, en las proximidades de Minas de Riotinto.

Fig. 2.- A. Mine pond located in Monte Romero zone, belonging to the Cueva de la Mora mine. B. Mine pond located in La Nava zone, close to Minas de Riotinto.

la balsa. El relleno de la balsa no es homogéneo sino que pueden delimitarse dos zonas de diferente espesor, una de unos 20 m desde el inicio hasta el metro 135 del perfil donde se aprecia un pequeño escalón que hace disminuir el relleno hasta unos 15 m desde ese punto hasta el final del perfil. La unidad B está constituida de nuevo por pizarras con resistividades más elevadas que las de la unidad A y corresponde a los materiales de la base de la balsa.

Interpretación y conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de los perfiles de tomografía eléctrica muestran algunas similitudes en las dos balsas estudiadas. En ambas pueden distinguirse dos grandes unidades, una superior de resistividades bajas (A) y otra inferior de resistividades mayores (B). En el caso de la balsa de Monte Romero, la unidad A constituye el relleno de la balsa, formado por materiales limo-arcillosos. El contenido

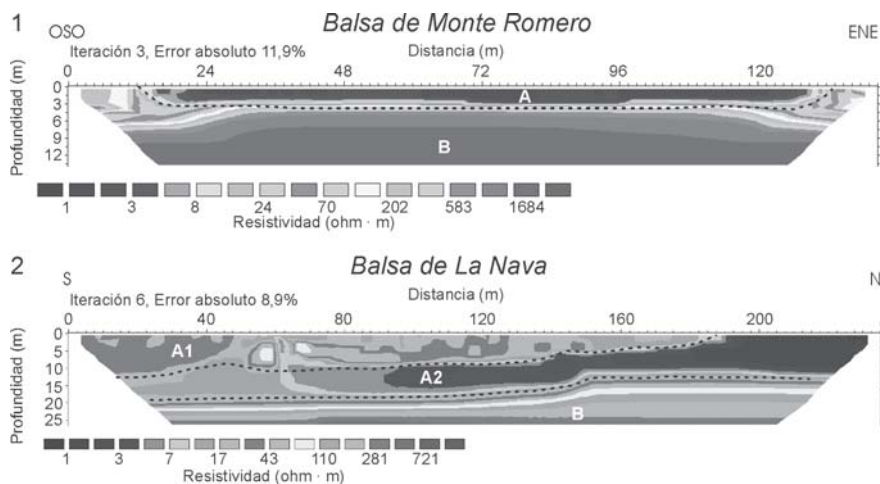


Fig. 3.- Perfiles de tomografía eléctrica: 1) Balsa de Monte Romero, 2) Balsa de La Nava. Se han dibujado los límites entre las principales unidades de resistividad diferenciadas.

Fig. 3.- Electrical resistivity tomography profiles: 1) Monte Romero mine pond, 2) La Nava mine pond. The boundaries between the different resistivity units are shown.

elevado en agua y pirita de estos materiales justifica los valores tan bajos de resistividad obtenidos (la mayor parte de la unidad muestra resistividades inferiores a 5 $\text{ohm} \cdot \text{m}$). A partir de observaciones in situ se pudo comprobar que el nivel freático estaba situado a 0,5 m de profundidad. El máximo espesor de relleno de la balsa puede estimarse a partir de los datos en unos 4,5 m siendo éste bastante homogéneo. La unidad B está constituida por pizarras con resistividades muy superiores a la unidad A o de relleno. Así, las pizarras constituyen los materiales sobre los cuales se han ido depositando los lodos de la balsa. El hecho de que sus resistividades sean siempre muy altas y que no se observen variaciones importantes en la misma a lo largo del perfil indica que no existe ningún tipo de filtración de las aguas de la balsa en dichos materiales.

Respecto a la balsa de La Nava, la unidad A también se interpreta como el relleno de la misma pero existe una mayor complejidad al distinguirse dos niveles de relleno diferenciados (A1 y A2) por sus diferentes resistividades. Dentro de la subunidad A2, las bajas resistividades (menos de 5 $\text{ohm} \cdot \text{m}$) mostradas entre el metro 65 y el final del perfil se han interpretado como la presencia de un flujo de agua subterráneo, que tendría su zona de recarga en el extremo final del perfil, profundizaría hacia el interior de la balsa y ascendería en el metro 65 del perfil posiblemente por un efecto barrera debido a una de las chimeneas construidas en el interior de la balsa. En cuanto a la unidad inferior B, y como sucede en la balsa de Monte Romero, es muy homogénea en cuanto a sus resistividades, lo que parece indicar que no existen filtraciones de agua

en la base de la balsa. Es más, el flujo de agua que se interpreta como profundizando en el final del perfil y ascendiendo a superficie en el metro 65 del mismo está perfectamente confinado entre los materiales del relleno y la base de la balsa.

Respecto a los valores de resistividad obtenidos, podemos decir que para las pizarras que constituyen la base de las balsas las resistividades varían entre 50 hasta más de 2000 $\text{ohm} \cdot \text{m}$, lo que se corresponde bien con valores publicados correspondientes a pizarras alteradas y frescas respectivamente (p.ej. Reynolds, 1997). En cuanto al relleno de las balsas, los materiales limo-arcillosos tienen valores de resistividad medios de 50 a 150 $\text{ohm} \cdot \text{m}$ (p.ej. Reynolds, 1997) pero teniendo en cuenta su elevado contenido en agua y en sulfuros (la resistividad de la pirita varía entre $2,9 \cdot 10^{-5}$ y 1,5 $\text{ohm} \cdot \text{m}$) justificaría los valores tan bajos de resistividad observados en algunas zonas de las balsas de aproximadamente 1 $\text{ohm} \cdot \text{m}$.

Como conclusiones generales podemos citar:

- ▶ El método de prospección mediante tomografía eléctrica se ha mostrado como una herramienta muy útil para el estudio de la estructura interna de balsas mineras abandonadas.
- ▶ La configuración Wenner-Schlumberger ha mostrado una buena relación entre resolución horizontal, vertical y profundidad de prospección, siendo muy adecuada para el objetivo propuesto en este estudio.
- ▶ Los datos de tomografía eléctrica permiten determinar de manera precisa la geometría de la base de las balsas mineras, debido al elevado

contraste de resistividad que existe entre los materiales del relleno y los de la base de la balsa.

- ▶ Diferentes niveles de relleno de la balsa muestran valores de resistividad distintos que permiten también obtener información acerca de la homogeneidad o heterogeneidad de dicho relleno.
- ▶ Las bajas resistividades asociadas al agua subterránea permiten también diferenciar flujos de agua subsuperficial dentro de las balsas, identificando fácilmente las zonas de recarga y descarga.
- ▶ Este método ha permitido además evaluar el estado de impermeabilización de la base de las balsas respecto a posibles filtraciones del agua contenida en el relleno de las balsas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del proyecto URJC-RNT-063-1 cofinanciado por la Comunidad de Madrid y la Universidad Rey Juan Carlos.

Referencias

- Aracil Ávila, E., Porres Benito, J.A., Faz Cano, A., Matínez Pagán, P., Maruri Brouard, U. y Vallés Iriso, J. (2006). En: *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. www.ubu.es/investig/aulavirtual/Posters/Balsas.pdf.
- Blanco, A., Lloret, A., Carrera, J., Saaltink, M.W., Acero, P., Ayora, C. y Nieto, J.M. (2003). En: *Jornadas Luso-Españolas sobre Aguas Subterráneas en el Sur de la Península Ibérica Faro*. Comunicaciones, 347-358.
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Lillo, J., López, I., Carreño, F., Martín-González, F., Herrera, R. y De Pablo, M.A. (en prensa). *Journal of Applied Geophysics*.
- Martínez Pagán, P. (2006). *Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Cartagena, 476 pp.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, 796 p.
- Sasaki, Y. (1992). *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 770 p.
- Tornos, F. (2006). *Ore Geology Reviews*, 28, 259-307.