

Nuevos datos gravimétricos en los Pirineos Centrales (NE de España)

New gravity data in the Central Pyrenees (NE Spain)

Concepción Ayala¹, Félix M. Rubio², Carmen Rey-Moral², Emilio L. Pueyo³, Pilar Clariana³, Ruth Soto³, Antonio M. Casas⁴, Teresa Román-Berdiel⁴ y Joan Martí⁵

¹ IGME, C/ La Calera s/n, 28760, Madrid, actualmente científica titular de estancia en el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera-CSIC, C/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028, c.ayala@igme.es

² IGME, C/ La Calera s/n, 28760, Madrid, fm.rubio@igme.es, c.rey@igme.es

³ IGME – Unidad de Zaragoza, Zaragoza y Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra IGME/Universidad de Zaragoza, Universidad de aragoza, Zaragoza, unaim@igme.es, p.clariana@igme.es, r.soto@igme.es

⁴ Geotransfer Research Group (IUCA), Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain y Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra IGME/Universidad de Zaragoza, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, acasas@unizar.es, mtdjrb@unizar.es

⁵ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera-CSIC, C/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, joan.marti@ictja.csic.es

ABSTRACT

The GeoPiri3D project aims to characterize the geometry and kinematics of the Permo-Carboniferous batholiths of the Central Pyrenees through a combination of potential fields and structural data. During 2018 we have acquired 824 new gravity stations and 186 rock samples. The gravity data were processed and integrated into the IGME database and a new Bouguer anomaly was calculated. The two main granite bodies (La Maladeta and Andorra-Mount Louis) provide different gravimetric responses. The anomaly on the La Maladeta granite outcrop presents a zonation with small variations in its amplitude. The petrophysical data provide an average density of ca. 2.6 g/cm³, which is consistent with its granodioritic composition. The outcrop of the Andorra-Mount Louis pluton is characterized by a relative minimum, suggesting a dominant granitic composition. In addition, the minimum extends in an oblique NE direction indicating that part of the pluton is buried. The relative minimum to the SW of La Maladeta is probably linked to accumulations of Triassic evaporites.

Key-words: gravity, petrophysics, batholiths, Pyrenees.

RESUMEN

El proyecto GeoPiri3D tiene como objetivo caracterizar la geometría y la cinemática de los batolitos permo-carboníferos del Pirineo Central por medio de una combinación de campos potenciales y de datos estructurales. Durante 2018 se han adquirido 824 nuevas estaciones de gravedad y 186 muestras de roca. Los datos de gravedad se han procesado e integrado en la base de datos del IGME y se ha calculado un nuevo mapa de anomalías de Bouguer. Los dos cuerpos graníticos principales (La Maladeta y Andorra-Mount Louis) proporcionan diferentes respuestas gravimétricas. La anomalía sobre el afloramiento de granito de La Maladeta presenta pequeñas variaciones en su amplitud que se asocian con cambios de facies. Los datos petrofísicos proporcionan una densidad media de ca. 2,6 g/cm³ que son consistentes con su composición, predominantemente granodiorítica. El afloramiento del plutón de Mount Louis-Andorra se caracteriza por un mínimo relativo, lo que sugiere una composición predominantemente granítica (aún no se tienen resultados de las medidas de densidad). Además, el mínimo se extiende en dirección NE, lo que sugiere que parte del plutón está enterrado. El mínimo relativo al SO del granito de La Maladeta probablemente está relacionado con las acumulaciones de evaporitas triásicas.

Palabras clave: gravimetría, petrofísica, batolitos, Pirineos.

Geogaceta, 67 (2020), 103-106
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 27/06/2019

Fecha de revisión: 17/10/2019

Fecha de aceptación: 22/11/2019

Introducción

El magmatismo permo-carbonífero postorogénico de los Pirineos Centrales generó una gran cantidad de rocas intrusivas y volcánicas de composición calco-alcalina. La relación temporal entre estas rocas se ha establecido recientemente a través de dataciones de U-Pb en circones (e.g., Pereira *et al.*, 2014), pero entender cuál era el régimen tectónico durante su emplazamiento está bajo discusión. Si bien la ubicación del volcanismo y el em-

plazamiento de las rocas volcánicas estuvieron controladas por la apertura de cuencas de *pull-apart* a lo largo de sistemas de fallas transtensionales y de desgarre, el emplazamiento de los cuerpos granodioríticos y su geometría aún no están bien establecidos.

El proyecto GeoPiri3D tiene como objetivo caracterizar la geometría y la cinemática de los batolitos permo-carboníferos de la Zona Axial del Pirineo Central (Fig. 1), principalmente a partir de datos estructurales y gravimétricos. Las rocas ígneas de la

zona de estudio comprenden el complejo granítico de La Maladeta y el granito de Arties al oeste, el granito de Andorra-Mount Louis al este y las rocas volcanoclásticas estefano-pérmicas que afloran al sur del sector estudiado.

La gravimetría, cuando se combina con datos petrofísicos obtenidos de las litologías a modelizar, constituye un método robusto para modelizar las estructuras del subsuelo especialmente cuando no se tienen datos de sísmica (e.g., Ayala *et al.*, 2019).

Las propiedades petrofísicas de las rocas (densidad, susceptibilidad magnética y magnetización remanente natural) son variables de primer orden en la modelización de datos geofísicos de campos potenciales (gravimetría y magnetometría). El flujo de trabajo desarrollado en el IGME en las últimas décadas ha puesto gran énfasis en la adquisición de abundantes datos para la obtención de histogramas robustos que permitan acotar al máximo los valores petrofísicos asignados a los diferentes volúmenes de roca (e.g., Izquierdo-Llavall *et al.*, 2019).

En este trabajo se presentan nuevos datos gravimétricos y petrofísicos adquiridos en la zona de estudio durante el año 2018 y los resultados preliminares de su interpretación en términos geológicos

Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el sector centro-oriental de la Zona Axial y parte de la Zona Surpirenaica, desde el límite entre las provincias de Huesca y Lleida al oeste hasta aproximadamente el río Fresser por el este, los domos gneísicos de Astón y Hospitalet al norte y el cabalgamiento del Montsec por el sur. La Zona Axial se caracteriza por presentar rocas de basamento (desde el Cámbrico hasta el Triásico) y la Zona Surpirenaica rocas de cobertera (desde el Triásico hasta el Cenozoico).

Adquisición y procesado de datos gravimétricos y petrofísicos

Este trabajo ha partido de 2890 estaciones gravimétricas previas de las bases de datos del IGME e Instituto Geológico y Cartográfico de Catalunya (IGCC). Durante el año 2018 se han adquirido 824 nuevas estaciones para aumentar la resolución espacial especialmente en la zona de los granitos. Debido a la difícil orografía de la zona de estudio, con elevaciones por encima de los 2000 m y sin fácil acceso (Fig. 2A), no ha sido posible tener la cobertura homogénea deseada de 1 estación/km². Las medidas se han realizado con tres gravímetros: Scintrex CG5 (63% de las medidas) y un Lacoste & Romberg (25% de las medidas), ambos del IGME, y un Scintrex CG6 (12% de las medidas) del IGCC. Para calibrar las medidas efectuadas por los tres aparatos, 12 estaciones fueron medidas con los tres gravímetros y 25 con el CG5 y L&R. Todas las medidas están referidas a una base de gravedad absoluta del IGN y las medidas obtenidas por los tres gravímetros en un mismo punto son coincidentes.

Las nuevas medidas se han incorporado a las bases de datos institucionales y se ha procedido a recalcular el valor de la anomalía de Bouguer para todos los datos (Fig. 2B). Para ello se han realizado las correcciones de latitud, aire libre, lámina de Bouguer con una densidad de reducción de 2,67 g/cm³ y topográfica utilizando las fórmulas del sistema geo-

désico GRS80. La corrección topográfica se ha calculado hasta 167 km con el *software* Oasis Montaj, que utiliza el método de Nagy (1966) y Kane (1962). La anomalía residual (Fig. 2C) se calculó asumiendo una anomalía regional correspondiente a un polinomio de tercer grado.

Paralelamente se midió la densidad y susceptibilidad magnética de las 186 muestras recogidas en 74 localidades que abarcan todo el rango de edades y litologías que afloran en el área de estudio. Estas medidas se realizaron en los laboratorios del IGME. Las mediciones de densidad se realizan a partir de muestras obtenidas con martillo (0,3 a 0,6 kg) pesándolas en aire y agua. Las precisiones son de 0,02 g/cm³.

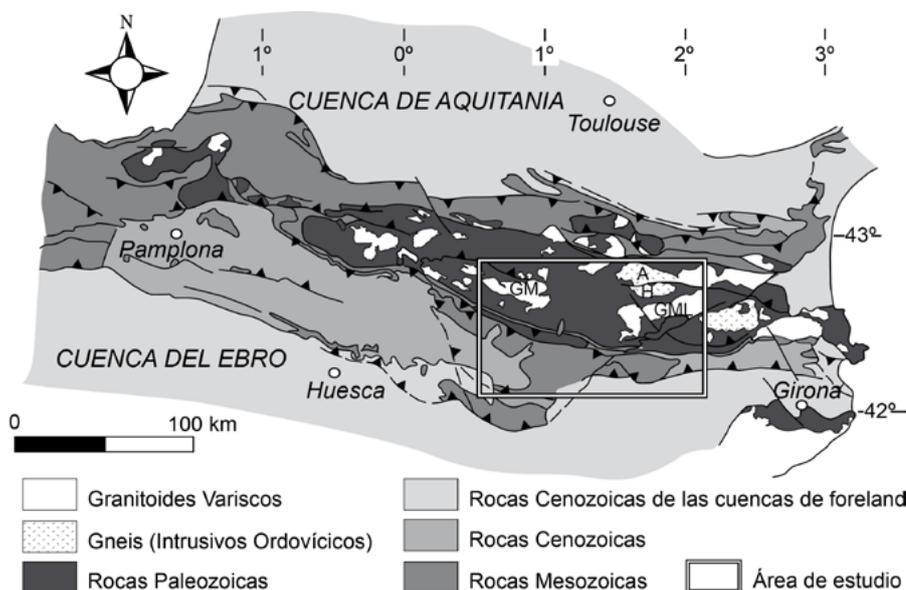


Fig. 1.- Esquema geológico de los Pirineos. La zona de estudio está marcada con el recuadro. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Geological sketch of the Pyrenees. The rectangle marks the study area. See color figure in the web.

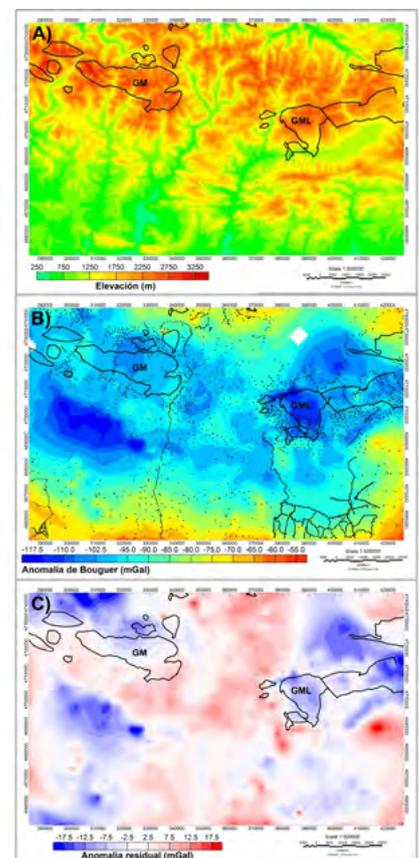


Fig. 2.- A) Modelo digital del terreno de la zona de estudio con la localización de las 824 nuevas estaciones. B) Anomalía de Bouguer con todas las estaciones utilizadas para su cálculo (3714). C) Anomalía de Bouguer residual. Los mapas muestran los contornos de los granitos objeto de estudio (GM: granito de La Maladeta; GML: granito de Andorra-Mount Louis). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- A) Digital terrain model of the study area with the location of the 824 new stations. B) Bouguer Anomaly with all 3714 stations used in this calculation. C) Residual Bouguer anomaly. The outline of the targeted granites is also displayed (GM: La Maladeta granite; GML: Andorra-Mount Louis granite). See color figure in the web.

Gravimetría

Anomalía de Bouguer

Hasta la fecha, el mapa publicado más reciente de las anomalías de Bouguer es el correspondiente a toda la Península Ibérica (Ayala *et al.*, 2016), con una malla de 2 km x 2 km. El nuevo mapa de anomalías de Bouguer (Fig. 2B) obtenido para este trabajo se ha realizado con una malla de 1 km x 1 km. Se caracteriza por un mínimo relativo elongado de longitud de onda larga que ocupa la mayor parte del mapa con un valor inferior a -100 mGal, que parece continuar hacia el O y se cierra hacia el E presentando en los bordes un gradiente positivo cuyo valor llega a los -65 mGal. Este mínimo estaría asociado con la raíz cortical de los Pirineos (*e.g.*, Torné *et al.*, 2015). A este mínimo se superponen distintos máximos y mínimos relativos de longitud de onda media y corta con amplitudes variables que se asocian con estructuras superficiales.

Los dos cuerpos graníticos principales (La Maladeta y Andorra-Mount Louis) proporcionan diferentes respuestas gravimétricas. La anomalía sobre el afloramiento del granito de La Maladeta presenta variaciones en amplitud de solo 5 mGal, mientras que el afloramiento del plutón de Andorra-Mount Louis se caracteriza por un mínimo relativo cuya amplitud es de 15-20 mGal. Este mínimo relativo se extiende hacia el NE en una zona donde no hay afloramiento.

Anomalía residual

El patrón de las anomalías residuales (Fig. 2C) sugiere una zonación del granito de La Maladeta caracterizada por una sucesión de máximos y mínimos de pequeña amplitud (4-6 mGal), lo que indica una composición bastante heterogénea en profundidad. El mínimo relativo (6-8 mGal) sobre el batolito de Andorra-Mount Louis que se extiende hacia el NE con una amplitud de ca. 10 mGal parece confirmar la hipótesis de que hay una parte de este batolito enterrada. El mínimo relativo, que asociamos a la presencia de evaporitas, es una de las características más prominentes del mapa de anomalías residuales. Su prolongación hacia el S-SE parece indicar que dichas rocas también se extienden en esa dirección.

Mapas derivados

Como paso previo a la modelización, se han obtenido los mapas de las primeras derivadas vertical y gradiente horizontal total de la anomalía gravimétrica residual (Fig. 3). El objetivo es delimitar las principales estructuras en profundidad y asociar las diferentes alineaciones con límites litológicos o fallas no aflorantes así como distinguir la continuación de estructuras que afloran sólo parcialmente.

Los gradientes que se observan son el resultado del contraste de densidad entre las rocas metamórficas y metasedimentarias, el basamento hercínico y las intrusiones graníticas. Dichos gradientes muestran una débil zonificación sobre el batolito de La Maladeta (GM) y su patrón, junto con los valores de la anomalía gravimétrica residual, sugieren un buzamiento hacia el N de un cuerpo de geometría tabular (Clariana *et al.*, 2019). El conjunto de gradientes (líneas negras) alrededor del granito de Andorra-Mount Louis (GML) delimitan claramente el afloramiento y su probable extensión en profundidad hacia el NE en las zonas donde no aflora. Hacia el oeste, los gradientes principales mantienen una tendencia NO-SE que corresponde a las estructuras pirenaicas principales, siendo la más visible (al sur de GM) la que corresponde a las evaporitas triásicas.

Petrofísica: Datos de densidad

Con relación a las medidas de densidad, los datos obtenidos en la zona de estudio (Fig. 4) garantizan un contraste

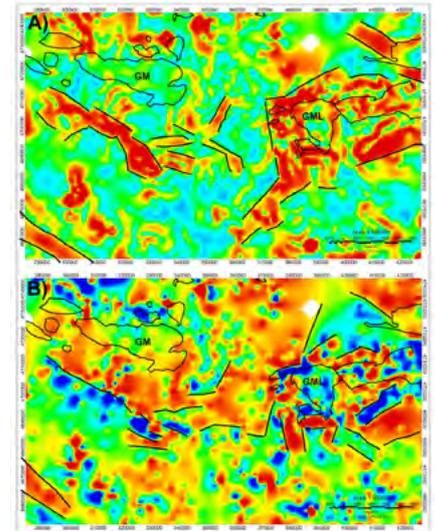


Fig. 3.- A) Derivada horizontal de la anomalía de Bouguer con los lineamientos más relevantes. B) Derivada vertical de la anomalía de Bouguer con los lineamientos más relevantes. Los mapas muestran los contornos de los granitos objeto de estudio. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A) Horizontal derivative of the Bouguer anomaly with the most relevant lineaments on top. B) Vertical derivative of the Bouguer anomaly with the most relevant lineaments on top. The outline of the targeted granites is also displayed. See color figure in the web.

de densidad suficiente entre las unidades de cobertera (2,51 g/cm³) y el basamento (2,70 g/cm³; Fig. 4) y muy especialmente en los materiales evaporíticos triásicos (≈ 2,0 g/cm³). Finalmente, los valores obtenidos hasta ahora en el granito de La Maladeta oscilan entre 2,52-2,73 con una media de 2,66 g/cm³ (+/-0,009). Estos datos permitirán modelizar con mayor

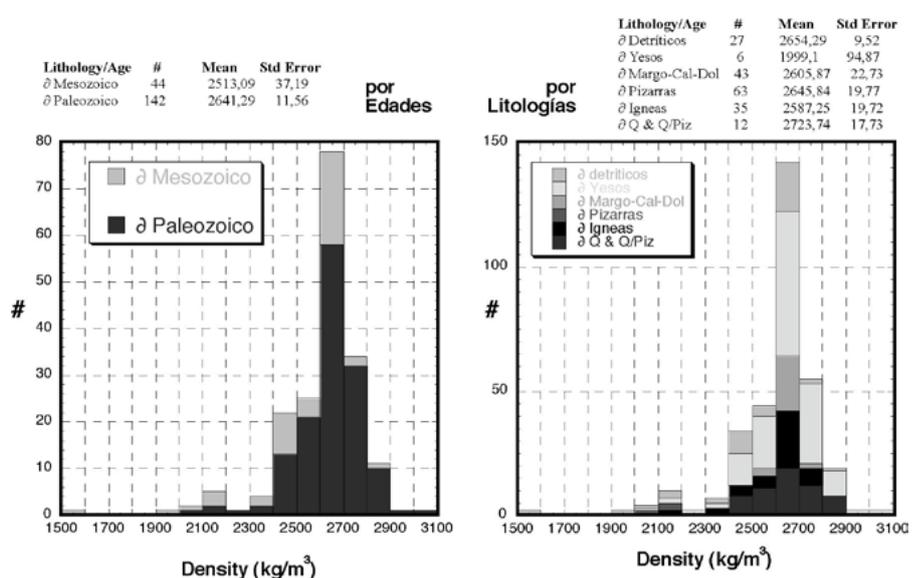


Fig. 4.- Histogramas de densidad por edades y por litologías de las 186 muestras analizadas.
Fig. 4.- Age and lithology density histograms of the 186 samples analyzed.

rigor la señal gravimétrica residual en los cortes compensados realizados y en las cartografías de facies petro/magnéticas de los granitos que se enriquecerán además con BBDD petrofísicas previas (Pueyo *et al.*, 2016; Porquet *et al.*, 2017).

Conclusiones

El mínimo relativo que se observa en la anomalía de Bouguer y también en la anomalía residual hacia el NE del granito de Andorra-Mount Louis se interpreta como parte del granito subaflorante. El mínimo gravimétrico relativo situado al SO de La Maladeta se interpreta como la respuesta gravimétrica de acumulaciones evaporíticas triásicas (baja densidad) en el subsuelo, cuyos afloramientos son escasos. El contexto geológico hace descartar la presencia de otros cuerpos graníticos (Clariana *et al.*, 2019).

El presente estudio sugiere que el uso en los Pirineos Centrales de gravimetría junto con datos de petrofísica constituye una herramienta muy prometedora para obtener modelos 2D y 3D, que permitan definir la geometría y propiedades físicas de los granitos y su encajante, y aportar nueva información que permita estable-

cer los controles tectónicos sobre el emplazamiento de los plutones y su relación con el vulcanismo.

Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado con el proyecto CGL2017-84901-C2-2-P del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. El flujo de trabajo es un desarrollo metodológico que también forma parte de los trabajos del proyecto ERANET-GeoE.171.005 (3DGEO-NEU). Intrepid Geophysics nos ha proporcionado el software para calcular la corrección topográfica de los datos gravimétricos.

Agradecemos al Dr. Díaz Azpiroz (Editor) y a un revisor anónimo sus comentarios y correcciones que han servido para mejorar el manuscrito.

Referencias

Ayala, C., Bohoyo, F., Maestro, A., Reguera, M.I., Torné, M., Rubio, F., Fernández, M. y García-Lobón, J.L. (2016). *Journal of Maps* 12-5, 1089-1092.
 Ayala, C., Rubio F.M., Rey-Moral, C., Reguera M.I. y Biete, C. (2019). *Geophysical Prospecting* 67, 580-594.

Clariana, P., Soto, R., Ayala, C., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcía, B., Beamud, E., Rey, C. y Rubio, F. (2019). En: *EGU General Assembly 2019*, 21, EGU2019-8956.
 Izquierdo-Llavall, E., Ayala, C., Pueyo, E.L., Casas, A.M., Oliva-Urcía, B., Rubio, F.M., Rodríguez-Pintó, A., Rey-Moral, C., Mediato, J.F. y García-Crespo, J. (2019). *Tectonics* 37, 2934-2960.
 Kane, M.F. (1962). *Geophysics* 27, 455-462.
 Nagy, D. (1966). *Geophysics* 31, 362-371.
 Pereira, M.F., Castro, A., Chichorro, M., Fernández, C., Díaz-Alvarado, J., Martí, J. y Rodríguez, C. (2014). *Gondwana Research* 25, 290-308.
 Porquet, M., Pueyo, E.L., Román-Berdiel, T., Olivier, P., Longares, L. A., Cuevas, J., Ramajo, J. y The Geokin3DPyr working group (2017). *Journal of Maps* 13, 438-448.
 Pueyo, E.L., Izquierdo-Llavall, E., Rodríguez-Pintó, A., Rey-Moral, C., Oliva-Urcía, B., Casas, A.M., Calvín, P., Ayala, C., Ramajo, J., del Río, P., Rubio, F.M. y García-Lobón, J.L. (2016). *Journal of Maps* 12, 836-844.
 Torné, M., Fernández, M., Vergés, J., Ayala, C., Salas, M.C., Jiménez-Munt, I., Buffett, G.G. y Díaz, J. (2015). *Tectonophysics* 663, 419-433.