

Patrones de ventilación estacional en Cueva Larga (Sierra de los Filabres, Almería, SE España)

Seasonal ventilation patterns in Larga cave (Sierra de los Filabres, Almería, SE Spain)

Elvira Ruiz-Caballero^{1,*}, Fernando Gázquez^{1,2}, Ángel Fernández-Cortés^{1,2} y José María Calaforra^{1,2}

¹Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. Crta de Sacramento sn. La Cañada de San Urbano. 04120. Almería. España. erc250@ual.es; f.gazquez@ual.es; acortes@ual.es; jcalafor@ual.es

²Centro Andaluz para el Cambio Global – Hermelindo Castro. Edificio CITE V, Universidad de Almería, 04120 Almería, España.

*Corresponding author

ABSTRACT

Speleothems are useful archives for paleoclimate reconstructions. However, environmental monitoring of cave atmosphere is necessary to understand underground ventilation dynamics, ensuring accurate interpretation of geochemical results obtained from stalagmites. This study focuses on the environmental monitoring of Cueva Larga (Sierra de los Filabres, Almería). Both the external (rainfall and temperature) and the in-cave atmosphere (temperature, relative humidity, CO₂, CH₄ and ²²²Rn contents) were monitored over a one-year period. The cave was highly ventilated over the monitoring period, as shown by relatively low levels of ²²²Rn (~ 160 Bq/m³) and CO₂ (~ 490 ppm). However, we observed that intervals of less ventilation occur (²²²Rn up to 300 Bq/m³), coinciding with high relative humidity conditions. This is due to the low convective air circulation and the partial saturation of fractures in the cave ceiling, resulting in decreased exchange of gases with the exterior.

Keywords: cave monitoring, cave ventilation, radon, methane.

RESUMEN

Los espeleotemas son una herramienta útil para investigar el clima del pasado. Sin embargo, la monitorización ambiental de la atmósfera de las cuevas es fundamental para una mejor interpretación de los resultados geoquímicos de estalagmitas. Este estudio se centra en la monitorización ambiental de Cueva Larga (Sierra de los Filabres, Almería). Se ha monitorizado tanto el ambiente exterior (lluvia y temperatura) como la atmósfera interna de la cueva (temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, CH₄ y ²²²Rn) durante un periodo de un año. La tasa de ventilación fue relativamente alta durante todo el año, tal y como indican los valores bajos de ²²²Rn (~ 160 Bq/m³) y CO₂ (~ 490 ppm) del aire. Sin embargo, se observan periodos donde la ventilación es relativamente baja, caracterizada por valores elevados de ²²²Rn y alta humedad relativa del aire subterráneo. Esto se debe a la baja circulación convectiva del aire en estos periodos y a que las fracturas del techo de la cavidad se saturan parcialmente con agua, reduciéndose así el intercambio de gases con el exterior.

Palabras clave: monitorización de cuevas, ventilación de cuevas, radón, metano.

Geogaceta, 76 (2024), 67-70

<https://doi.org/10.55407/geogaceta104506>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 10/02/2024

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

Introducción

Los espeleotemas son una pieza fundamental de los estudios paleoclimáticos actuales. Los isótopos estables de oxígeno y carbono del carbonato espeleotémico se pueden utilizar para reconstruir las condiciones hidroclimáticas y las temperaturas ambientales en el momento de su formación (McDermott, 2004). Sin embargo, la interpretación de la señal isotópica es compleja, ya que depende de factores externos como la localización geográfica, así como de factores internos como la morfología de la cavidad, la fracturación de la roca o la ventilación de la atmósfera interna (Mattey *et al.* 2015).

El sur de la península Ibérica presenta un gran interés desde el punto de vista paleoclimático, ya que es muy susceptible a cambios climáticos tanto globales como regionales (Martegani *et al.*, 2023; Gar-

cía-Alix *et al.*, 2022). Las series paleoclimáticas obtenidas a partir de espeleotemas, aun escasas en esta región, contribuirán a mejorar el conocimiento sobre el clima del pasado en el Mediterráneo occidental. Entender las características y dinámica de la atmósfera subterránea, así como las interacciones químicas entre el aire, el agua y la roca, puede facilitar las interpretaciones de las series geoquímicas obtenidas a partir de espeleotemas. Por ejemplo, el grado de ventilación de la atmósfera subterránea y su estacionalidad afectan a la tasa de precipitación de la calcita en las cuevas (Kowalczyk and Froelich, 2010), favoreciendo intervalos de mayor y menor crecimiento espeleotémico.

En este trabajo se investiga la estacionalidad en la ventilación de una cavidad kárstica en el sudeste ibérico, cuyos espeleotemas están siendo estudiados para reconstruir el paleoclima de esta región.

Área de estudio y descripción de la cueva

Cueva Larga se localiza en el área central de la Sierra de los Filabres, al sureste de la península Ibérica (Fig. 1A). Su entrada se encuentra a 1985 m. s.n.m. La cavidad se desarrolla en rocas carbonatadas (calizas y dolomías) del Triásico, pertenecientes a la formación superior del Complejo Alpujárride (Navarro Vázquez y Velendo Muñoz, 1979). Estas rocas presentan cierto grado de recristalización y pueden llegar a alcanzar los 300 m de potencia. La formación yace sobre una serie de filitas y cuarcitas permo-triásicas pertenecientes al mismo Complejo Alpujárride, que están afectadas por la tectónica extensional del Mioceno (Martínez-Martínez and Azañón, 2002). En algunas zonas del entorno esta tectónica puede afectar también a las rocas carbonatadas.

El clima en el entorno de la cavidad es de estepa fría según la clasificación de Köppen-Geiger (Chazarra Bernabé *et al.*, 2022) con temperaturas medias anuales en torno a 15 °C y precipitaciones poco abundantes, 170 mm/año de media en el periodo 2013-2023 (datos de estación meteorológica de la Sierra de los Filabres). La vegetación sobre la superficie de la cueva es escasa y los suelos son poco desarrollados, predominando el afloramiento de carbonatos con formas exokársticas.

La entrada de la cavidad está orientada hacia el sureste y da acceso a la sala principal a través de un pasaje descendente. Las galerías inferiores pueden alcanzar una profundidad de 45 m por debajo de la entrada, mientras que las superiores se encuentran a una altura máxima de 5 m por encima de la misma (Fig. 1B). La sala de los Gours localizada al noreste presenta un

espesor de roca del techo de unos 5 m. En el interior de la cueva se observan numerosos desprendimientos, que en ocasiones dificultan el paso a través de las galerías. Asimismo, se observan abundantes espeleotemas, incluyendo coladas, estalagmitas y estalactitas.

Metodología

En este estudio se ha monitorizado la temperatura, la humedad relativa y la concentración de los siguientes gases de aire del interior de la cavidad: radón (²²²Rn), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), entre el 14 de noviembre de 2022 y el 19 de diciembre de 2023. La estación de monitorización se instaló en las galerías superiores (Punto 1 en la Fig. 1B), en una zona elevada en la Sala de los Gours.

Las medidas de temperatura y humedad relativa (HR) se llevaron a cabo mediante un termo-higrómetro Tinytag TGP-4500 (< 0,01 °C y 0,1%, respectivamente) con una cadencia horaria. Para determinar la concentración de ²²²Rn se utilizó un monitor Corentium Plus que mide en continuo mediante espectrometría alfa (*passive radon diffusion chamber*) las fluctuaciones en la concentración del ²²²Rn, con un intervalo de registro de una hora y en un rango de 0 a 1000 pCi/L, con una precisión <9 % a 2.5 - 6.0 pCi/L y <6 % a >6.0 pCi/L. La concentración CO₂ también fue registrada cada hora con un monitor CO2log de Goodsell Systems, equipado con sensor NDIR con un rango de medición 400 ppm - 10.000 ppm y precisión +/- 30 ppm. El CO₂ a su vez, también fue medido junto a la concentración de CH₄ a partir de muestras de aire tomadas en bolsas Ritter de 1 litro durante muestreos puntuales en 4 localizaciones en el interior de la cavidad (Fig. 1B) y 2 puntos en el exterior. La concentración de los gases se determinó con un analizador Picarro G2201-i con una precisión de 200 ppb + 0.05 % de la medida (¹²C) y 10 ppb + 0.05 % de la medida (¹³C), en el caso del CO₂, y 5 ppb + 0.05 % de la medida (¹²C) y 1 ppb + 0.05 % de la medida (¹³C), en el caso CH₄.

Los datos de temperatura del exterior proceden de la página web de la estación meteorológica del Observatorio Astronómico de Calar Alto (www.caha.es), a 4,2 km de distancia de la cueva y la estación meteorológica de Sierra de los Filabres (www.redhidrosurmedioambiente.es), a 10 km de distancia (Fig. 1A).

Resultados

Temperatura y humedad relativa

La temperatura en la estación 1 osciló entre 10,2 y 14,2 °C, mientras que la temperatura del exterior varió entre 33 °C, alcanzados en julio y -8 °C, registrados en enero (Fig. 2A).

Desde el punto de vista térmico se puede distinguir tres situaciones: (1) periodos en los que la temperatura del interior es mayor a la temperatura del exterior, generalmente durante los meses de invierno; (2) periodos en los que la temperatura del interior es inferior a la temperatura del exterior, principalmente durante los meses de verano, y (3) periodos en los que ambas temperaturas presentan valores similares, que corresponden a la transición

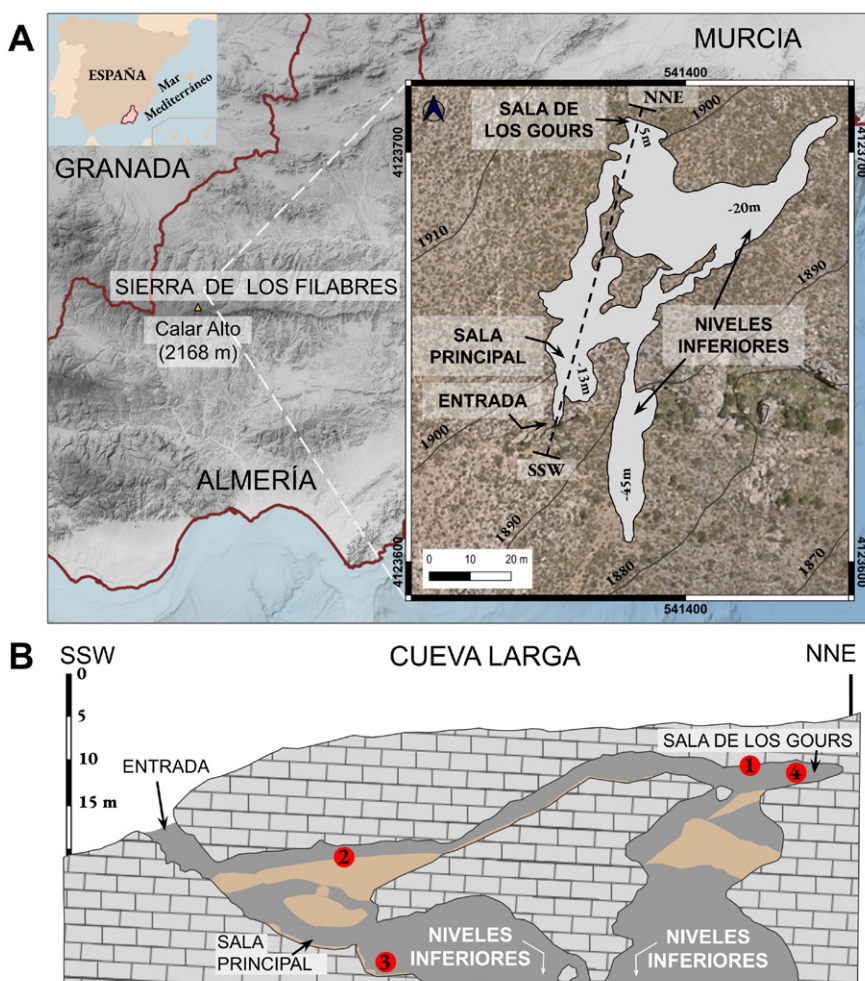


Fig. 1.- A. Localización de Cueva Larga y mapa en planta. B. Perfil de la cavidad. Los puntos indican las zonas donde se muestreó (2-4) y se monitorizó en continuo (1). Las áreas de color marrón indican zonas de desprendimientos. La topografía de la cueva ha sido proporcionada por J.A. Hita Segura (Sección Espeleológica del C.A.M, 1990).

Fig. 1.- A. Cave localization. The expanded map represents the layout of the topographic map. B. Cavity profile. The points indicate the areas where sampling (2-4) and continuous monitoring (1) was carried out. The lighter shaded areas indicate collapses. The cave topography has been provided by J.A. Hita Segura (Sección Espeleológica del C.A.M, 1990)

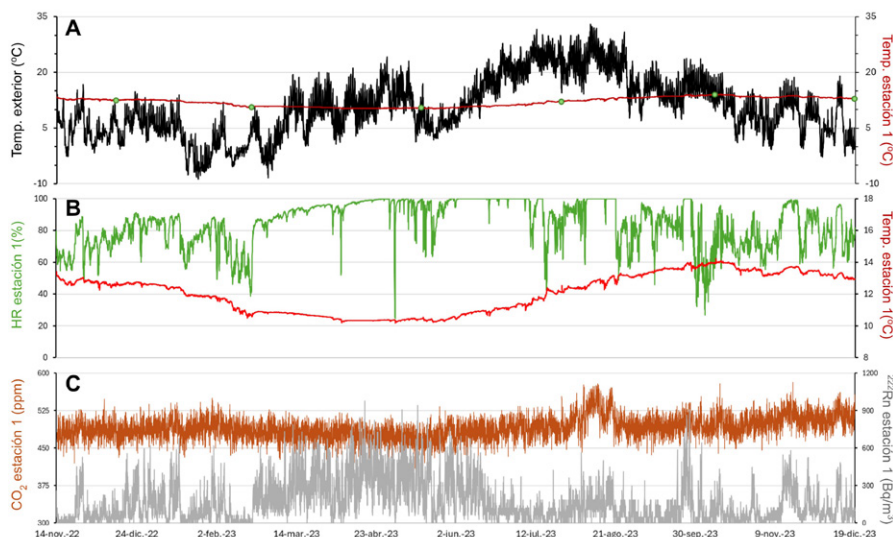


Fig. 2.- A. Temperatura del exterior y la estación 1 (interior de la cavidad). Los puntos verdes indican los momentos en que se llevó a cabo el muestreo. B. Humedad relativa y temperatura de la estación 1. C. Concentración de CO_2 y ^{222}Rn . Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- A. Exterior and station 1 temperature (inside the cavity). The points indicate the moments at which sampling was conducted. B. Relative humidity and station 1 temperature. C. CO_2 and ^{222}Rn concentration. See color figure in the web.

entre meses fríos y cálidos, y a pequeños intervalos de tiempo durante el invierno donde las temperaturas diarias en el exterior alcanzan los valores de temperatura en el interior (Fig. 2).

La HR de la estación 1 varió en un rango entre el 25 y el 100 % (Fig. 2B). Los valores más bajos son más frecuentes cuando la temperatura del interior de la cavidad es superior a la del exterior, en invierno. Por el contrario, los valores más elevados (>80%) se registran durante la primavera y el otoño, cuando la media de ambas temperaturas presenta valores similares, siendo la temperatura interior siempre inferior a 12°C. En los meses de verano, los valores varían considerablemente entre 40 y 100%.

Concentración de CO_2 , ^{222}Rn y CH_4

El CO_2 varió en un estrecho rango de concentraciones (Fig. 2C), con valores entre 410 y 532 ppm, siendo en verano cuando alcanza su máximo. Estos valores se aproximan al promedio de la concentración del gas en la atmósfera local en el exterior (~ 431 ppm).

La concentración de ^{222}Rn alcanza un máximo de 900 Bq/m^3 en los meses de primavera y otoño, mientras que los valores más bajos (<300 Bq/m^3) se registraron en los meses de invierno y verano. También se observan máximos de ^{222}Rn de hasta 600 Bq/m^3 durante intervalos de tiempo cortos que coinciden con momentos en los que la temperatura media del exterior

de la cavidad se encuentra próxima a la temperatura del interior (Fig. 2C). El ^{222}Rn está correlacionado con la HR de la estación 1 (Fig. 3A), observándose un ligero incremento en el ^{222}Rn para valores bajos de HR, mientras que para valores más altos, la HR es más variable, manteniéndose por encima del 80%.

Las concentraciones de CH_4 (Fig. 3B) medidas en el exterior de la cavidad fueron relativamente constantes (~ 2 ppm), mientras que en el interior presentan una mayor variabilidad, entre ~0,6 ppm y 1,8 ppm. De forma similar al ^{222}Rn , la concentración de CH_4 presenta una correlación negativa con respecto a la HR de la estación 1 (Fig. 3B).

Discusión

La temperatura, humedad relativa y el CO_2 son los parámetros que influyen en la variación de la densidad del aire en cuevas (Gabrovšek, 2023). La diferencia de densidad del aire interno con respecto al aire externo genera el desplazamiento relativo de masas de aire mediante convección. En el caso de Cueva Larga los principales factores que condicionan el gradiente de densidad entre las masas de aire (exterior-interior) es la diferencia de temperaturas y de humedad, ya que la concentración de CO_2 es relativamente baja en ambas masas de aire. Durante el año de monitorización la oscilación de la temperatura exterior fue de hasta 40 °C, muy superior a los escasos

4 °C de rango observados en la Sala de los Gours. Estas diferencias de temperatura entre la atmósfera subterránea y la exterior generan los movimientos de las masas de aire en Cueva Larga a favor de un gradiente de densidad, entre la atmósfera subterránea y la exterior.

La concentración de CO_2 es considerablemente baja en la atmósfera subterránea y similar a la de la atmósfera exterior, lo cual pone de manifiesto la alta tasa de ventilación en esta cavidad durante todo el año. Las concentraciones de ^{222}Rn y CH_4 son buenos indicadores del grado de ventilación de ambientes confinados. Las concentraciones de ^{222}Rn más elevadas implican un mayor confinamiento de la atmósfera subterránea (Kowalczyk and Froelich, 2010) debido a la acumulación de este gas procedente de la desintegración de isótopos radioactivos presentes en la roca encajante. En Cueva Larga los valores de ^{222}Rn son relativamente bajos, especialmente en los meses de invierno y verano, pudiendo llegar a ser nulos durante varias semanas, lo cual confirma el alto grado de ventilación de la cavidad. La correlación entre valores altos de HR (>80%) y ^{222}Rn (Fig. 3A) está vinculada con procesos de condensación del agua sobre la interfase roca/aire del techo de la cavidad. Esto provocaría el relleno parcial del sistema poroso de la roca que confina el ambiente interior, favoreciendo la acumulación del gas en esa zona de la cueva, tal y como se ha descrito para otros medios hipogeos (Fernández-Cortés et al., 2013). Estas condiciones pueden darse durante largos periodos de tiempo, por ejemplo, desde finales de febrero hasta mediados de junio, o también pueden darse durante intervalos cortos en invierno. La ventilación también se ve reducida en estos periodos, debido a que las temperaturas externa e interna de la cueva son similares, lo cual limita el desplazamiento convectivo del aire.

Los valores más altos de CH_4 reflejan la entrada de aire del exterior a la cavidad, lo cual sugiere una mayor ventilación. Valores por debajo de 1 ppm indican una ventilación baja con un mínimo aporte de CH_4 de la atmósfera exterior, de modo que el consumo del gas por las comunidades de bacterias metanotrofas presentes en el medio subterráneo es más efectivo (Martin-Pozas, et al., 2022). La figura 3A muestra este alto grado de correlación entre el CH_4 y HR asociado a los procesos de aislamiento ya evidenciados por la evolución temporal de la concentración de ^{222}Rn . Se requiere de un

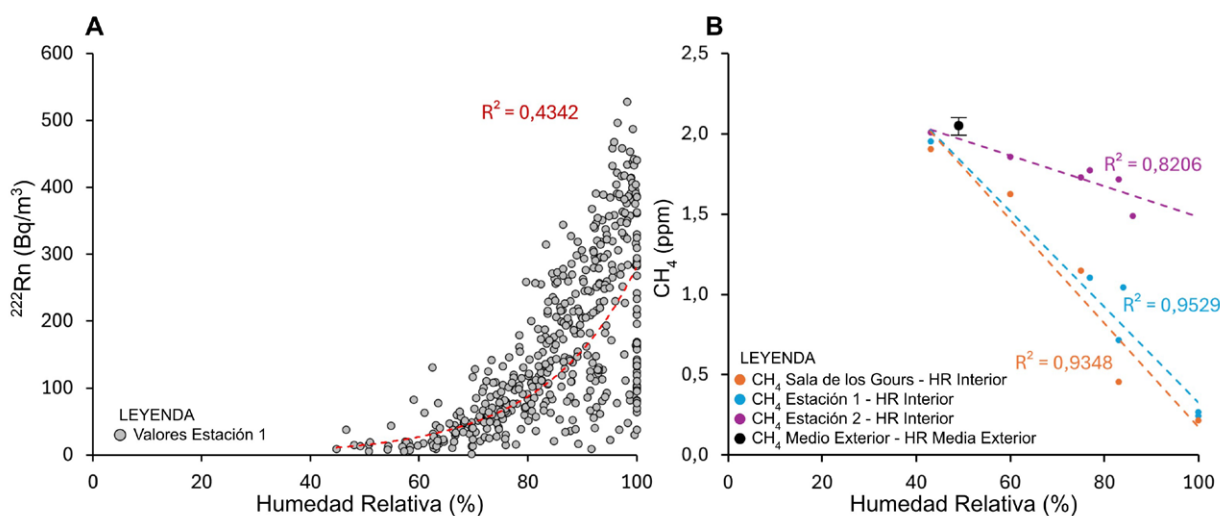


Fig. 3.- A. Correlación entre humedad relativa y concentración de ^{222}Rn en valores medios diarios. B. Correlación entre humedad relativa y concentración de CH_4 . Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A. Correlation between relative humidity and concentration of ^{222}Rn in daily average values. B. Correlation between relative humidity and concentration of CH_4 . See color figure in the web.

periodo de muestreo más prolongado en esta cavidad para validar el uso de la concentración de CH_4 como parámetro indicativo de la ventilación.

Conclusiones

Las bajas concentraciones de CO_2 y ^{222}Rn observadas en Cueva Larga, sugieren que la atmósfera subterránea está muy ventilada durante todo el año. La ventilación es más activa en los meses de invierno y verano, cuando las diferencias entre la temperatura externa e interna son mayores, provocando diferencias de densidad que inducen el desplazamiento de las masas de aire. En los meses fríos la temperatura del interior es superior a la del exterior y los valores de HR son inferiores al 80%, en consecuencia, la concentración de ^{222}Rn es baja. En los meses de verano, cuando la temperatura del exterior es mayor a la del interior y los valores de HR son más variables (40 – 100%), también se observa una concentración de ^{222}Rn baja. Por el contrario, se observan periodos en los que disminuye el intercambio gaseoso (^{222}Rn) de la cavidad con el exterior, debido a que el sistema de fracturas y microfisuras en el techo de la cavidad se satura parcialmente en agua, favoreciendo la difusión y acumulación de ^{222}Rn en el ambiente subterráneo.

Mejorar nuestro conocimiento sobre los patrones de ventilación contribuirá a facilitar las interpretaciones de las series geoquímicas obtenidas a partir de los espeleotemas de esta cavidad.

Contribución de los autores

E.R.C. participó en las labores de muestreo, tratamiento de datos y escribió el borrador del manuscrito. F.G, A.F.C y J.M.C. diseñaron la red de monitorización, participaron en los muestreos y descarga de datos y obtuvieron los fondos para llevar a cabo este estudio. Todos los coautores participaron en la elaboración del manuscrito final.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido posible gracias al proyecto GISOCLISE (UAL2020-RNM-B2006, Junta de Andalucía y Fondos FEDER) y al proyecto de Fortalecimiento de Grupos P_FORT_GRUPOS_2023/17 de la UAL, financiado por la Junta de Andalucía y Fondos FEDER. ERC agradece el Contrato Predoctoral para la Formación del Personal Investigador del Plan Propio de Investigación y Transferencia CPRE2023-062. FG agradece el contrato Ramón y Cajal (RYC2020-029811-I) de la Agencia Estatal de Investigación y la ayuda PPIT-UAL de la Junta de Andalucía-FEDER 2022-2026 (RyC-PPI2021-01).

Referencias

Chazarra Bernabé, A., Lorenzo Mariño, B., Romero Fresneda, R. y Moreno García, J.V. (2022). *Evolución de los climas de Köppen en España en el periodo 1951-2020*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, p.

Fernández-Cortés, A., Benavente, D., Cuezva, S., Cañaveras, J.C., Álvarez-Gallejo, M. *et al.* (2013). *Atmospheric Environment* 75, 15-23. <https://doi.org/mq7t>

García-Alix, A., Jiménez-Moreno, G., Gázquez, F., Monedero-Contreras, R., López-Avilés, A. *et al.* (2022). *Catena* 214, 1-16. <https://doi.org/mfd3>

Gabrovšek, F. (2023). *PLoS One* 18, 1-22. <https://doi.org/mf32>

Kowalczyk, A.J. and Froelich y P.N. (2010). *Earth and Planetary Science Letters* 289, 209-219. <https://doi.org/bzjrh2>

Martegani, L., Gázquez, F., Melles, M., Schröder, T. y Reicherter, K. (2023). *Geogaceta* 73, 43-46. <https://doi.org/mfxh>

Martínez-Martínez, J.M. and Azañón, J.M. (2002). *Journal of the Explorer* 8, 3-22. <https://doi.org/mfxh>

Martin-Pozas, T., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Cañaveras, J.C., Benavente, *et al.* (2022). *Science of the Total Environment* 831, 1-12. <https://doi.org/gr53bh>

Mattey, D.P., Fairchild, I.J., Atkinson, T.C., Latin, J., Ainsworth, M., *et al.* (2015). *Geological Society, London* 336, 323 – 344. <https://doi.org/bq52fp>

McDermott, F. (2004). *Quaternary Science Reviews* 23, 901 – 918. <https://doi.org/dttcdw>

Navarro Vázquez, D. y Velendo Muñoz, F. (1979). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1012 (Fiñana)*. IGME, Madrid, 65 p.