

# La intrusión de Cerro Redondo (Pérmico Inferior, Cordillera Ibérica, Zaragoza): reconstrucción 3D y modelo de emplazamiento

*Cerro Redondo intrusion (Lower Permian, Iberian Chain, Zaragoza): 3D reconstruction and emplacement model*

Urbez Majarena, Andrés Gil, Marceliano Lago y Carlos Galé

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.  
urbezmajarena@gmail.com, agil@unizar.es, mlago@unizar.es y carlos.gale@gmail.com

## ABSTRACT

The subvolcanic Cerro Redondo intrusion (Iberian Chain, Zaragoza), Lower Permian in age, show a dacitic composition and a calc-alkaline affinity. It is characterized by an internal structure defined by a subvertical layering with a variable spacing (1-25 cm) and it is affected by several magmatic folds.

The cartographic study and AMS (Anisotropy of Magnetic Susceptibility) analysis of some selected magmatic folds, allow us to establish the 3D geometry of the intrusion and its emplacement model, characterized by a vertical magma ascent along a single late-variscan fault and a subhorizontal expansion controlled by the rock-fabric of the palaeozoic host rock. It has highlighted the need to combine mapping tools with AMS analysis to interpret correctly the emplacement model of highly differentiated igneous lithotypes.

**Key-words:** Cerro Redondo Intrusion, Lower Permian, ASM, Iberian Chain, Cartography of igneous intrusions.

## RESUMEN

La intrusión subvolcánica de Cerro Redondo (Cordillera Ibérica, Zaragoza), de edad Pérmico Inferior, muestra una composición dácítica, una naturaleza calcoalcalina y se caracteriza por presentar una marcada estructuración interna determinada por un bandeo subvertical y de espaciado variable (1-25 cm), que se encuentra afectado por numerosos pliegues de flujo magmático de distinta escala (desde centimétrica hasta hectométrica).

El estudio cartográfico y de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) de algunos pliegues seleccionados, ha permitido reconstruir su geometría tridimensional y establecer su modo de emplazamiento, caracterizado por un ascenso subvertical del magma a favor de una falla tardivarisca que limita la intrusión por el NW, y una expansión subhorizontal a favor de la fábrica sedimentaria del encajante paleozoico. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de combinar estudios cartográficos y de ASM para una correcta interpretación del modelo de emplazamiento de litotipos ígneos muy diferenciados.

**Palabras clave:** Intrusión de Cerro Redondo, Pérmico Inferior, ASM, Cordillera Ibérica, cartografía de cuerpos ígneos.

Geogaceta, 61 (2017), 119-122  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de julio de 2016  
Revisión: 3 de noviembre de 2016  
Aceptación: 25 de noviembre 2016

## Introducción

La intrusión de Cerro Redondo (unidad de Badules de la Cordillera Ibérica; Lotze, 1929, Carls, 1983), de edad Pérmico Inferior y naturaleza calcoalcalina (Majarena *et al.*, 2017), representa un afloramiento de rocas dácíticas de pequeñas dimensiones (0,17 km<sup>2</sup>) elongado en dirección NW-SE, que se localiza en la Sierra de Pardos (Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica). A escala mesoscópica, su singularidad está condicionada por la presencia de numerosos pliegues fluidales, definidos por un marcado bandeo composicional.

Los objetivos fundamentales de este trabajo se han centrado, por un lado, en la reconstrucción tridimensional del cuerpo

ígneo a partir de un estudio cartográfico detallado y, por otro, en la caracterización del modo de emplazamiento con la ayuda de la técnica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM).

## Localización y contexto geológico

La intrusión de Cerro Redondo se encuentra localizada en el extremo suroriental de la Sierra de Pardos, alineación montañosa de dirección NW-SE, compuesta por rocas metasedimentarias de edad cambro-ordovícica, e incluida en el área suroccidental de la denominada Unidad de Badules de la Cordillera Ibérica (Carls, 1983).

En este dominio de la Unidad de Badules, los materiales paleozoicos son intruidos por

rocas magmáticas de composición muy evolucionada; en su práctica totalidad riolítica. Estas intrusiones tienen una reducida extensión lateral, un marcado carácter fisural (encontrándose habitualmente asociadas a fallas subverticales tardivariscas) y se concentran, fundamentalmente, en dos sectores: el Macizo de Ateca y la Sierra de Pardos (Lago *et al.*, 2004 y 2005).

En el sector de la Sierra de Pardos afloran seis intrusiones con extensiones que varían entre los 0,015 y los 0,215 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Estos cuerpos ígneos presentan frecuentemente, en las zonas de contacto con la roca encajante, una elevada concentración de enclaves de pizarras ordovícicas.

Cinco de ellos se encuentran relacionados con una falla de dirección NW-SE que mues-

tra evidencias cartográficas de inversión tectónica positiva. Tienen composición riolítica y presentan un elevado grado de alteración. Sus fenocristales son muy escasos (10-20%), de tamaño milimétrico, y corresponden a cuarzo y moscovita de posible origen secundario.

La intrusión de Cerro Redondo es la más meridional del sector, se encuentra limitada al N por la denominada Falla de Pardos (Fig. 1) y está formada por dacitas subvolcánicas calco-alcalinas, que comprenden los términos composicionalmente menos evolucionados del magmatismo de esta zona. Su composición, descripción petrográfica, química mineral, edad y características geoquímicas detalladas se exponen en Majarena *et al.* (2017).

### Estructura interna de la intrusión de Cerro Redondo

La intrusión de Cerro Redondo presenta 680 m de largo y 300 m de anchura máxima y muestra una morfología general elipsoidal. En relación al resto de afloramientos del sector, esta intrusión, destaca, junto a su relativo menor grado de alteración y composición menos evolucionada, por su marcada estructuración interna, determinada por un bandeo muy bien definido (Fig. 2A, B y C), por planos con buzamientos muy elevados y un espaciado variable de entre 1 y 25 cm. Estas bandas muestran ligeras variaciones en las proporciones de los fenocristales (biotita, cuarzo y feldspatos) y especialmente en la textura (microcristalina o vítrea más o menos fluidal) y abundancia relativa de su matriz (especialmente en las zonas de borde) (Fig. 2D).

Desde un punto de vista estructural, el rasgo más singular de esta intrusión lo constituyen los numerosos pliegues, de escalas diversas (desde centimétrica a decamétrica), con una geometría irregular y marcadamente disarmónica, que afectan al bandeo (Fig. 2A, B y C).

A escala de muestra de mano, los cristales de biotita se disponen formando una fábrica anisótropa, planar, primaria y paralela al bandeo.

Como muestra el mapa de trayectorias del bandeo (Fig. 3), éste reproduce fielmente, el contorno de la intrusión, con desarrollo de pliegues de grandes dimensiones y de orientación general NW-SE. En el sector central destaca un pliegue más apretado que el resto, con plano axial subvertical y con la misma orientación. Por otro lado, en la zona occidental sobresale, sobre la forma elipsoidal general de la intrusión, una

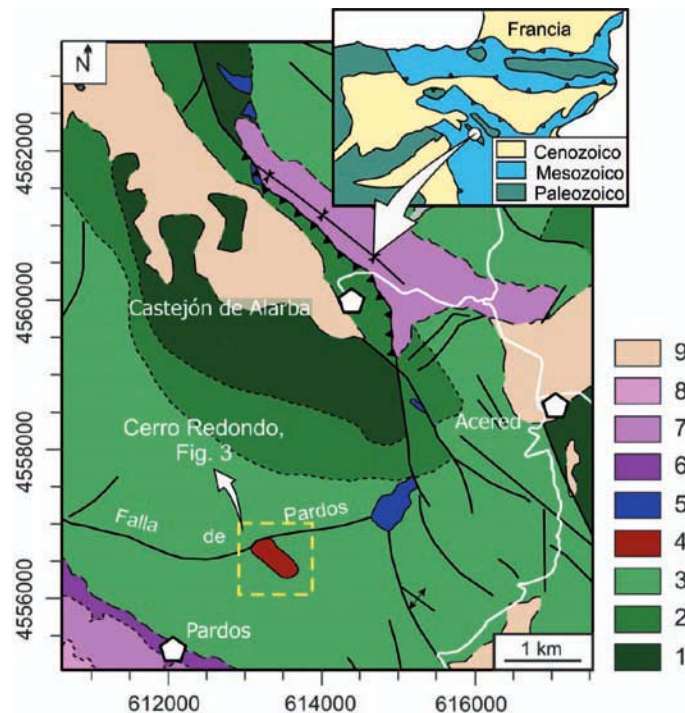


Fig. 1. Mapa geológico de situación de la intrusión de Cerro Redondo. 1: Cámbrico Medio-Superior, 2: Cámbrico-Ordovícico Inferior, 3: Ordovícico Inferior, 4: Dacitas de Cerro Redondo (Pérmico Inferior), 5: Riolitas (Pérmico Inferior), 6: Facies Buntsandstein (Triásico Inferior), 7: Facies Muschelkalk (Triásico Medio), 8: Facies Keuper (Triásico Superior), 9: Cuaternario. Modificado de Gabaldón *et al.* (1980a y b). Ver figura en color en la web.

Fig. 1. Geological map of the Cerro Redondo Intrusion. 1: Middle-Upper Cambrian, 2: Cambrian-lower Ordovician, 3: Lower Ordovician, 4: Cerro Redondo dacites (Lower Permian), 5: Rhyolites (Lower Permian), 6: Buntsandstein Facies (Lower Triassic), 7: Muschelkalk Facies (Middle Triassic), 8: Keuper Facies (Upper Triassic), 9: Quaternary. Modified from Gabaldón *et al.* (1980a y b). See Colour figure on the web.

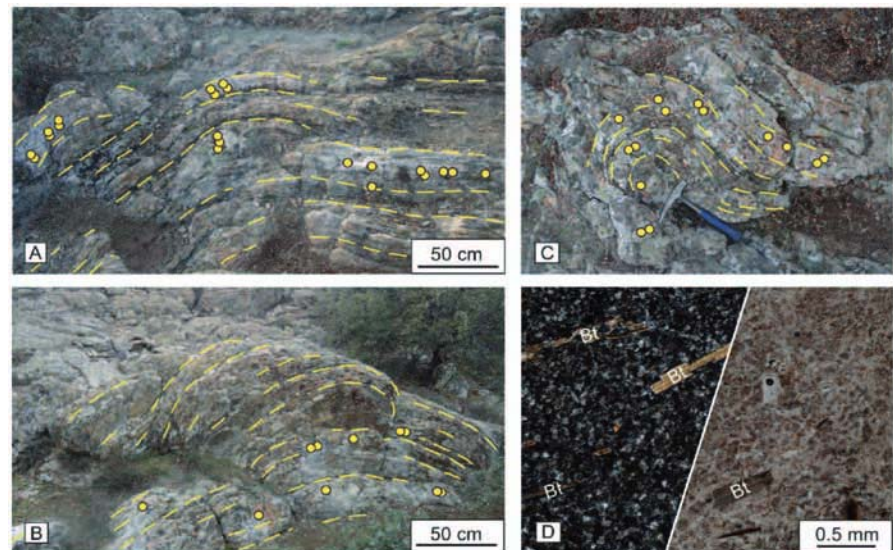


Fig. 2. A, B, C) Aspecto de campo de las estaciones muestreadas (CR-1, CR-2 y CR-3 respectivamente) para el análisis de la anisotropía de la susceptibilidad magnética. Los puntos representan la localización de algunas muestras perforadas y las líneas discontinuas, las trazas del bandeo magmático. D) Microfotografías mostrando el aspecto de la matriz microcristalina de una de las muestras: nicols cruzados (izquierda) y paralelos (derecha). Obsérvese la orientación preferente de los fenocristales de biotita (Bt). Ver figura en color en la web.

Fig. 2. A, B, C). Field aspect of the sampled sites (CR-1, CR-2 and CR-3 respectively) for the anisotropy of magnetic susceptibility analysis. Dots represent the location of some of the sampled sites and the dashed lines, the traces of magmatic foliation. D) Microphotographs showing the microcrystalline matrix of one study sample: crossed nicols (left) and parallel (right). Note the preferred orientation of biotite phenocrysts (Bt). See Colour figure on the web.

geometría semicircular, de igual composición que el resto de la intrusión.

Un aspecto destacable es la gran concentración de enclaves de pizarras encajantes en las proximidades de la Falla de Pardos (Fig. 3), cuya abundancia y tamaño decrece, de forma gradual, hacia el interior de la intrusión. Se trata de fragmentos angulosos, de tamaño milimétrico a centimétrico, con ausencia de evidencias de reacción con el magma, indicando bajas condiciones de P y T en el momento de su incorporación al mismo.

En el margen suroriental de la intrusión se encuentra una mineralización de cuarzo, de contorno también ligeramente semicircular, cuya estructuración interna no guarda relación ni con la roca encajante ni con la intrusión, y cuyo origen se relaciona con el líquido residual final del magmatismo.

### Análisis de la susceptibilidad magnética (ASM) de pliegues fluidales

La técnica basada en la medida de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) se fundamenta en la medida de la variación direccional de la susceptibilidad mag-

nética de una muestra de roca cuando ésta es sometida a un campo magnético externo de baja intensidad. Esta propiedad física se relaciona con la petrofábrica mediante el elipsoide de susceptibilidad magnética, definido por sus tres ejes principales ( $K_{max}$ ,  $K_{int}$  y  $K_{min}$ ). La posibilidad de definir la foliación magnética (superficie que contiene los ejes  $K_{max}$  y  $K_{int}$ ) y la lineación magnética (media de las orientaciones del eje  $K_{max}$ ), permite la comparación directa entre la fábrica magnética y el elipsoide de la petrofábrica.

En el caso de rocas ígneas subvolcánicas, la ASM es la técnica geofísica más eficaz para determinar tanto la dirección de flujo (en general, paralelo a las dirección de la lineación magnética) como su estructura interna (Cañón-Tapia, 2004 y referencias incluidas). Sin embargo, pocos estudios se han centrado en caracterizar la petrofábrica de este tipo de cuerpos intrusivos en los primeros momentos de su consolidación.

En este trabajo se ha realizado un estudio preliminar de la fábrica magnética, centrado en tres puntos (CR1, CR2 y CR3) del extremo NW de la intrusión donde se concentran los pliegues fluidales y donde su estado de afloramiento es especial-

mente adecuado para el muestreo a lo largo de toda la superficie plegada. En cada punto, se ha muestreado un pliegue magmático de escala métrica (CR1 y CR3) o decimétrica (CR2). En cada uno de ellos se han extraído, con ayuda de una perforadora portátil de gasolina, entre 14 y 25 muestras (de 44 a 51 especímenes de tamaño estándar por estación) a lo largo de los flancos y la charnela (Fig. 2A, B y C). Las medidas de la ASM se han realizado, con un susceptómetro KLY-3S, en el Laboratorio del Dpto. de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

En los tres casos analizados los datos direccionales de los ejes principales de los elipsoides magnéticos muestran un elevado grado de coaxialidad con los elementos de petrofábrica considerados (Fig. 4): los ejes de pliegues fluidales.

En los tres casos, la interpretación direccional de la fábrica magnética es clara, pudiéndose establecer una relación directa entre la lineación magnética (con una inmersión entre  $45^\circ$  y  $75^\circ$ ) y el eje de plegamiento (inferido a partir de su plano de movimiento) y entre el plano de movimiento de los pliegues y el definido por la dispersión de los ejes  $K_{int}$  y  $K_{min}$ . Se trata, entonces, de fábricas magnéticas "normales", al existir coaxialidad entre los elementos de la fábrica magnética y la petrofábrica (Rochette *et al.*, 1992).

### Discusión y conclusiones

La reconstrucción geométrica de cuerpos ígneos subvolcánicos y de cómo se emplazan cerca de la superficie, puede llevarse a cabo a partir de metodologías muy diferentes. En el caso de Cerro Redondo, sus reducidas dimensiones, las características petrológicas y la presencia de un gran número de estructuras primarias han permitido combinar metodologías cartográficas, petrológicas y geofísicas.

Si bien el criterio más fiable para el reconocimiento de pliegues magmáticos es el geométrico (presencia de estructuras disarmónicas con charnelas muy engrosadas y espesores muy variables de sus flancos, o trazas axiales y superficies axiales extremadamente irregulares y/o curvas), técnicas geofísicas como la basada en la medida de la ASM, permiten su análisis e interpretación cinemática y genética.

La intrusión dacítica de Cerro Redondo muestra una estructura superficial caracterizada por pliegues marcadamente irregulares de escala centimétrica a hectométrica. Estos

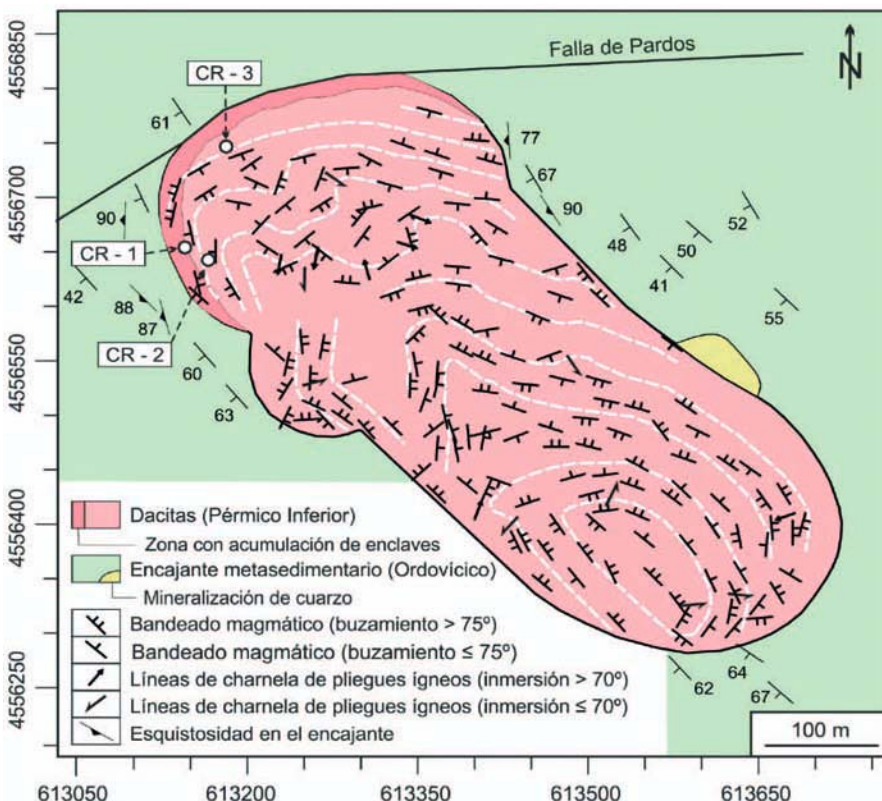


Fig. 3. Mapa de trayectorias del bandeo magmático para la intrusión de Cerro Redondo. Ver figura en color en la web.

Fig. 3. Trajectories map of the magmatic layering of the Cerro Redondo intrusion. See Colour figure on the web.

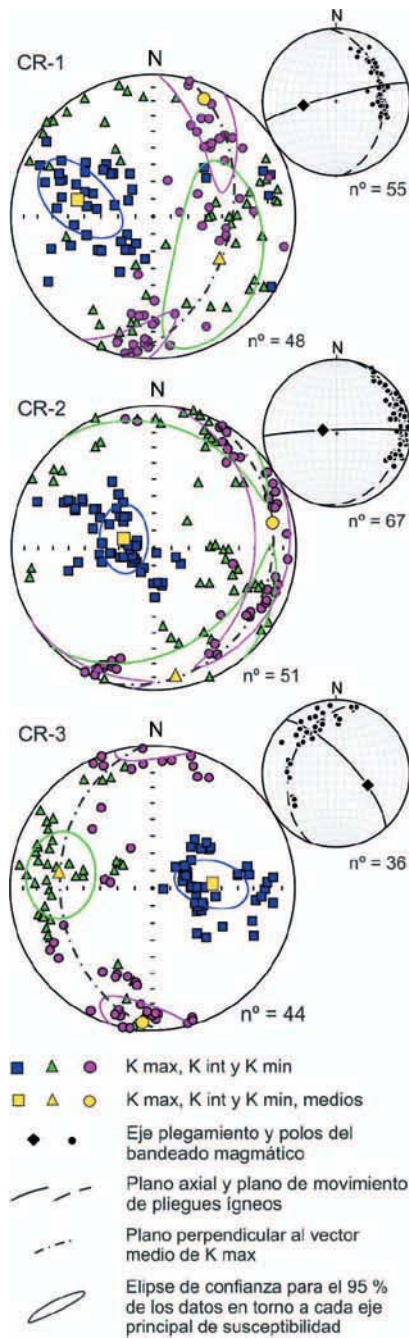


Fig. 4. Proyección estereográfica de los ejes principales de susceptibilidad (Kmax, Kint y Kmin) y de los datos estructurales para cada estación. Ver figura en color en la web.

Fig. 4. 3D sketch of the Cerro Redondo intrusión and inferred magma flow direction (white arrows). So: bedding of host palaeozoic. See Colour figure on the web.

pliegues magmáticos afectan a un bandeo determinado por diferencias petrográficas texturales, lo que indica una génesis temprana de dicha anisotropía planar (pre-plegamiento) y en condiciones de elevada ductilidad del magma, previamente a su enfriamiento. Entonces, dicho bandeo debe tener un carácter primario y debió producirse como respuesta a sucesivos pulsos que generaron un emplazamiento progresivo del magma.

Además del carácter disarmónico de los pliegues analizados, su fábrica magnética también demuestra su carácter magmático. Considerando el paralelismo, demostrado en numerosos trabajos, entre la lineación magnética y la dirección de flujo ígneo (Cañón-Tapia, 2004, entre otros), es posible inferir, para los casos estudiados, un flujo subvertical del magma evidenciado por la coincidencia entre las orientaciones de la lineación magnética (con valores de su inmersión superiores a 70°) y la de los ejes de los pliegues ígneos (Fig. 4).

La combinación de los datos cartográficos, petrológicos y de la fábrica magnética de pliegues ígneos, permite proponer un modelo de emplazamiento para la intrusión de Cerro Redondo compatible con un flujo de magma vertical, en relación a una única fractura principal (Falla de Pardos) que limita el cuerpo por su extremo NW, y su expansión lateral, subhor-

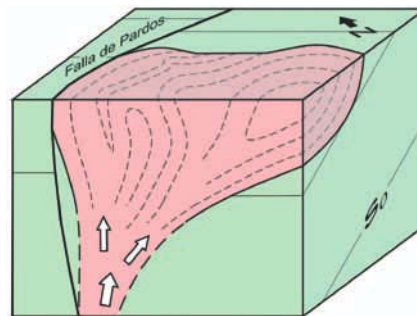


Fig. 5. Reconstrucción tridimensional de la intrusión de Cerro Redondo con indicación de la dirección de flujo ígneo (flechas blancas). So: estratificación del encajante paleozoico. Ver figura en color en la web.

Fig. 5. 3D sketch of the Cerro Redondo intrusión and inferred magma flow direction (white arrows). So: bedding of host palaeozoic. See Colour figure on the web.

izional, condicionada por la fábrica sedimentaria del encajante paleozoico (Fig. 5). Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de combinar la información cartográfica con la procedente del análisis de la fábrica magnética a la hora de interpretar modelos de emplazamiento en litotipos ígneos altamente diferenciados, donde los marcadores convencionales de petrofábrica no existen o son escasos.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Grupo de Investigación Geotransfer. Los autores agradecen a los revisores anónimos por los comentarios y observaciones realizadas.

### Referencias

Cañón-Tapia, E. (2004). Geological Society, London, Special Publications, 205-226.

Carls, P. (1983). En: Libro Jubilar J.M. Ríos, V. III. IGME, Madrid, 11-32.

Gabaldón, V., Del Olmo, P. y Portero, J.M. (1980a). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 464 (Used) y memoria*. IGME, Madrid, 74 p.

Gabaldón, V., Hernández, A., Del Olmo, P. y Aragónés, E. (1980b). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 437 (Ateca) y memoria*. IGME, Madrid, 67 p.

Lago, M., Arranz, E., Pocovi, A., Galé, C. y Gil-Imaz, A. (2004) En: *Permo-Carboniferous magmatism and rifting* (M.Wilson, E.R. Neumann, G. Davies, M.Timmermann, M. Heeremans y B.T. Larsen, Eds.). Geological Society of London Special Publication 223, 465-491.

Lago, M., Gil, A., Arranz, E., Galé, C. y Pocovi, A. (2005). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229 (1-2), 83-103.

Lotze, F. (1929). *Publicaciones Extranjeras sobre la Geología de España* 8, 1-315.

Majarena, U., Lago, M. y Galé, C. (2017). *Geogaceta* 61, 111-114.

Roquette, P., Jackson, M. & Aubourg, C. (1992). *Reviews of Geophysics* 30, 209-226.