

Influencia del grado metamórfico en la densidad de las rocas metasedimentarias paleozoicas de los Pirineos Centrales

Influence of the metamorphic grade on the density of Palaeozoic metasedimentary rocks of the Central Pyrenees

Pilar Clariana^{1*}, Iban Salgado², Ruth Soto¹, Aina Margalef³, Esther Izquierdo-Llavall¹, Tania Mochales¹, Emilio L. Pueyo¹ y Conxi Ayala⁴

¹ IGME, Unidad de Zaragoza, Campus de Aula Dei, Avda. Montañana, 1005, 50059, Zaragoza. p.clariana@igme.es

² Departamento de Geología, Universidad de Granada, Av. de Fuente Nueva, s/n, Beiro, 18071, Granada. ivansalgado99@gmail.com

³ Andorra Research + Innovation, AD600; Sant Julià de Lòria, Andorra. amargalef@ari.ad

⁴ Geosciences Barcelona, CSIC, Barcelona, Spain. cayala@geo3bcn.csic.es

*Corresponding author

ABSTRACT

Systematic sampling of Palaeozoic metasedimentary rocks in a sector of the central Pyrenees has been carried out within the framework of two projects focused on the geophysical investigation of potential fields. This sampling, whose objective was the study of petrophysical properties, has allowed the analysis of rock density data obtained from 290 samples. At the same time, the density variation has been analysed as a function of the metamorphic grade of each lithostratigraphic units and the protolith composition. The results show that the High-Temperature and Low-Pressure (HT-LP) metamorphism in the area influenced the rock density, generally producing an increase in density with respect to that of the protolith.

Key-words: density, metamorphism, metasedimentary rocks, central Pyrenees.

RESUMEN

En el marco de dos proyectos centrados en la investigación geofísica de campos potenciales se ha llevado a cabo el muestreo sistemático de las rocas metasedimentarias paleozoicas de un sector de los Pirineos centrales. Este muestreo, cuyo objetivo era el estudio de las propiedades petrofísicas, ha permitido el análisis de los datos de densidad de las rocas obtenidos a partir de 290 muestras. A su vez, se ha analizado la variación de esta propiedad en función del grado metamórfico que afecta a las unidades litoestratigráficas y de la composición inicial de las mismas. Este estudio ha puesto de manifiesto que el metamorfismo de Alta temperatura y baja presión (AT-BP) existente en la zona influye en la densidad de las rocas produciendo, generalmente un aumento de la misma con respecto a la del protolito.

Palabras clave: densidad, metamorfismo, Rocas metasedimentarias, Pirineos centrales.

Geogaceta, 77 (2025), 47-50

<https://doi.org/10.55407/geogaceta108697>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 15/07/2024

Fecha de revisión: 30/10/2024

Fecha de aceptación: 29/11/2024

Introducción

El análisis de las propiedades petrofísicas es fundamental para disminuir las incertidumbres en la investigación geofísica de campos potenciales. Dentro de los campos potenciales, la gravimetría es una técnica de gran utilidad para inferir la geometría en profundidad de cuerpos y estructuras geológicas (e.g. Clariana et al., 2022, Soto et al., 2022), ya que las variaciones gravimétricas son debidas, entre otros factores, a los cambios laterales y en profundidad de la densidad de las rocas en el subsuelo (Rubio et al., 2021 y referencias allí incluidas).

En este trabajo se ha llevado a cabo el muestreo sistemático de las rocas que afloran en un sector de los Pirineos centrales (Fig. 1) para el estudio de sus propiedades petrofísicas (densidad y susceptibilidad magnética). El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de los datos de densidad obtenidos a par-

tir del muestreo de las rocas meta-sedimentarias paleozoicas que afloran en el área de estudio y analizar la influencia del grado metamórfico en la variación de la densidad de las rocas metasedimentarias con respecto a la densidad de sus protolitos. La caracterización detallada de las variaciones de densidad permitirá obtener modelos mucho más precisos de la arquitectura del subsuelo en la Zona Axial pirenaica.

Contexto Geológico

El área de estudio se localiza en la parte centro-oriental de la Zona Axial pirenaica, desde el Granito de La Maladeta al oeste hasta el Macizo de Andorra-Mont Louis al este (Fig. 1). La Zona Axial pirenaica constituye las partes más internas de los Pirineos y conforma el eje de la cordillera. Los Pirineos son una cordillera orogénica Alpina, asimétrica de dirección E-O y de doble vergencia, en la

cual los cabalgamientos alpinos vergentes al sur, provocaron el levantamiento y exhumación de las rocas pre-cámbricas y paleozoicas de la Zona Axial (Muñoz, 1992). Estas rocas se encuentran, además, afectadas por la deformación y metamorfismo varisco previos (García-Sansegundo, 2004). En general, las estructuras variscas y alpinas muestran una orientación E-O y una vergencia generalizada hacia el sur. Las estructuras variscas se caracterizan esencialmente por pliegues muy apretados a todas las escalas y foliación asociada con marcado buzamiento hacia el norte. Los cabalgamientos alpinos, también con buzamiento hacia el norte, pueden cortar o reactivar estructuras variscas previas (Poblet, 1991).

En la zona de estudio, las rocas metasedimentarias paleozoicas están afectadas por metamorfismo de alta temperatura (AT) y baja presión (BP) relacionado con intrusiones ígneas en diferentes niveles de la corteza. Según el tipo, geometría y vo-

lumen de las rocas ígneas que intruyen y el nivel cortical en que lo hacen, Autran et al. (1970) diferenciaron tres tipos de intrusiones: (i) intrusiones en macizos inferiores, (ii) intrusiones en macizos intermedios e (iii) intrusiones en macizos superiores. En la zona de estudio estarían representados los dos últimos tipos. El segundo tipo estaría relacionado con granitos calco-alcalinos emplazados en forma de sills en niveles intermedios de la corteza, afectando a rocas en facies anfibolita como por ejemplo el Granito de Bossost, localizado en el Domo del Garona (Fig. 1). El tercer tipo estaría representado por los grandes complejos plutónicos destacando La Maladeta o Andorra-Mont Louis que se localizan en la parte superior de la corteza y que desarrollaron aureolas de metamorfismo de contacto (Fig. 1).

Metodología

Se han estudiado más de 150 estaciones realizando un total de 290 medidas de densidad en rocas metasedimentarias paleozoicas del sector estudiado de la Zona Axial. Los análisis se han realizado

a partir de muestras de roca fresca recogidas en el campo y representativas de todas las rocas que afloran en la zona estudiada. Se han agrupado en cinco unidades litológicas en función del tipo de material y edad; (1) pizarras y cuarcitas del Cambro-Ordovícico, (2) pizarras del Silúrico, (3) calizas y pizarras devónicas, (4) rocas siliciclásticas del Carbonífero pre-Estefaniense, y (5) rocas volcánicas y volcano-sedimentarias del Estefaniense-Pérmico (Fig. 2a). El muestreo se realizó a lo largo de seis transectas N-S (Fig. 1), aproximadamente perpendiculares a la dirección general de las estructuras, muestreando todas las unidades atravesadas a lo largo de éstas y procurando obtener al menos dos muestras por cada afloramiento de entre 1 y 4 kg de peso. Las medidas de densidad se realizaron en los laboratorios del IGME-CSIC sobre muestras irregulares no meteorizadas y acabadas con corte de sierra. El método utilizado fue el de la doble pesada siguiendo la norma (standard UNE-EN, 1936, p. 2007) y obteniendo el valor de la densidad aparente para cada una de ellas con una incertidumbre de $\pm 3-4 \text{ kg/m}^3$.

Resultados

Los valores de densidad obtenidos se han representado sobre un mapa geológico mediante intervalos de frecuencia escogidos de manera automática por el software Qgis. Un total de ocho intervalos desde cero a 4397 kg/m^3 abarcan todos los valores de densidad obtenidos (Fig. 3). Los valores medios de densidad más elevados corresponden a las rocas del Cambro-Ordovícico (2673 kg/m^3) y del Devónico (2693 kg/m^3), el Silúrico sería la unidad que presenta rocas menos densas con una media de 2479 kg/m^3 (Fig. 2). El rango de los valores de densidad es bastante variable en todas las unidades destacando con rangos más amplios el Silúrico ($2042 - 2744 \text{ kg/m}^3$) y el Devónico ($2412 - 3031 \text{ kg/m}^3$). Por otra parte, el Estefaniense - Pérmico muestra un amplio rango, pero esto es debido a una sola muestra correspondiente a una roca volcánica que se distancia mucho de la media de esta unidad presentando un valor de 4397 kg/m^3 (Fig. 2). Las muestras correspondientes a los intervalos de mayor valor (representadas en el mapa de la figura 3 en colores azules más oscuros) se localizan en muchos casos en las áreas afectadas por metamorfismo. Estas corresponden tanto a las aureolas de metamorfismo de los grandes complejos graníticos, como la Maladeta o Andorra-Mont Louis, como a las áreas de rocas en facies anfibolita afectadas por metamorfismo de AT y BP, como el granito de Bossost o las zonas metamórficas de los alrededores de los Domos gnésicos del Aston y del Hospitalet. En el caso de las unidades del Cambro-Ordovícico, Silúrico y Devónico se puede observar que las muestras que presentan un valor de densidad por encima de la media (entre 2750 y 3050 kg/m^3 en el caso del Cambro-Ordovícico y Devónico; y entre 2650 y 2750 kg/m^3 en el Silúrico) se corresponden en su mayoría con las muestras localizadas en zonas metamórficas de grado medio-alto (Fig. 3). Sin embargo, se han registrado muestras procedentes de rocas cambro-ordovícicas localizadas en las proximidades del Domo gnésico del Aston y afectadas por metamorfismo de grado alto (zona sillimanita) que presentan valores de densidad cercanos a la media (entre 2700 y 2750 kg/m^3).

Por otra parte, las rocas muestreadas en este trabajo presentan un alto grado de deformación. En este sector de la Zona Axial, se han descrito tres eventos de de-

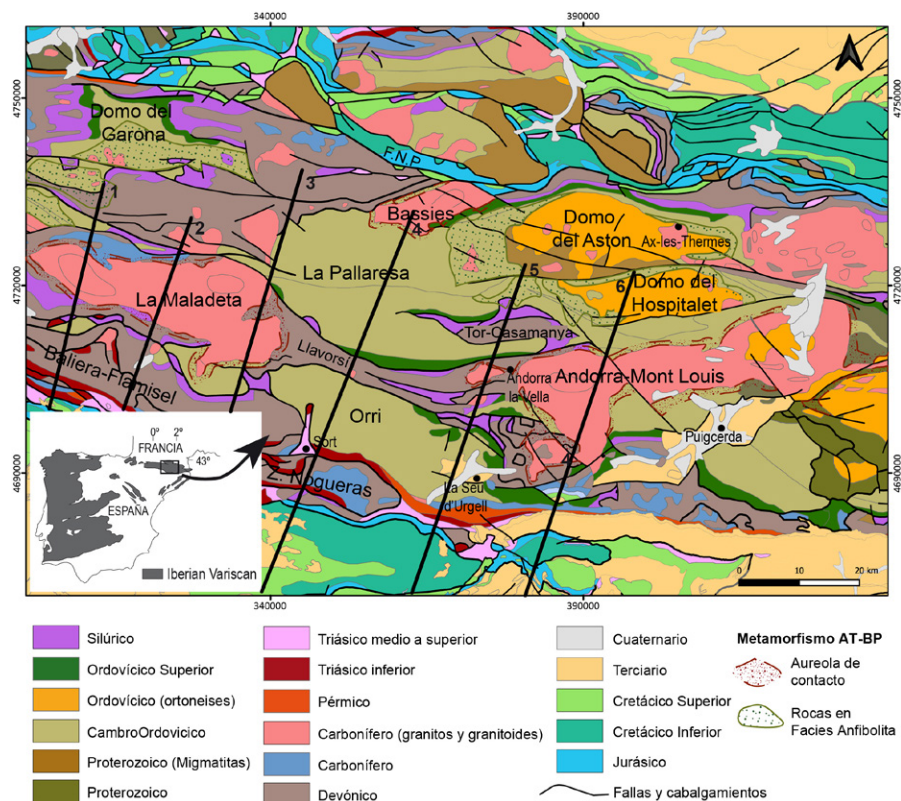


Fig. 1.- A) Mapa geológico esquemático del área de estudio, localizada en el sector central de la Zona Axial pirenaica (modificado de Ternet et al. 2008), localización de las seis transectas muestradas y afloramientos Variscos de la Península Ibérica. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 1.- Geological sketch of the study area located in the central sector of Pyrenean Axial Zone modified from Ternet et al. (2008), location of the six sampled transects and Variscan outcrops in the Iberian Peninsula. See color figure in the online version

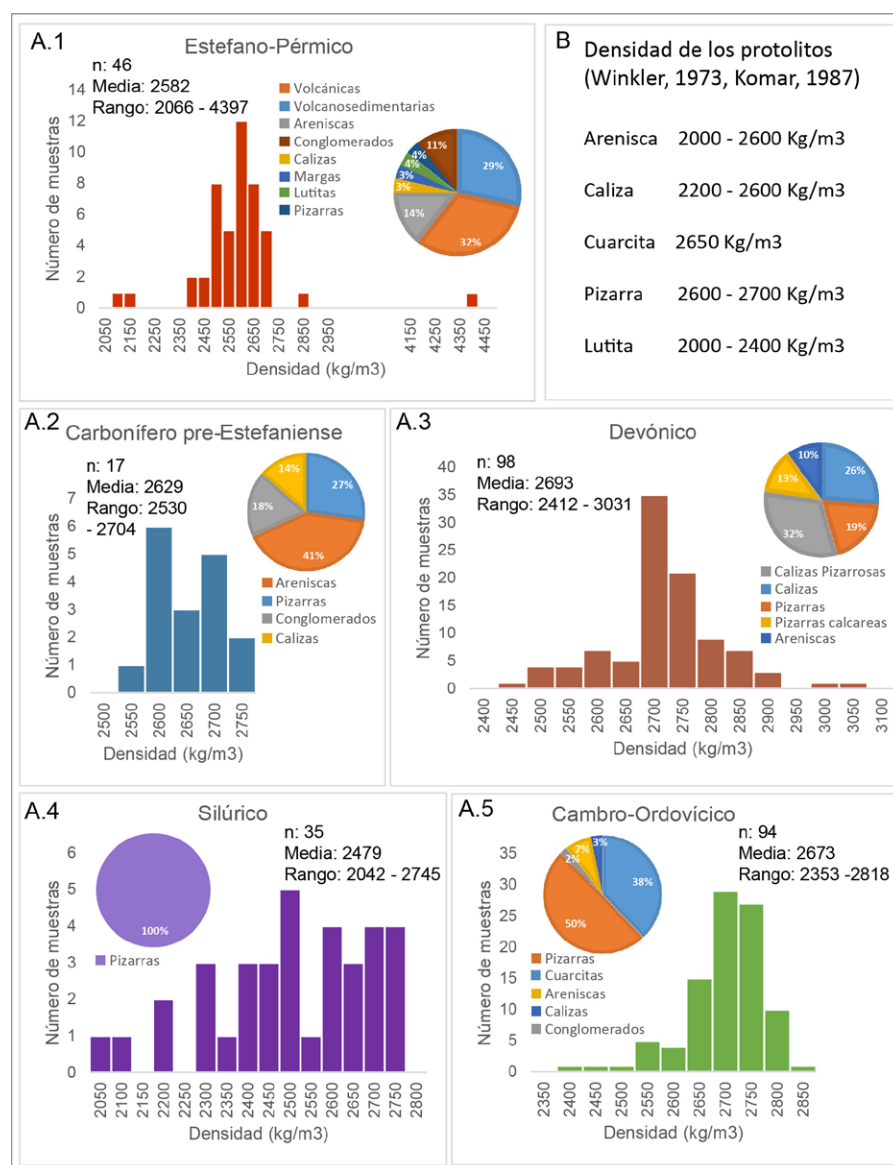


Fig. 2.- A) Histogramas de las unidades metasedimentarias diferenciadas en la zona de estudio y diagramas de litologías para cada unidad B) Valores bibliográficos de densidad de los protolitos estudiados en este trabajo. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 2.- A) Histograms of the differentiated metasedimentary units in the study area and lithology diagrams for each unit. B) Bibliographic density values of the protoliths studied in this work. See color figure in the online version.

formación varisca (García-Sansegundo et al., 2011), en todos ellos se produce el desarrollo de foliaciones tectónicas asociadas a pliegues, generalmente de dirección E-O, en el caso de los dos primeros. En el segundo episodio se originaron también cabalgamientos de orientación E-O y sentido de movimiento hacia el sur. Finalmente, el tercer evento se restringe a las zonas circundantes a los domos (fig. 1) donde se desarrollan bandas de cizalla dúctil. Esta intensa deformación afecta a todas las unidades metasedimentarias diferenciadas en este trabajo a excepción de las rocas estefano-pérmicas. Las foliaciones muestran mayor penetratividad cuando afectan a rocas pizarrosas que

cuando se desarrollan sobre rocas cuarcíticas o carbonatadas.

Discusión

A la vista de los resultados obtenidos en este trabajo se puede considerar que, en general, las rocas metamórficas presentan valores de densidad más altos que las mismas rocas con un grado de metamorfismo más bajo o no metamorfizadas. La densidad aparente de las rocas depende de la porosidad total de la muestra específica, por lo que tipos de rocas similares pueden tener un amplio rango de densidad aparente debido a las diferencias en la porosidad (Woessner y

Poeter 2020). En el caso de las rocas metasedimentarias objeto de estudio hay que tener en cuenta que su densidad está influenciada por la composición y densidad del protolito, y por el grado de metamorfismo. La composición del protolito condiciona los minerales metamórficos que se forman, por ejemplo, aquellos minerales que contienen hierro, como pirita, magnetita y hematites, tienen densidades muy altas de más de 4000 kg/m³ y por otra parte el cuarzo y el feldespato presentan densidades de 2650 y 2560 kg/m³ respectivamente (Woessner y Poeter, 2020), mientras que los minerales propios del metamorfismo de AT y BP como la andalucita, sillimanita o granate tienen densidades entre 3200 y 3500 kg/m³.

Así pues, esto podría explicar que las cuarcitas y pizarras cambro-ordovícicas del suroeste del Domo gnéisico del Aston afectadas por metamorfismo de grado alto (zona sillimanita) han sufrido una intensa recrystalización que dio lugar esencialmente a cuarzo y sillimanita fibrosa y por lo tanto no presentan una densidad excesivamente alta. Además de la influencia del metamorfismo, en la zona estudiada hay que tener en cuenta la posible influencia de otros factores sobre los valores de densidad de estas rocas. Por una parte, la variabilidad litológica de algunas de las unidades metasedimentarias descritas (fig. 2A y B) influirá también en una respuesta variable bajo las mismas condiciones metamórficas. Otro factor a tener en cuenta en la zona estudiada es que las rocas presentan una intensa foliación tectónica la cual podría influir en la densidad de las mismas. La deformación de las rocas puede producir por una parte un reordenamiento de los minerales en función de la dirección del máximo esfuerzo, generando anisotropías planares, lineales, etc. Esta reordenación en principio podría considerarse como favorecedora para reducir la porosidad inicial de la roca, aunque por otra parte también supone el desarrollo de superficies de discontinuidad que podrían actuar en sentido contrario. En las rocas silíceas, por ejemplo, su naturaleza esencialmente pizarrosa favorece su actuación como nivel de despegue, por lo que se encuentran en muchas ocasiones muy tectonizadas o influenciadas por las condiciones de deformación asociada a planos de fallas y cabalgamientos, lo que podría provocar ese amplio rango de densidad reflejado en su histograma.

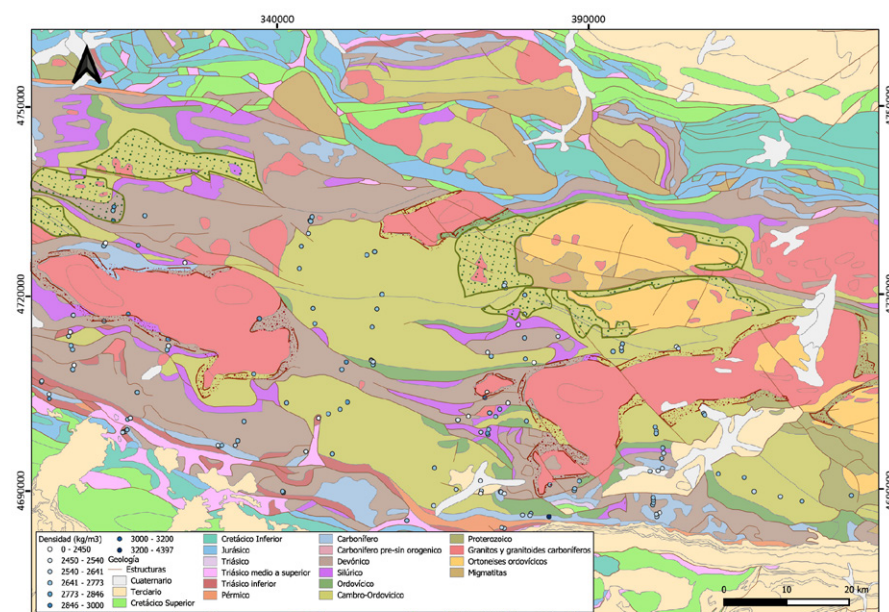


Fig. 3.- Mapa de localización geográfica de las muestras estudiadas representadas sobre las unidades litoestratigráficas y las zonas y aureolas metamórficas. Se han representado por intervalos de densidad desde los colores blancos para los valores de densidad más bajos hasta el azul oscuro que representa los valores de densidad mayores. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 3.- Geographical location map of the studied samples represented on the lithostratigraphic units and metamorphic zones and aureoles. They are represented by density intervals from white for the lowest density values to dark blue for the highest density values. See color figure in the online version.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que el metamorfismo de AT y BP que afectó a las rocas de este sector de los Pirineos centrales influyó en la densidad de las rocas afectadas, produciendo generalmente un aumento de la misma. A su vez, para poder caracterizar de manera precisa la influencia del metamorfismo sobre la densidad de las rocas es necesario un estudio mucho más detallado del mismo, con muestreos sistemáticos en las zonas y aureolas metamórficas desde las zonas de menor a mayor grado metamórfico y para cada una de las unidades que afloran en la zona.

Contribución de los autores

P. Clariana: Estructura del trabajo, metodología, adquisición de datos, edición figuras, investigación/análisis, coordinación.

I. Salgado, R. Soto, C. Ayala: edición de figuras, investigación/análisis, revisión del manuscrito.

A. Margalef, E. Izquierdo, T. Mochales,

E. Pueyo: adquisición de datos, revisión del manuscrito.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto PID2020-114273GB-C22 financiado por MCIN/AEI-/10.13039/501100011033 del Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades. Este estudio representa una contribución al grupo de investigación GeoAp (E01-23R) (Gobierno de Aragón). Los autores del trabajo forman parte de la Conexión Geociencias para un Planeta Sostenible (CSIC-HUBS).

Se agradecen las aportaciones de los dos revisores anónimos que mejoran el texto original.

Referencias

Autran, A.; Fontelles, M. y Guitard, G. (1970). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7 (12), 673- 731.
Clariana, P., Soto, R., Ayala, C., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel T., Oli-

va-Urcia B., et al. (2022). *International Journal of Earth Sciences*.

<https://doi.org/10.1007/s00531-021-02137-2>

García-Sansegundo, J. (2004). *Estructura varisca en los Pirineos*, En: *Geología de España* (J. Vera, Ed.); SGE-IGME. Madrid. 254 – 258.

García-Sansegundo, J., Poblet, J., Alonso, J.L., y Clariana, P. (2011) In: *Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts* (J. Poblet and R.J. Lisle, Eds), 349. Geological Society Special Publications, London, 169–184.

<https://doi.org/10/fpbwjx>

Komar, P.D. (1987). *Journal of Sedimentary Research*, 57(2), 203 – 211.

<https://doi.org/dvrspx>

Muñoz, J. A. (1992). En: *Thrust Tectonics*, (McClay, K.R. Ed.). Chapman & Hall, London, 235 – 246.

Poblet, J. (1991). *Estructura herciniana i alpina del Vessant sud de la zona Axial del Pirineu Central*. Tesis doctoral, Univ. de Barcelona, 604 pp. Inédita.

Rubio, F.M., Rey-Moral, C., Ayala, C. y Pueyo, E.L. (2021). *Bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica. Petrofísica y modelización gravimétrica 2d y 3d*. Publicaciones IGME-CSIC, Madrid, 149 p.

Soto, R., Clariana, P., Ayala, C., Rey-Moral, C., Casas-Sainz, A. M., Román-Berdiel, T., et al. (2022). *Tectonics*, 41, e2021TC007009.

<https://doi.org/10.1029/2021TC007009>

Ternet, Y., Baudin, T., Laumonier, B., Barnolas, A., Gil-Peña, I. y Martín Alfageme, S. (2008). *Carte Géologique des Pyrénées à 1:400000 / Mapa geológico de los Pirineos a escala 1:400000*. IGME-BRGM.

UNE-EN-1936. (2007). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038621>

Winkler, E.M. (1973). *Properties, Durability in Man's Environment*. Springer, Vienna, 230 p.

Woessner, W. y Poeter, P. (2020). *Hydrogeology properties of Earth materials and principles of groundwater Flow*. The groundwater Project, Ontario, 205 p.