

Utilización de la tomografía eléctrica para la cubicación de reservas mineras. Aplicación a un yacimiento de ofitas en la Depresión del Guadalquivir (Jaén, Sur de España)

Electrical Resistivity Imaging as a tool for assessing mining reserves. Application to an ophite rock body in the Guadalquivir Depression (Jaén, Southern Spain)

Javier Rey¹, Julián Martínez², José Ángel Mesa³, Mari Carmen Hidalgo¹ y José Benavente⁴

¹ Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén), España. jrey@ujaen.es, chidalgo@ujaen.es

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén), España. jmartine@ujaen.es

³ JI.INTEC. Ctra. de Madrid, Km 332, nº 13. Centro Tecnológico Nuevo Jaén, 23009 Jaén, España. info@jjintec.com

⁴ Instituto del Agua, Universidad de Granada. C/ Ramón y Cajal 4, 18071 Granada, España. jbenaven@ugr.es

ABSTRACT

Indirect prospecting techniques, such as geophysical surveys, are valuable tools in order to study the exploitation viability of mining deposits. In this work we aim to check the feasibility of one of these techniques, the Electrical Resistivity Imaging (ERI), to the assessment and quantification of ophitic rock bodies. These materials appear within olistolite masses included in a marly formation of Miocene age of the Guadalquivir Basin (Jaén province). In the profiles it is observed that the ophites have a relatively high electrical resistivity, in contrast with that of the clayey or marly lithologies that surround them. This contrast helps in deducing the morphology and the in-depth extension of the rock bodies. There are another facies -ophitic blocks of small size surrounded by a clayey matrix- that is characterized by intermediate resistivities. In our study case, we are able to deduce, based on the ERI results, a limited continuity of the rock body with the depth. Boreholes drilled after our geophysical study allow the assessment of the information obtained.

Key-words: Electrical resistivity imaging, Guadalquivir Depression, ophites, calculation of reserves, mining.

RESUMEN

Las técnicas de investigación indirectas, tales como la prospección geofísica, son herramientas muy útiles a la hora de conocer la viabilidad de explotación de un yacimiento minero. En este trabajo se pretende conocer la eficacia de una de estas técnicas, la tomografía eléctrica, para el diagnóstico y cubicación de cuerpos de naturaleza ofítica. Estos materiales se ubican en niveles olistolíticos intercalados en las margas del Mioceno de la Depresión del Guadalquivir (provincia de Jaén). En los perfiles realizados se observa como las ofitas ofrecen una resistividad eléctrica alta en comparación con las litologías margosas o arcillosas que las rodean. Este contraste facilita la deducción de la morfología y enraizamiento de estos cuerpos en profundidad. Existen unas facies intermedias, bloques ofíticos de pequeño tamaño envueltos por una matriz arcillosa, que se identifican por resistividades intermedias. En el caso que nos ocupa, a partir de la tomografía eléctrica, se deduce una escasa continuidad del cuerpo rocoso prospectado en profundidad. Los sondeos mecánicos posteriores permiten verificar esta información.

Palabras clave: Tomografía eléctrica, depresión del Guadalquivir, ofitas, cálculo de reservas, minería.

Geogaceta, 58 (2015), 127-130
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 17 de febrero de 2015
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

Introducción

En este trabajo se pretende analizar la eficacia de métodos de prospección eléctrica, en concreto la tomografía eléctrica, como herramienta complementaria en los estudios estratigráficos o de los sondeos mecánicos, para analizar la estructura interna de cuerpos geológicos. Estas técnicas indirectas son económicas y pueden ofrecer secciones geológicas del yacimiento, en las

que se incorporen y correlacionen los datos directos de campo (Rey *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2014).

El ejemplo seleccionado se ubica en la provincia de Jaén, al noroeste de Mancha Real (Fig. 1A), en el paraje conocido como Cerro de San Cristóbal (Fig. 1B). El estudio se centra en un bloque "olistolítico" de ofitas, con el objetivo de analizar su disposición geológica y enraizamiento en la masa olistostrómica que lo engloba, para compro-

bar su posible uso industrial. Hay que recordar que las propiedades mecánicas hacen que estas litologías tengan mucho interés como áridos para la capa de rodadura en carreteras y para balasto de vías de ferrocarril.

Las técnicas geofísicas se utilizarán para determinar la morfología y tamaño de estas masas, lo que será indispensable para determinar el cálculo de reservas, y por tanto, la rentabilidad del yacimiento.

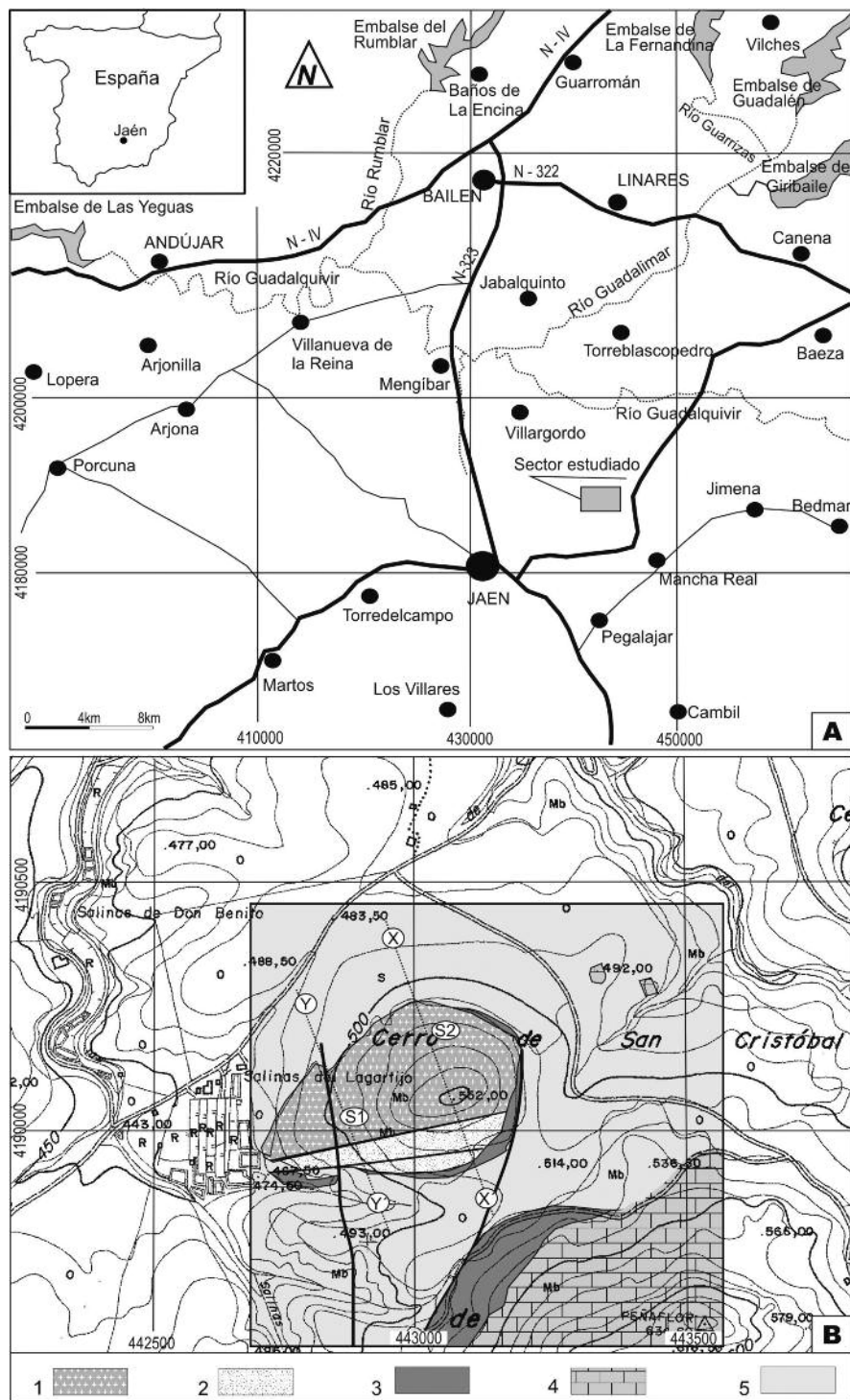


Fig. 1.- Situación del sector estudiado (A) y cartografía geológica de detalle (B). X-X' y Y-Y': localización de los perfiles de tomografía eléctrica. S1 y S2: localización de los sondeos mecánicos. Leyenda: 1.- Ofitas, 2.- Bloques ofíticos y arcillas, 3.- Facies Keuper, 4.- Carbonatos (Fm. Zamoranos), 5.- Margas cenozoicas.

Fig. 1.- Location of the study area (A), and geological map (B). X-X' and Y-Y': situation of the ERI profiles. S1 and S2: situation of the boreholes. Key: 1.- Ophites, 2.- Ophitic blocks and clay, 3.- Keuper facies, 4.- Carbonates (Zamoranos Fm.), 5.- Cenozoic marls.

Contexto geológico

El área de estudio se localiza en la Depresión del Guadalquivir (Vera, 2004). En el sector estudiado aflora la Unidad Olistos-

trómica de edad Langhiense superior-Serravaliense basal (Roldán García *et al.*, 1991). Se trata de una mezcla caótica de materiales de diversa naturaleza y edad. Afloran arcillas y margas de colores variados, arenis-

cas rojas, yesos y dolomías, que se reconocen claramente como procedentes de unidades triásicas. También aparecen margas y margocalizas del Cretácico inferior y superior, Paleógeno y Mioceno inferior y parte del medio.

Los afloramientos de ofitas del Cerro de San Cristóbal están relacionados con los yesos y margas yesíferas del Triásico superior, que caracterizan la facies Keuper, muy deformados tectónicamente (Fig. 1B). En las series estratigráficas del Triás Keuper se ha descrito una unidad carbonatada atribuida al Noriense (Pérez-López y Morata-Cespedes, 1993; Pérez-López y Sanz de Galdeano, 1994) y definida como Formación Zamoranos. Esta formación está constituida por dos tramos carbonatados con una intercalación detrítica. Dentro del miembro Detrítico-Ferruginoso aparecen conglomerados con cantos de origen basáltico y textura porfídica. Estos cantos se interpretan como el resultado de la erosión de una colada previa. Por tanto, el depósito de la Formación Zamoranos estaría ligado temporalmente con las intrusiones de rocas subvolcánicas, es decir, con las ofitas (Pérez-López y Morata-Cespedes, 1993). En este sentido, al sur del afloramiento estudiado, en el cerro de Peñafior, afloran las calizas y dolomías de la Fm. Zamoranos (Fig. 1B).

Material y métodos

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo, que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo (la resistividad) a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno (Telford *et al.*, 1990; Storz *et al.*, 2000). El diferente comportamiento geoelectrico permite obtener perfiles 2D e imágenes 3D, por lo que se trata de una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaces para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo (Sasaki, 1992; Storz *et al.*, 2000; Rey *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2014). El rango de estudio puede variar desde algunos metros hasta centenares de metros en profundidad.

El método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de perfiles, con una separación determinada que viene condicionada por el grado de resolución, profundidad y los objetivos que se pretendan cubrir, de modo que a menor sepa-

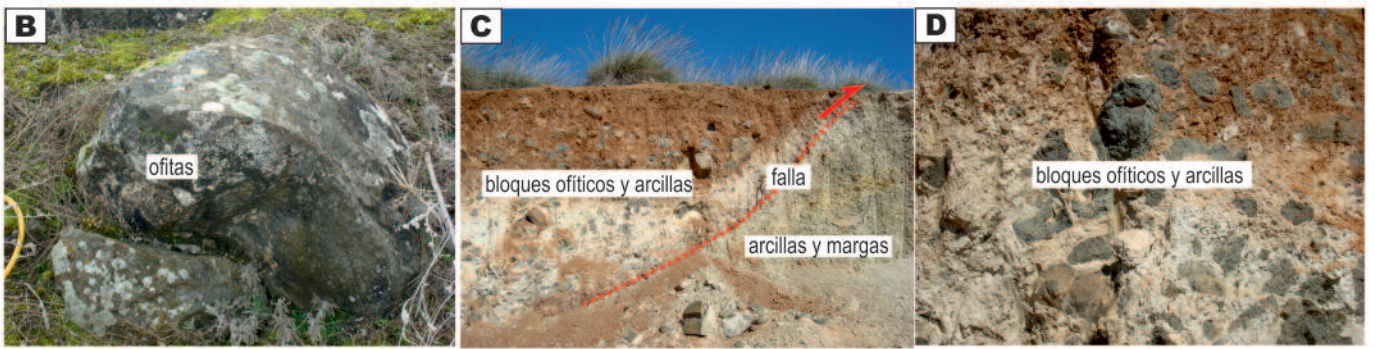
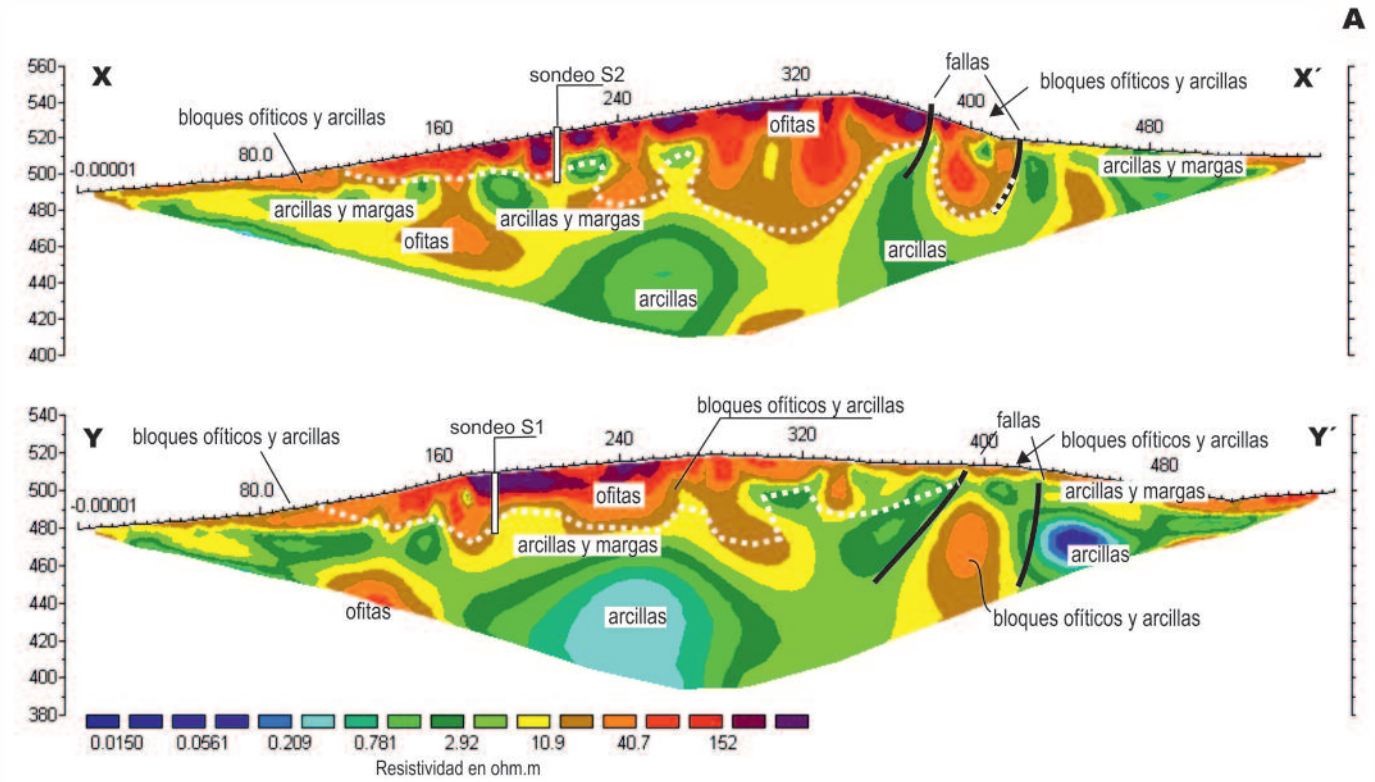


Fig. 2.- Interpretación de los perfiles de tomografía eléctrica realizados (X-X' e Y-Y'). La localización de los mismos aparece en la figura 1A. Se incluyen fotos tomadas en los afloramientos: afloramiento de ofitas (B); contacto entre los bloques ofíticos y margas cenozoicas (C); detalle de los bloques ofíticos (D). (Ver figura en color en la web).

Fig. 2. Interpretation of ERI profiles. The position of each profile is indicated in figure 1A. Pictures taken in the outcrops are included: ophite outcrop (B), ophitic blocks and Cenozoic marls contact (C); ophitic blocks (D). (See colour figure on the web).

ración mayor resolución y a mayor separación mayor profundidad. Los electrodos son conectados a un equipo de medida, y mediante un programa secuencial específico para cada objetivo, se seleccionan cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición. Cada uno de estos cuadrupolos hace una medida de resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo, cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadrupolo y de la separación entre electrodos que lo conforman.

El perfil de tomografía eléctrica es, en definitiva, una sección del terreno que refleja la distribución de valores de resistivi-

dad a distintas profundidades, correspondientes a diferentes capas de investigación. Los perfiles muestran valores de resistividad representados por colores para una mejor y más fácil observación de las variaciones verticales y horizontales, y se acompañan con una carta de distribución de colores que es característica y específica de cada perfil. Esta gama de colores representa los distintos valores de resistividad de las formaciones analizadas.

El equipo de tomografía eléctrica utilizado en este estudio es el modelo RESECS de la marca Deutsche Montan Technologie (DMT). Es un equipo multielectrodo con ordenador integrado capaz de gestionar hasta 960 electrodos. La fuente de energía es de

250 W, 2,5 A, que genera impulsos de 880 V V p-p. Ofrece transmisor, receptor y emisor de energía incorporados en el equipo, además de un procesador automático de resistividad aparente y cargabilidad. El equipo permite, durante la toma de medidas, el control de resistividad en tiempo real en 2D y 3D, así como el control de la curva de inyección de corriente y voltaje y el ajuste de tiempo de inyección.

Se han realizado dos perfiles de tomografía eléctrica (X-X' y Y-Y, Fig. 1B) Los dos se ha ejecutado con una configuración Wenner-Schlumberger y con una extensión de 555 m. La configuración elegida tiene un buen comportamiento y estabilidad ante cambios de resistividades, tanto verticales

como horizontales, por lo que resulta muy útil para la investigación de capas horizontales que pueden presentar cambios laterales de facies y/o estructuras verticalizadas. En los dos perfiles se han dispuesto 112 electrodos, con una separación interelectrónica de 5 metros. En total se han tomado 2806 puntos de medida en cada perfil. En la figura 2 se representan las dos pseudo-secciones del modelo de resistividad real con la topografía y las profundidades alcanzadas. Además se señala la posición de los dos sondeos mecánicos realizados.

Resultados y discusión

Las interpretaciones de los perfiles de tomografía eléctrica se han realizado mediante el *software* de interpretación RES2DINV de resistividad y polarización inducida para los dos tipos de configuraciones electrónicas empleadas. Este programa de cálculo se basa en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado, modificado con la técnica de optimización cuasi-Newton. El método de inversión divide el subsuelo en prismas rectangulares y determina los valores de resistividad para cada uno, minimizando la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados (Loke y Barker, 1996; Loke y Dahlin, 2002).

En el procesado de los datos de resistividad aparente se han realizado 5 iteraciones con un RMS inferior al 10%. Previamente se han eliminado los valores de campo erróneos mediante el exterminado del RES2INV.

En el perfil X-X' se diferencian dos grandes conjuntos (Fig. 2). El más superficial, de resistividades relativamente altas (entre 20 y 200 Ω .m), se interpreta como el conjunto ofítico (Fig. 2A). En este primer conjunto, tanto en la parte inferior como en el sector sureste (limitado por fracturas) se observan los valores más bajos (entre 20-50 Ω .m), lo que se relaciona con las facies de arcillas con bloques de ofitas (observadas en el afloramiento; Figs. 2B y 2C). Por otro lado, ocupando posiciones inferiores al bloque o por cambios laterales de facies, aparece un conjunto de bajas resistividades (entre 10 y 1 Ω .m) que se atribuyen a las facies arcillosas-margosas del terciario. En este segundo conjunto los valores más bajos de resistividad corresponderían a facies arcillosas del Keuper. El contacto entre las ofitas y las arcillas-margas es muy irregular. En cual-

quier caso, hay que llamar la atención sobre el escaso enraizamiento de las ofitas.

En el perfil Y-Y' también se diferencian los dos grandes conjuntos descritos en el perfil anterior (Fig. 2). El más superficial, de resistividades relativamente altas (entre 20 y 200 Ω .m), se interpreta como el conjunto ofítico. En éste podríamos realizar también la subdivisión señalada en el apartado anterior. Por otro lado, ocupando posiciones inferiores al bloque o por cambios laterales de facies, aparece un conjunto de bajas resistividades (entre 10 y 1 Ω .m) que se atribuyen a las facies arcillosas-margosas del terciario. En este segundo conjunto los valores más bajos de resistividad, en este caso inferiores a 0,2 Ω .m, corresponderían a facies arcillosas triásicas, probablemente saturadas en agua salobre. También para este perfil se deduce que el contacto entre las ofitas y las arcillas-margas es muy irregular, e igualmente un escaso enraizamiento de las ofitas.

Con posterioridad a la campaña de prospección geofísica se han realizado dos sondeos mecánicos de 20 m en las ofitas con el objetivo de conocer sus potencias (Fig. 2). Los datos directos confirman la correlación de los valores de resistividad elevada y las ofitas así como el escaso espesor de estas masas, inferior a los 20 m (17 m en S1 y 18 m en S2). Bajo las ofitas en ambos sondeos se cortan facies arcillosas.

Conclusiones

Al Noroeste de Mancha Real (Jaén), en el Cerro de San Cristóbal, afloran rocas básicas, de carácter ofítico, que constituyen una masa de la unidad Olistostromica. Las facies ofíticas aparecen formando bloques envueltos en una matriz arcillosa. En función de la proporción arcillosa, destacan zonas en las que las ofitas constituyen una masa uniforme frente a otras en la que estas litologías aparecen como cantos embebidos en una matriz arcillosa.

En los perfiles de tomografía eléctrica realizados se pueden diferenciar dos conjuntos, En los primeros metros (desde la parte superior) aparecen facies de resistividades relativamente altas (20-200 Ω .m). El conjunto de bloques de ofitas y arcillas se diferencia por ofrecer valores de resistividad en el rango 20-50 Ω .m, frente a los valores más altos de las ofitas superiores.

Por debajo se detecta una fuerte disminución de la resistividad en ambos perfiles,

con valores inferiores a 10-5 Ω .m, y que se correlacionan con las arcillas y margas del terciario. Los valores pueden ser extremadamente bajos (0,2 Ω .m), lo que se asocia a las facies Keuper saturadas en agua salobre. A partir de la tomografía eléctrica se deduce que el enraizamiento del bloque, aunque irregular, es muy escaso. Este hecho deberá tenerse presente en el cálculo de reservas.

Estos datos han sido confirmados por dos sondeos mecánicos posteriores. Es importante destacar que la tomografía eléctrica es un método geofísico indirecto que permite tener una visión preliminar de la geología del sector estudiado, que cumplimenta pero no sustituye a la información directa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Ofitas Jaén S.L. la autorización para la publicación de los datos de la campaña de investigación. Los autores agradecen también al Dr. Lluís Rivero y al revisor anónimo la lectura crítica del manuscrito.

Referencias

- Loke, M.H. y Barker, R.D. (1996). *Geophysical Prospecting* 44, 131-152.
- Loke, M.H. y Dahlin, T. (2002). *Journal of Applied Geophysics* 49, 149-162.
- Martínez, J., Rey, J., Hidalgo, C., Garrido, J. y Rojas, D. (2014). *International Journal of Mineral Processing* 133, 67-72
- Pérez-López, A. y Morata-Céspedes, D. (1993). *Geogaceta* 14, 60-63.
- Pérez-López, A. y Sanz de Galdeano, C. (1994). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 7, 141-153.
- Rey, J., Martínez, J. y Hidalgo, C. (2013). *Sedimentary Geology* 295, 27-37
- Roldán García, F.J., Luñani Moreno, E., Villalobos Megía, M. y Jerez Mir, L. (1991). *Mapa Geológico de España a escala 1.50.000, hoja nº 926 (Mengíbar) y memoria* (Plan MAGNA). ITGE, Madrid, 36 p.
- Sasaki, Y. (1992). *Geophysical Prospecting* 40, 453-464.
- Storz, H., Storz, W. y Jacobs, F. (2000). *Geophysical Prospecting* 48, 455-471.
- Telford, W.M., Geldart L.P. y Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 792 p.
- Vera, J.A. (2004). *Geología de España*, IGME-SGE, Madrid, 884 p.