

Cálculo de la (micro)tasa de alteración en calcarenitas expuestas en clima semiárido costero

Directional analysis of the variation of the weathering (micro)rate in calcarenites exposed to coastal semiarid climate.

Javier Martínez Martínez^{1*}, Édgar Berrezueta², Héctor Aguilera³, Nicoletta Fusi⁴ y Miguel Gómez-Heras⁵

¹ CN Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle La Calera, 1. 28760 Tres Cantos (Madrid). javier.martinez@igme.es

² CN Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Matemático Pedrayes, 25. 33005 Oviedo (Asturias). e.berrezueta@igme.es

³ CN Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. h.aguilera@igme.es

⁴ University of Milano-Bicocca. 20126 Milán (Italia). nicoletta.fusi@unimib.it

⁵ Universidad Autónoma de Madrid. Ciudad Universitaria de Cantoblanco. 28049 Madrid. miguel.gomezheras@uam.es

*Corresponding author

ABSTRACT

This paper proposes a new methodology to calculate weathering rates of rocks after brief periods of direct exposure to the environment. The methodology bases on X-Ray microtomography and Digital Image Analysis. Two porous carbonate rocks have been studied: a calcarenite and a calcirrudite with an average porosity of 20%. They were exposed for one year to a coastal semiarid Mediterranean climate (Nueva Tabarca, Alicante; SE of Spain). The obtained microrates indicate a higher weathering rate in calcirrudite (18.75 mm/year) than in calcarenite (9.13 mm/year). This variation is justified by the differences in the porous system of each rock and its influence on the effectiveness of the usual alteration processes acting on rocks exposed to coastal semiarid climates. In addition, obtained results validate the proposed methodology, which constitutes an important advance in the study of the weathering rates of materials. It allows a quick and quantitative way to analyse the vulnerability of rocks to specific exposure environments.

Key-words: weathering, erosion, heritage, Tabarca, salt crystallization.

RESUMEN

En este trabajo se propone una nueva metodología, basada en microtomografía de Rayos X y Análisis Digital de Imagen, para el cálculo de tasas de alteración de rocas a partir de breves periodos de exposición directa al ambiente. Se han estudiado dos rocas carbonatadas porosas (una calcarenita y una calcirrudita con porosidad media del 20%), expuestas durante un año a un clima Mediterráneo semiárido costero (Nueva Tabarca, Alicante). Las microtasas obtenidas indican una mayor velocidad de alteración en la calcirrudita (18.75 mm/año) que en la calcarenita (9.13 mm/año). Esta variación se justifica por las diferencias en el sistema poroso de cada roca y su influencia en la efectividad de los procesos de alteración habituales en climas semiáridos costeros. Además, los resultados obtenidos validan la metodología planteada, la cual constituye un importante avance en el estudio de la velocidad de deterioro de materiales, permitiendo de una forma rápida y cuantitativa, analizar la vulnerabilidad de las rocas a determinados ambientes de exposición.

Palabras clave: alteración, erosión, patrimonio, Tabarca, cristalización de sales.

Geogaceta, 74 (2023), 27-30

<https://doi.org/10.55407/geogaceta98288>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 06/02/2023

Fecha de revisión: 20/04/2023

Fecha de aceptación: 26/05/2023

Introducción

Establecer las tasas de alteración de rocas es una tarea muy compleja debido a la lentitud del proceso que obliga a establecer prolongados tiempos de exposición o a seleccionar estructuras expuestas durante un tiempo largo (Sancho et al., 2003), al carácter continuo de la degradación (que dificulta establecer un "tiempo cero" a partir del cual empezar a considerar el avance del deterioro) y a la evolución no lineal de los procesos de meteorización (Martínez-Martínez et al., 2013). Además, cuanto mayor es el tiempo de exposición de las rocas al ambiente (ej. ciclos de temperatura y humedad), mayor es el deterioro acumulado en las mismas (por lo tanto,

más fácilmente cuantificable) pero menor es el control que tiene el investigador sobre las condiciones ambientales y climáticas a las que ha estado expuesta la roca (Ruedrich et al., 2011).

Las metodologías propuestas para el cálculo de las tasas de alteración y erosión de rocas se agrupan en dos clases, de acuerdo al tiempo de exposición considerado: tasas a corto plazo (décadas-siglos de exposición) y tasas a largo plazo (siglos-milenios). En este trabajo se presenta una metodología novedosa, basada en la combinación de microTomografía Computarizada de Rayos X (microCT-RX) y Análisis Digital de Imagen (ADI) sobre muestras expuestas a la intemperie durante un año. Dada la breve-

dad del periodo de exposición, a las tasas así calculadas se ha propuesto llamarlas microtasas de alteración.

En la bibliografía relacionada se suele usar indistintamente los términos "tasa de erosión" y "tasa de alteración" (p.ej. Sancho et al., 2003; Tang et al., 2004). Sin embargo, hay diferencias conceptuales importantes, debiendo reservarse el término "erosión" a la cuantificación del material perdido y eliminado de un volumen inicial de roca, y el término "alteración" a la modificación de las características petrológicas iniciales de la roca debido a su exposición al ambiente circundante. De acuerdo a esta diferenciación, la metodología propuesta en este trabajo cuantifica de forma precisa la tasa de alteración de las rocas.

La alteración de las rocas supone, en la mayoría de los casos, un deterioro de las propiedades físicas de la roca afectada, favoreciendo la posterior erosión del material degradado (Erkal et al., 2012). Es por este motivo que muchas veces ambas tasas (erosión y alteración) se consideran equivalentes. Conocer la tasa y profundidad de la alteración de una roca puede ser de gran interés, especialmente en el ámbito de la Geología aplicada al Patrimonio Cultural, en el que la posibilidad de intervenir en material alterado, previamente a su pérdida y erosión, puede suponer preservar volúmenes de gran interés y valor histórico-artístico.

Material de estudio

En este trabajo se ha estudiado la tasa de alteración de una calcarenita y una calcirrudita empleadas como material de construcción en el complejo fortificado de la isla de Nueva Tabarca (siglo XVIII, Alicante) (Figura 1). Estas rocas presentan alta porosidad (Tabla I) y color amarillento, y proceden de los afloramientos Miocenos del oeste de la isla (Martínez-Martínez et al., 2014).

En términos generales, el contenido en bioclastos es del 90% y corresponde prin-

Sistema poroso	Crn	Crr
Φ (%)	17.97	24.43
Φ [0.01-0.1]	25.74	11.95
Φ [0.1-1]	57.05	32.57
Φ [1-10]	4.07	37.60
Φ [10-100]	5.68	15.43

Tabla I. Porosidad abierta (Φ) y distribución de tamaño de poro (rango de tamaño definido en μm) de las rocas estudiadas (Crn: calcarenita; Crr: calcirrudita). Valores obtenidos con Porosimetría de Mercurio.

Table I. Porosity (Φ) and pore size distribution (pore range expressed in μm) of the studied rocks (Crn: calcarenite; Crr: calcirrudite). Values obtained by means of Mercury Porosimetry.

cipalmente a algas rojas, foraminíferos y briozoos (Martínez-Martínez et al., 2018). El contenido en litoclastos de las muestras estudiadas es bajo (menor al 5%).

Metodología

Preparación de la muestra

Se preparó una probeta de 3x2x1 cm, con acabado pulido en una de las superficies mayores, de cada uno de los litotipos. La mitad inferior de las probetas se cubrió con recubrimiento termorretráctil, asílándola de la exposición directa a la intemperie.

Condiciones de exposición

Las dos muestras estuvieron expuestas en el antepecho de la cubierta del edificio del museo de la isla de Nueva Tabarca (Alicante) (Figura 2), en condiciones de clima Mediterráneo semiárido costero (50 metros de la línea de costa), sin presencia de elementos vegetales (árboles, palmeras) ni arquitectónicos que apantallaran la exposición directa de las muestras a los agentes ambientales.

El periodo de exposición directa fue de un año y con orientación sur.

Cálculo de la microtasa de alteración

La muestra alterada (tras un año de exposición directa) se escaneó mediante Tomografía Computarizada de Rayos X de alta resolución (microCT-RX BIR Actis 130/150) y se obtuvo el modelo 3D de alta resolución mediante el programa Avizo (Mercury) (tamaño de vóxel: 24x24x27 μm). El modelo 3D se posprocesó, obteniendo 600 imágenes 2D secuenciadas, consecutivas (62.5 μm de distancia entre imágenes) y orientadas paralelamente a la superficie expuesta a la intemperie. Este paquete de imágenes abarca 37,5 mm desde el exterior de la muestra hacia el interior de la probeta.

Cada imagen 2D se subdividió en dos áreas de trabajo, correspondiendo la superior a la zona expuesta a la intemperie (alterada), con orientación sur y la inferior a la zona protegida con recubrimiento termorretráctil (inalterada). En cada subárea de trabajo se calculó la porosidad mediante Análisis Digital de Imágenes (ADI) con el software libre Image J 1.150i. La porosidad se cuantificó (en %) según la proporción entre el área ocupada por los poros (definidos por los píxeles con Nivel de Gris inferior a 40) y el área total de la subárea de trabajo considerada.

La curva de evolución de la porosidad en el área protegida por el recubrimiento termorretráctil ofrece el perfil de la roca inalterada. El umbral de referencia de la porosidad asociada a la fracción inalterada de la muestra estudiada se obtiene a partir del valor máximo de porosidad medido en este perfil (criterio conservador). Este valor se extrapola al perfil de evolución de la porosidad en la zona alterada, sirviendo de criterio para establecer la profundidad a la que la porosidad en la zona alterada es similar o inferior a la porosidad obtenida en la zona inalterada.

Esta distancia corresponde a la profundidad de la capa alterada. La micro-

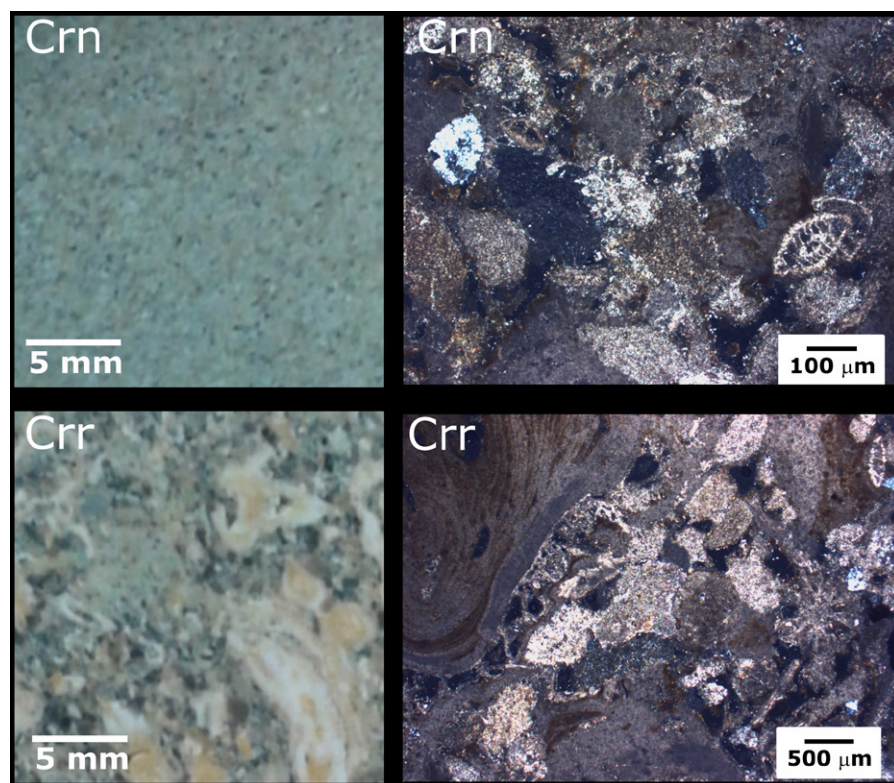


Fig. 1.- Rocas estudiadas: calcarenita (Crn, arriba) y calcirrudita (Crr, abajo) vistas a mesoescala (izquierda) y bajo Microscopio Óptico Petrográfico con Nícoles paralelos (derecha).
Fig. 1.- Studied rocks: calcarenite (Crn, above) and calcirrudite (Crr, below) view at mesoscale (left) and microscale under Petrographic Microscope (parallel nicols, right)

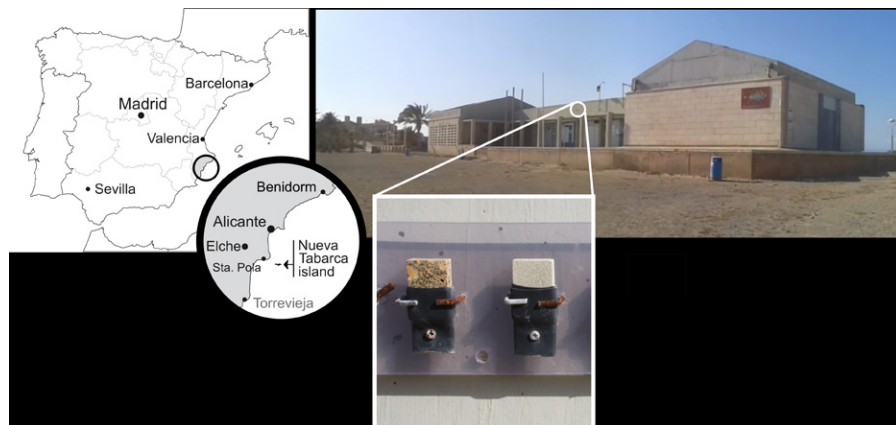


Fig. 2.- Localización de isla de Nueva Tabarca (Alicante) y de las muestras expuestas en el edificio del Museo de Nueva Tabarca (imagen superior derecha). Detalle de las muestras expuestas (calcirrudita, izquierda; calcarenita, derecha) y esquema explicando la sección expuesta y la sección protegida (no expuesta) de cada muestra.

Fig. 2.- Location of the island of Nueva Tabarca (Alicante, Spain) and of the exposed samples in the building of the Nueva Tabarca Museum (above, right). Detail of the exposed samples (calcirrudite, left; calcarenite, right) and sketch showing the protected and exposed parts of each sample.

tasa de alteración (expresada en $\mu\text{m}/\text{año}$ o $\text{mm}/\text{año}$) se obtiene dividiendo esta distancia por el tiempo de exposición (un año, en la metodología propuesta).

Resultados

La Figura 3 muestra las curvas de evolución de la porosidad en las dos ro-

cas estudiadas (tanto en el área expuesta como en el área protegida). La curva roja muestra la evolución en la superficie no protegida, y la curva azul la evolución en la superficie protegida. En esta curva azul se observa una reducción de la porosidad en las imágenes más próximas a la superficie debido al *beam hardening effect* (Fusi y Martínez-Martínez, 2013). Este efecto ge-

nera una subestimación de la porosidad en la sección interior de las piezas estudiadas.

La máxima porosidad medida en la sección alterada de la calcarenita es de 18,1%, siendo 8.04 veces mayor que la porosidad medida en la fracción inalterada (2,25%). Este valor máximo se reduce hasta 16,2% en el caso de la calcirrudita, suponiendo un incremento de 2,16 veces el valor de porosidad en la roca inalterada.

La profundidad de la capa alterada (entendida como la distancia desde la superficie a la que la porosidad de la parte alterada de la roca se equipara a la porosidad de referencia de la parte inalterada) varía según la litología considerada. En el caso de la calcarenita esta profundidad es de 9,03 mm, mientras que en la calcirrudita este valor asciende a 18,75 mm. Teniendo en cuenta que la duración de exposición es de un año, las microtasas de exposición corresponden a 9130 mm/ka y 18750 mm/ka para las calcarenitas y calcirruditas estudiadas, respectivamente.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran una fuerte dependencia de la tasa de al-

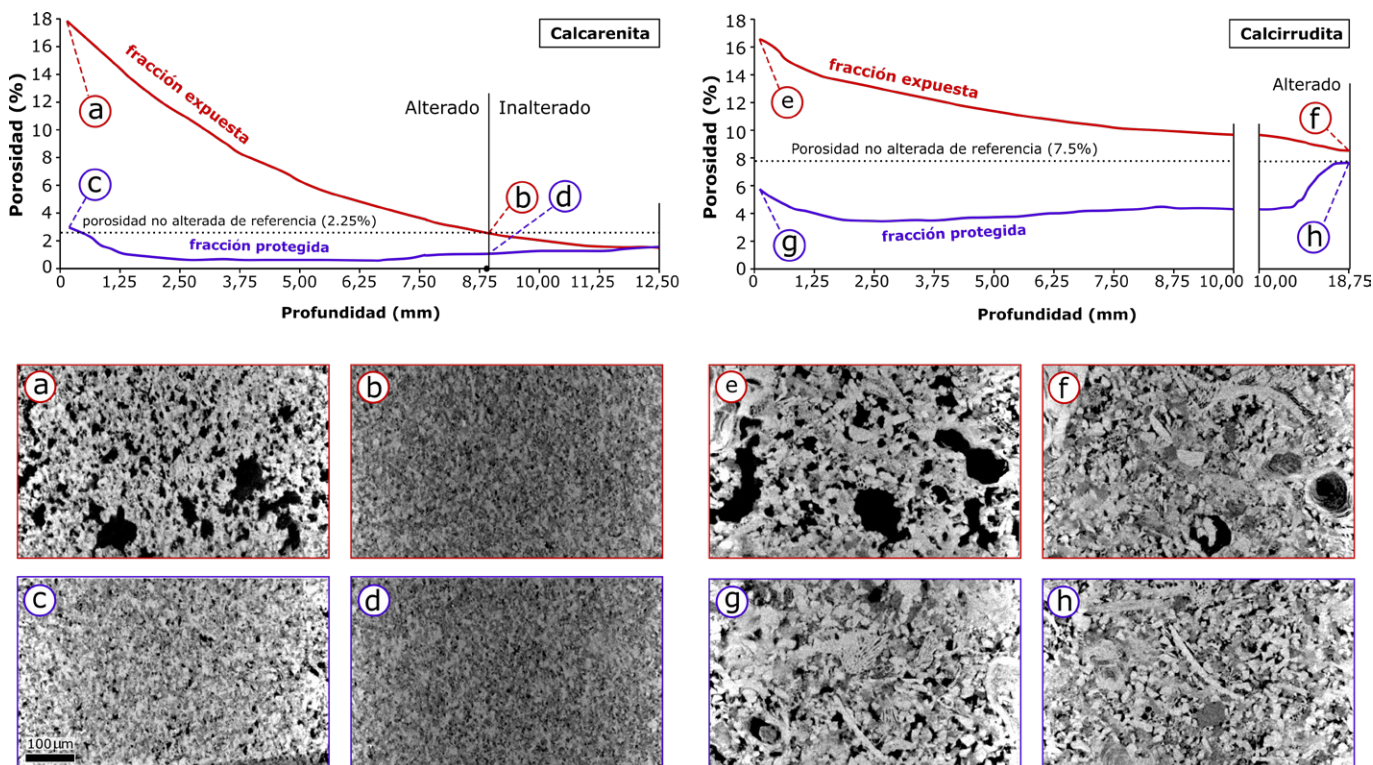


Fig. 3.- Curvas de evolución de la porosidad obtenidas en la calcarenita (izquierda) y calcirrudita (derecha). En rojo: evolución en la fracción expuesta de la muestra. En azul: evolución en la fracción protegida con termorretráctil (no expuesta). En línea negra punteada: umbral de referencia de la porosidad no alterada. Las imágenes inferiores (microtomografía Rayos X) muestran el aspecto de la roca a diferentes profundidades del perfil.

Fig. 3.- Curves of the porosity evolution obtained in the studied calcarenite (left) and calcirrudite (right). In red: porosity evolution in the exposed section of the sample. In blue: porosity evolution in the protected (non exposed) section of the sample. In dotted black line: reference threshold of the non-altered porosity of each rock. The images below (X-Ray microtomography) show the rock aspect at different depths in the porosity profile.

teración con las características de la roca estudiada. La microtasa obtenida en la calcirrudita es prácticamente el doble que el valor obtenido en la calcarenita. Esta diferencia está justificada por dos aspectos fundamentales, relacionados directamente con las características del sistema poroso de las rocas: el contenido en poros (porosidad abierta, %; Tabla I) y el tamaño de los mismos. En ambos parámetros, la calcirrudita presenta valores sensiblemente mayores a la calcarenita, lo cual indica que el sistema poroso de la primera es más abierto y conectado que en la segunda, y permite el acceso del agua salada (asociada al spray marino del ambiente costero) a una mayor profundidad por procesos de succión capilar.

Los dos procesos principales asociados al deterioro físico de los materiales en ambientes costeros semiáridos son la cristalización de sales en el sistema poroso de las rocas, y la dilatación diferencial de las sales presentes en los poros, que generan tensiones capaces de generar microfisuración y disgregación de componentes poco cohesionados (Martínez-Martínez et al., 2021). Estos procesos son más efectivos en poros con tamaños comprendidos entre 0,1 y 10 μm (Steiger et al., 2011), siendo la calcirrudita la que posee una población de poros mayor con tamaños comprendidos entre estos límites (70,17%, respecto el 61,12% de la calcarenita). Por lo tanto, la calcirrudita resulta, además, más vulnerable a los procesos de alteración asociados al ambiente de exposición estudiado.

Cabe señalar, por último, que estas microtasas corresponden a la velocidad de alteración de las rocas, no de erosión y pérdida de material. La tasa de erosión puede considerarse uno o dos órdenes de magnitud menor en rocas similares (Pope et al., 2002). Además, también es importante subrayar que la microtasa así obtenida puede estar sobrestimada, puesto que la alteración medida tras un año de exposición directa se extrapola linealmente en el tiempo. Esta extrapolación lineal no tiene por qué coincidir con el patrón de deterioro seguido por las rocas, ya que estas pueden mostrar una deceleración en el tiempo, o bien un com-

portamiento caótico en el que alternen periodos de estabilidad y otros de rápido deterioro (Pope et al., 2002). En cualquiera de estas dos situaciones, la alteración real será inferior a la calculada.

Sin embargo, la metodología planteada constituye un importante avance en el estudio de la velocidad de deterioro de materiales, permitiendo de una forma rápida y cuantitativa, analizar la durabilidad de las rocas a determinados ambientes de exposición.

Conclusiones

Se ha obtenido una microtasa de alteración de rocas expuestas a un clima Mediterráneo semiárido costero (isla de Nueva Tabarca, Alicante), que varía entre 9,03 y 18,75 mm/año, dependiendo de la roca considerada. La tasa más baja corresponde a una calcarenita de grano fino, mientras que el valor mayor se obtiene en una calcirrudita de grano muy grueso y elevada porosidad.

La diferencia de tasas en función de la litología se justifica por la mayor accesibilidad del agua salada al interior de las muestras en la calcirrudita, lo cual permite la cristalización de sales en poros más internos. Además, la calcirrudita es más susceptible al deterioro porque contiene una mayor población de poros contenidos en el rango de tamaño más susceptible al deterioro por las tensiones generadas durante la cristalización de sales y la dilatación diferencial de sales (halita) en rocas carbonatadas (rango de poro: 0,1-10 μm).

Los resultados obtenidos validan la metodología propuesta, constituyendo una forma rápida y eficaz de cuantificar el deterioro de materiales expuestos a unas condiciones específicas. Futuros trabajos ahondarán en el análisis comparativo de las microtasas de alteración obtenidas y el grado de erosión sufrido por las rocas en exposiciones de larga duración a agentes climáticos.

Contribución de los autores

La contribución individual de cada

autor al trabajo ha sido: planteamiento del estudio, J.M.M.; metodología y obtención de datos, J.M.M., E.B., N.F., H.A.; análisis y discusión de los datos, J.M.M., M.G.H., E.B.; figuras: J.M.M., E.B.; elaboración del manuscrito, J.M.M., E.B.; revisión del manuscrito, J.M.M., E.B., H.A., M.G.H.

Agradecimientos

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i PID2020-116896RB-C21 y PID2020-116896RB-C22, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (Ministerio de Ciencia e Innovación). Los autores agradecen al Dr. Eduardo Molina Piernas y a otro revisor anónimo las correcciones y sugerencias realizadas sobre el manuscrito original.

Referencias

- Erka., A., Dayala, D. y Sequeira, L. (2012). *Building and Environment* 57, 336-348. <https://doi.org/f3875b>
- Ruedrich, J., Kirchner, D. y Siegesmund, S. (2011). *Environmental Earth Sciences*, 63, 1573-1586. <https://doi.org/bbsnkt>
- Martínez-Martínez, J., García-del-Cura, M.A., Benavente, D., Ordóñez, S., Baltuille, J.M., Álvarez Arecas, E. y Fernández Suárez, J. (2018). *Geogaceta* 61, 71-74.
- Martínez-Martínez, J., Giannetti, A., Peral Lozano, J., Corbí, H. y Cuevas-González, J. (2014). *Geogaceta* 53, 83-86.
- Fusi, N. y Martínez-Martínez, J. (2013). *Engineering Geology* 166, 272-282. <https://doi.org/f5j86v>
- Martínez-Martínez, J., Arizzi, A. y Benavente, D. (2021). *Minerals* 11, 91. <https://doi.org/k59d>
- Pope, G., Meierding, T.C. y Paradise, T.R. (2002). *Geomorphology* 1182, 211-225. <https://doi.org/fj2cpv>
- Sancho, C., Fort, R. y Belmonte, A. (2003). *Catena* 53, 53-64. <https://doi.org/dzdvwk>
- Steiger, M., Charola, A.E. y Sterflinger, K. (2011). En: *Stone in architecture*. Springer Berlin Heidelberg, 227-316. <https://doi.org/fb78d8>
- Tang, W., Davidson, C.I., Finger, S., Vance, K. (2004). *Atmospheric Environment* 38, 5589-5599. <https://doi.org/c4ckgs>