

# Signatura de campos potenciales (gravedad y magnetismo) del yacimiento de Otero de Herreros (Segovia). Comparación con datos y modelos existentes

*Potential field signature (gravity and magnetism) of the Otero de Herreros deposit (Segovia). Comparison with existing data and models*

Roberto Jiménez Borrego<sup>1</sup>, Puy Ayarza Arribas<sup>1</sup>, Yolanda Sánchez Sánchez<sup>1</sup> y Óscar Fadón Loro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, USAL. Plaza de la Merced, s/n, 37008 Salamanca, España. [jd00697810@usal.es](mailto:jd00697810@usal.es), [puy@usal.es](mailto:puy@usal.es), [yolanda.ss@usal.es](mailto:yolanda.ss@usal.es)

<sup>2</sup> SIEMCALSA. Avenida Rodrigo Zamorano 6, 47151, Boecillo, Valladolid, España. [ofadon@siemcalsa.com](mailto:ofadon@siemcalsa.com)

## RESUMEN

Este trabajo presenta nuevos mapas de anomalía magnética y gravimétrica absoluta (Bouguer) del yacimiento polimetálico del Cerro de Almadenes (Otero de Herreros, Segovia). Los datos han sido adquiridos y procesados con equipamiento y técnicas modernas (eliminando todas las posibles fuentes de ruido), y los mapas obtenidos se han comparado con los mapas de anomalías ya existentes. La adquisición de datos detallados de campos potenciales proporciona nuevos criterios para controlar la geometría de las capas mineralizadas, restringiendo su potencia y profundidad, a través de la modelización directa en 2D de perfiles perpendiculares a las estructuras. Los resultados muestran que mientras que la anomalía magnética ayuda a constreñir la geometría de la capa M mineralizada, la anomalía gravimétrica puede indicar las zonas donde la mineralización está más concentrada. Este trabajo muestra que el avance metodológico e instrumental en las técnicas de adquisición de datos de campos potenciales da lugar a mapas de anomalías mejor constreñidas, que permiten una modelización más detallada de las mismas.

**Key-words:** Otero de Herreros Ore, polymetallic deposit, gravity anomaly, magnetic anomaly.

Geogaceta, 71 (2022), 31-34  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

El yacimiento del Cerro de Almadenes está situado en Otero de Herreros (provincia de Segovia). Se caracteriza por la existencia de una mineralización de sulfuros metálicos con contenidos económicos de casiterita y scheelita diseminados en un skarn piroxénico-zoisítico situado en la zona de contacto entre materiales gnéisicos e intrusiones graníticas. Hasta la fecha, esta mineralización ha sido controlada únicamente mediante sondeos por la empresa SIEMCALSA, que desde 2008 posee el derecho minero de la zona.

Este yacimiento ha sido explorado y explotado intermitentemente a lo largo de la historia desde la época de los romanos (año 50 a.c.). Durante la década de 1980, la empresa 'Charter Exploraciones S.A.' (Charter S.A.) realizó una serie

de estudios usando técnicas de campos potenciales (magnetismo y gravedad entre otras). Los mapas de anomalía gravimétrica y magnética realizados por esta empresa fueron analizados en un estudio anterior (Jiménez Borrego, 2020) en el que se concluyó que estos presentaban artefactos relacionados con errores en la adquisición y procesado. Por tanto, no eran resolutivos a la hora de estudiar la mineralización.

En este trabajo se presentan nuevos mapas gravimétricos (anomalía de Bouguer) y magnéticos (anomalía absoluta) adquiridos en la zona del yacimiento y evitando las fuentes de error previamente mencionadas. La modelización en 2D a lo largo de una serie de secciones ha permitido constreñir la extensión y geometría de las capas mineralizadas, mejorando el conocimiento existente del yacimiento.

## ABSTRACT

Magnetic and gravity data have been acquired at the polymetallic deposit of Cerro de Almadenes (Otero de Herreros, Segovia), using modern equipment and techniques, resulting in new anomaly maps that are compared with existing anomaly maps. The acquisition of this new data provides additional criteria to control the geometry of the mineralized layers, partly constraining their width and depth through forward 2D modeling techniques. The new datasets and models are not influenced by surface magnetic noise or by factors related to data processing, as previous ones. The resulting magnetic anomaly allows to constrain the geometry of the mineralized M-layer while the gravity anomaly indicates the interval where the ore is concentrated. Recent methodological and instrumental advances in potential field data acquisition techniques has enabled us to obtain better data and more constrained anomaly maps, which can be modeled with more detailed techniques.

**Palabras clave:** Yacimiento de Otero de Herreros, depósito polimetálico, anomalía gravimétrica, anomalía magnética.

Fecha de recepción: 28/07/2021  
Fecha de revisión: 29/10/2021  
Fecha de aceptación: 26/11/2021

## Contexto geológico del yacimiento

El yacimiento de Cerro de Almadenes se localiza dentro de la Zona Centro Ibérica (ZCI) del Macizo Ibérico (Fig. 1A) en el Dominio del Complejo Esquistos-Grauváquico (Díez Balda *et al.*, 1990).

En la zona del yacimiento se diferencian tres grandes conjuntos litológicos: i) conjunto ortognésico, ii) Serie Félica Heterogénea (SFH), donde se localiza la Serie Verde, y iii) rocas graníticas tardías (Figs. 1B y C). La Serie Verde es un cuerpo lenticular muy heterogéneo, formado principalmente por mármoles y silicatos cálcicos, además de skarns de alta y baja temperatura y clorititas (Tornos, 1989). El cuerpo mineralizado está restringido casi exclusivamente a un skarn cálcico, producto de la sustitución metasomática de los mármoles, y a una cloritización sobreimpuesta. Este se

acuña en profundidad hacia el SO entre los ortogneises y los granitos (Fig. 1C).

La estructura tectónica más importante a escala del yacimiento es la zona de cizalla de Almadenes (Tornos, 1989) de dirección NO-SE, y buzamiento entre 30° y 45° al SO (Figs. 1B y C). Se trata de una zona de cizalla dúctil que afecta a los paragneises fémcicos y mármoles (Fig. 1C) y que está íntimamente ligada al desarrollo de la mineralización. Esta cizalla es responsable del skarn tardío (apokarn), primero epidótico y después anfibólico (Martínez Catalán *et al.*, 2017), siendo en esta última la litología donde se concentra la mayor parte de la mineralización ('capa M', en azul oscuro en las Figs. 1B y C).

### Adquisición y procesado de los datos gravimétricos y magnéticos

La obtención de datos magnéticos y gravimétricos se ha realizado según una cuadrícula de puntos con una separación de 100 metros entre ellos, tanto en el eje norte-sur como en el este-oeste, abarcando un área de 1,7 km<sup>2</sup>. Se han adquirido un total de 136 medidas de gravedad relativa y 150 medidas de campo magnético total.

Los datos de gravedad relativa se han obtenido con un gravímetro SCINTREX-CG6 de resolución 0,1 μGal, mientras que la toma de datos de campo magnético se ha realizado con un magnetómetro portátil de precesión de protones GEOMETRICS G-856 de resolución 0,1 nT.

Las coordenadas (X, Y, Z) de los puntos de medida han sido obtenidas con un GPS Garmin eTrex 30x y con el GPS interno del gravímetro. Además, se han llevado a cabo vuelos a 120 metros de altura con un dron para localizar y situar en detalle la posición (horizontal y vertical) de dichos puntos utilizando técnicas de fotogrametría. Con este procedimiento se ha conseguido una resolución en la posición de los puntos de medida del orden de unos pocos centímetros. Dichos datos se han usado además para calcular la corrección topográfica cercana. Finalmente, su integración con un MDT se ha usado para crear la malla utilizada en la corrección topográfica intermedia (regional).

En la adquisición de datos gravimétricos se han realizado medidas en la base de gravedad absoluta de orden 0 y 1 que se encuentra en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca ([Instituto Geo-](#)

[gráfico Nacional \(ign.es\)](#)) al empezar y acabar cada jornada. También se han obtenido medidas cada dos o tres horas en la base local establecida en el área de estudio para eliminar el efecto de las mareas terrestres y contribuir en la corrección de la deriva del gravímetro. De igual manera, en la adquisición de datos magnéticos se han realizado medidas en esta misma base local al principio y final de cada jornada para eliminar la variación secular del campo magnético.

Para obtener los mapas de anomalías gravimétricas y magnéticas, se han aplicado todas las correcciones preceptivas a los valores medidos de ambos conjuntos de datos con el objetivo de eliminar los efectos que los instrumentos, la localización de las estaciones y la hora de medida tienen sobre el valor de la gravedad y del campo magnético terrestre. Este proceso se ha llevado a cabo con el software Oasis Montaj, de Geosoft.

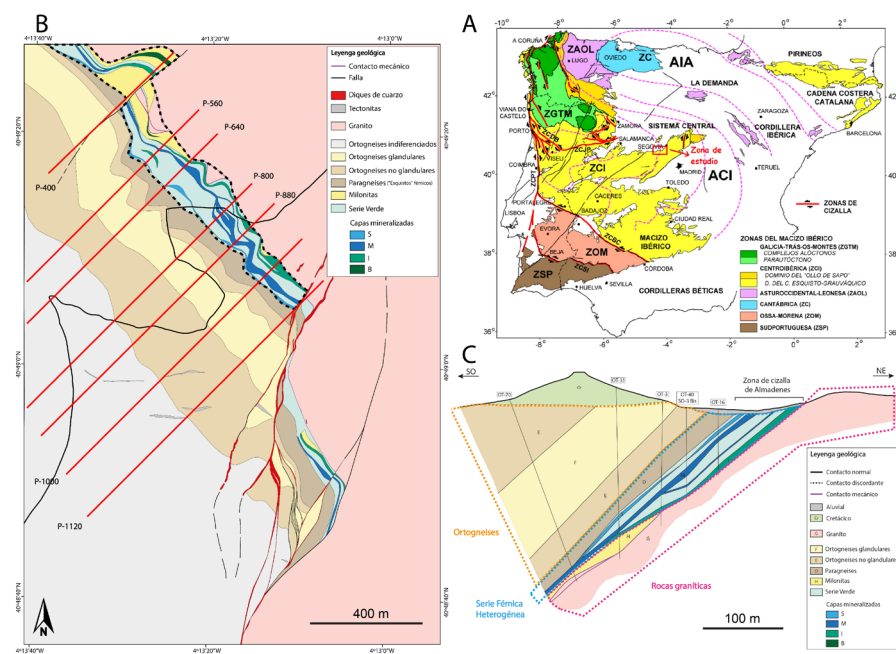
El mapa de anomalía de Bouguer resultante (escala de color en la Fig. 2A) muestra una amplitud de la anomalía de 3,9 mGal. Se observa un mínimo relativo donde afloran la 'capa M' (B en la Fig. 2A). Los valores más altos aparecen al NO de A, según una lineación NO-SE y coinciden con una zona topográficamente deprimida.

Por otro lado, el mapa de anomalía magnética (escala de color en la Fig. 2B) expone una amplitud total de 564,1 nT. En este mapa observamos la existencia de valores altos sobre las capas mineralizadas (F en la Fig. 2B) que, al igual que estas (Fig. 1B), presentan una dirección NO-SE. También muestra valores altos al SE (G en la Fig. 2B) en una zona donde también aflora la 'capa M'.

### Diferencias entre los nuevos mapas de anomalías y los mapas previos

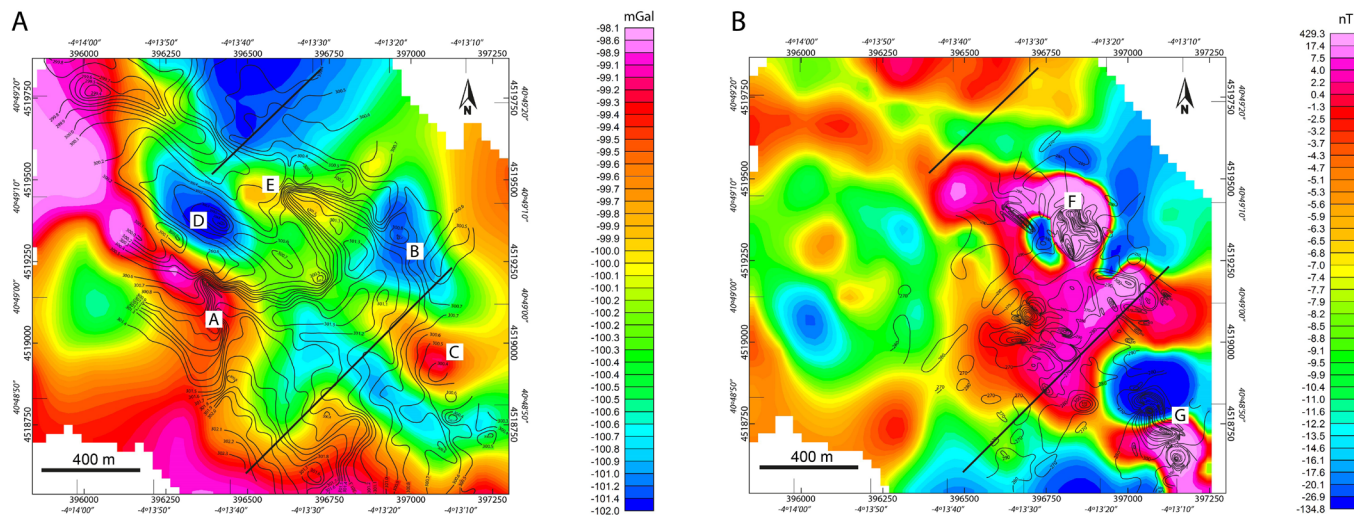
Para hacer un estudio comparativo entre los mapas de Charter S.A. y los presentados en este trabajo, las figuras 2A y 2B muestran el contorno de los primeros superpuestos a los mapas de anomalías obtenidos. El mapa gravimétrico de Charter S.A. (mapa de contornos en la Fig. 2A) muestra una amplitud total de unos 3,7 mGal, cercana a la de 3,9 mGal obtenida en este trabajo. Sin embargo, la distribución de máximos y mínimos difiere, en ocasiones afectando a zonas estratégicas.

Una de las principales diferencias entre ambos mapas se encuentra en el alto gradiente que el mapa de Charter S.A. muestra en el límite entre el basamento y el Cretácico (A en la Fig. 2A). Este se debe al uso de diferentes densidades a la hora de corregir la placa de Bouguer formada



**Fig. 1.- A.** Mapa simplificado del Macizo Ibérico y de las zonas en las que se divide (Martínez Catalán, 2011). El rectángulo rojo sitúa la zona de estudio. **B.** Mapa geológico del yacimiento de Otero de Herreros. La línea de color negro continua representa el límite del Cretácico. Las líneas de color rojo representan los perfiles que se han modelizado para este trabajo. La línea discontinua indica la posición de la zona de cizalla de Almadenes. **C.** Corte de la zona de cizalla de Almadenes con la localización de algunos de los sondeos realizados (modificado de SIEMCALSA, 2011; Perfil 880, ver Fig. 1B).

**Fig. 1.- A.** Simplified map of the Iberian Massif and its zones (Martínez Catalán, 2011). The red rectangle represents the study area, located in the CIZ. **B.** Geological map of the Otero de Herreros deposit. The continuous black line represents the Cretaceous boundary. The red lines represent the profiles that have been modeled for this work. The dashed line indicates the Almadenes shear zone. **C.** Geological cross-section of the Almadenes shear zone with the location of some boreholes (modified from SIEMCALSA, 2011; Profile 880, see Fig. 1B).



**Fig. 2.-** A. Mapa de 'anomalía relativa de Bouguer' (en contornos negros) realizado por la empresa 'Charter S.A.' superpuesto al mapa de anomalía de Bouguer generado en este trabajo (escala de color). B. Mapa de campo magnético total (en contornos negros) realizado por la empresa 'Charter S.A.' superpuesto al mapa de anomalía magnética generado en este trabajo (escala de color). En ambos mapas se indican con líneas negras los perfiles modelizados de la figura 3 (perfil 400 al norte y perfil 1120 al sur). Ver el texto para la nomenclatura de las anomalías.

*Fig. 1.-* A. Map of 'relative Bouguer anomaly' (in black contours) made by the company 'Charter S.A.' superimposed on the Bouguer anomaly map generated in this work (color scale). See text for anomaly nomenclature. B. Total magnetic field map (in black outlines) made by the company 'Charter S.A.' superimposed on the magnetic anomaly map generated in this work (color scale). In both maps the modeled profiles of figure 3 (profile 400 to the north and profile 1120 to the south) are indicated with black lines. See text for anomaly nomenclature.

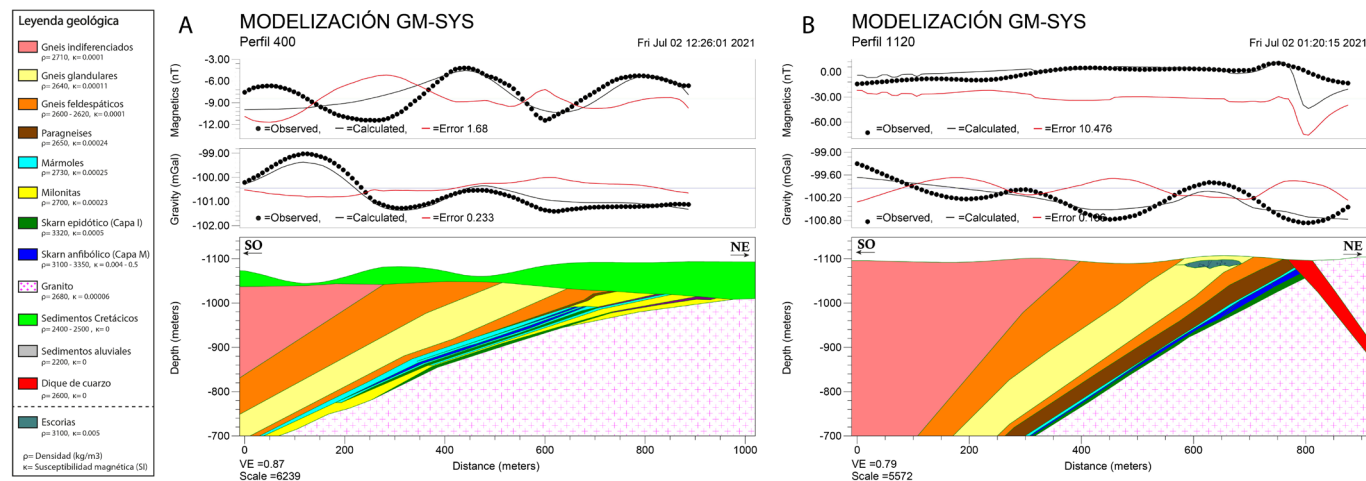
por los materiales Cretácicos y Proterozoicos, y a la falta de corrección topográfica (Jiménez Borrego, 2020). En este trabajo se ha utilizado una densidad de reducción de 2670 kg/m<sup>3</sup> de manera uniforme, mientras que en el mapa de Charter S.A. fue de 2200 kg/m<sup>3</sup> sobre el Cretácico y 2650 kg/m<sup>3</sup> sobre el Proterozoico. Por otro lado, la corrección topográfica fue estimada (que no aplicada) por Charter S.A. en un máximo de 0,66 mGal, mientras que en este estudio se ha observado que alcanza un valor máximo de 2,7 mGal, lo que representa aproximadamente el 70% de la amplitud total de la anomalía (3,9 mGal) (Fig. 2A). Otra dife-

rencia relevante se encuentra en el mínimo relativo obtenido en este trabajo en la parte centro-este, cercano a la mineralización, y que el mapa de Charter S.A. muestra como un máximo relativo (B en la Fig. 2A). Finalmente, un pequeño máximo observado en el este que coincide con un mínimo relativo en el mapa de Charter S.A. (C en la Fig. 2A).

Por otro lado, ambos mapas muestran algunas similitudes, como i) el importante mínimo con forma circular en la zona central del mapa, bajo sedimentos Cretácicos (D en la Fig. 2A); ii) un máximo solapado a la mineralización al NE del mínimo antes descrito (E en la Fig. 2A) y iii) la tendencia

ascendente de la anomalía hacia el SO.

En cuanto a los datos magnéticos, el mapa de Charter S.A. es de campo magnético total (contornos en la Fig. 2B) y muestra una amplitud en la anomalía de ~280 nT (entre 44500 y 44220 nT) que es sensiblemente inferior a la encontrada en nuestro mapa de anomalías magnéticas (564,1 nT) (Fig. 2B). Aunque parte de esta diferencia puede deberse al valor del campo magnético terrestre existente en la zona de trabajo en 1981 (~44279 nT) y en 2021 (~45050 nT), el cual probablemente induce la mayor parte de las anomalías, existen claras discrepancias en la geometría de las mismas que



**Fig. 3.-** A. Perfil 400 modelizado y ajuste con los datos magnéticos y gravimétricos. B. Perfil 1120 modelizado y ajuste con los datos magnéticos y gravimétricos. Se muestra a la izquierda la leyenda geológica de ambos perfiles con las propiedades petrofísicas de las rocas.

*Fig. 1.-* A. 2D forward gravity and magnetic modeling of profile 400. Fitting with observed data is also shown. B. 2D forward gravity and magnetic modeling of profile 1120. Fitting with observed data is also shown. The legend of both profiles is shown to the left together with the petrophysical data.

señalan la existencia de factores de tipo metodológico ligados a la adquisición. Si comparamos el mapa de anomalía magnética absoluta generado para este trabajo (escala de color en la Fig. 2B) con el realizado por Charter S.A. (contornos en la Fig. 2B) vemos que ambos presentan un máximo notable en la zona centro, coincidiendo con un afloramiento de capas mineralizadas (F en la Fig. 2B), aunque con diferente geometría en ambos casos. De igual manera, en ambos mapas se observa un máximo y un mínimo al SE de la zona, aunque su geometría no coincide (G en la Fig. 2B). Sin embargo, en el resto del mapa, no existen ya grandes similitudes. Mientras que los datos de Charter S.A. muestran anomalías dipolares, de gran amplitud y pequeña longitud de onda que representan fuentes muy superficiales, para el mapa generado en este trabajo se han evitado las fuentes de ruido magnético somero, generando por tanto anomalías de mayor longitud de onda con su origen en el subsuelo.

## Modelización 2D

Para este trabajo se han modelizado siete perfiles (Fig. 1B) usando los cortes geológicos existentes (SIEMCALSA) y los datos de campos potenciales de la figura 2. Todos los perfiles tienen una dirección NE-SO, son perpendiculares a las estructuras y cortan las capas mineralizadas. Para la modelización se ha utilizado GM-SYS, de Oasis Montaj. A cada nivel litológico se le han asignado propiedades físicas (susceptibilidad magnética ( $\kappa$ ) y densidad ( $\rho$ )) medidas en el laboratorio (Jiménez Borrego, 2020).

## Discusión y resultados

De los siete perfiles modelizados para este trabajo solo se adjuntan dos donde el ajuste de la respuesta magnética y gravimétrica es aceptable (Fig. 3). La tendencia positiva de la anomalía gravimétrica hacia el SO que presentan todos los perfiles se ha conseguido con el pequeño contraste de densidad existente entre el granito situado al NE ( $2680 \text{ kg/m}^3$ ) y los gneises del SO ( $2710 \text{ kg/m}^3$ ) (Figs. 1B y C). Los máximos magnéticos se han ajustado modificando la susceptibilidad magnética de manera heterogénea a lo largo del skarn anfibólico, usando valores que varían entre  $\kappa=0.004-0.3$  (S.I.), siempre dentro del rango medido. En las zonas al NO del yacimiento (perfiles 400, 560 y 640, Fig. 1B), las susceptibilidades más altas aparecen a partir de los 120-150 metros de profundidad. En cambio, hacia el SE (perfiles 800 y

880, Fig. 1B), los tramos de las capas mineralizadas con mayores susceptibilidades magnéticas se localizan en los 150 metros más superficiales. Por último, en las zonas más al SE, las capas mineralizadas presentan mayor heterogeneidad, impidiendo de esta manera clasificar tramos con susceptibilidades magnéticas distintas.

Teniendo en cuenta estas observaciones, podemos afirmar que los máximos magnéticos observados, sin duda relacionados con el alto contenido en magnetita del skarn anfibólico (Tornos, 1989), permiten definir la geometría de la 'capa M'. Por otro lado, el máximo que aparece al norte en el mapa de anomalía magnética (Fig. 2B; máximo más al NE del perfil magnético de la Fig. 3A) se ha ajustado añadiendo dos capas con propiedades físicas similares a la 'capa M' (capas de color morado en la Fig. 3A) que se han extendido hacia el NO, bajo los sedimentos Cretácicos. Esta zona coincide con una falla normal, con componente de desgarre dextro, dirección N40°E y buzamiento 80°SE, que desplaza toda la serie sedimentaria en dirección NE. El ajuste propone una nueva geometría de la zona mineralizada, pudiendo representar la presencia de nuevas reservas minerales en la zona.

En cuanto a los datos gravimétricos, el mínimo que se encuentra sobre la 'capa M' (B en la Fig. 2A; mínimo más al NE en la Fig. 3B) se ha ajustado asignando a los tramos más superficiales de esta las densidades más bajas medidas en el laboratorio ( $\rho=3100 \text{ kg/m}^3$ ), lo que indica que esos tramos están menos mineralizados. Finalmente, el máximo gravimétrico situado en la zona más al este del área de estudio (C en la Fig. 2A; máximo más al este de la Fig. 3B), coincide con una zona donde existe un depósito de antiguas escorias, cuya respuesta gravimétrica afecta a la anomalía. Para modelizar este máximo, se ha añadido una pequeña capa densa ( $\rho=3050 \text{ kg/m}^3$ ) con forma lenticular (Fig. 3B) que recrea estos depósitos.

## Conclusiones

La anomalía magnética del Yacimiento de Otero de Herreros nos ha permitido trazar la geometría de la 'capa M', de gran interés por su contenido en sulfuros polimetálicos, casiterita y scheelita, a través de la modelización directa en 2D de una serie de perfiles perpendiculares a las estructuras. Por su parte, los máximos en la anomalía de Bouguer dibujan las zonas más mineralizadas dentro de dicha capa, (máximo relativo E en la Fig. 2A).

Este trabajo ha demostrado que la adquisición de datos de campos potenciales, con equipamiento moderno y técnicas de procesado más potentes, mejora los mapas de anomalías de campos potenciales con respecto a los ya existentes, lo que permite modelizar mejor las anomalías y optimizar la interpretación geológica. Además, al ser estos métodos eficientes desde un punto de vista económico y medio-ambiental, el trabajo aquí presentado sugiere que muchos yacimientos de minerales estratégicos podrían ser de nuevo investigados usando estas técnicas.

## Contribución de los autores

Jiménez Borrego ha participado en la adquisición, procesado, y modelización de los datos. Ayarza ha participado en la adquisición y procesado. Sánchez ha realizado la localización de los puntos. Fadón ha participado en la adquisición y ha dado acceso a la litoteca de SIEMCALSA.

## Agradecimientos y financiación

RJB ha sido financiado por la Universidad de Granada. PA ha sido financiada por el proyecto SA084P20. Se agradecen los comentarios realizados por dos revisores anónimos, los cuales han contribuido a mejorar este trabajo.

## Referencias

- Díez Balda, M.A., Vegas, R. y González Lodeiro, F. (1990). *Central Iberian Zone, Autochthonous Sequences*. In: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (Dallmeyer, R.D. y García Martínez, E., Eds.). Springer-verlag, Berlin, 172-188.
- Jiménez Borrego, R. (2020). *Estudio de la mineralización en el yacimiento de Otero de Herreros (Segovia) a partir de la modelización de datos de campos potenciales existentes*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Salamanca, 39 p.
- Martínez Catalán, J.R. (2011). *The Central Iberian arc, an orocline centered in the Iberian Massif and some implications for the Variscan belt*. *Int. J. Earth Sci.* 101, 1299-1314.
- Martínez Catalán, J.R. y Gómez Barreiro, J. (2017). *Proyecto Otero: Análisis estructural de las rocas en el skarn polimetálico Cu-Sn-Zn-Ag-W*. Universidad de Salamanca, 40 p.
- Tornos Arroyo, F. (1989). *Los skarns y mineralizaciones asociadas del Sistema Central Español. Modelo de caracterización petrológica, geoquímica y metalogénica*. Tesis doctoral, Universidad Complutense, Madrid, 496 p.