

“Entonces...  
¿El clima y sus variaciones se  
*leen* en las rocas?”

# Escrito en las rocas

Blanca Bauluz y Elisa Laita



**L**a Tierra, desde que se formó hace más de 4500 millones de años, ha estado y está siendo sometida a cambios constantes. En la actualidad somos testigos de numerosos procesos que afectan a nuestro planeta como son las erupciones volcánicas, procesos de fragmentación y disolución de rocas, formación de sedimentos y cristalización de nuevos minerales. Observamos también cómo la superficie de la Tierra está sometida a diversas condiciones climáticas y fenómenos catastróficos como tsunamis y terremotos.

Todos estos procesos, desarrollados en el pasado y en la actualidad, tienen en común que modifican la corteza terrestre, generan nuevos materiales, nuevos minerales y nuevas rocas. El análisis de las rocas nos permite, por tanto, deducir cual fue la historia y los procesos que controlaron su formación. Esto no es una tarea sencilla porque la gran diversidad de procesos y fenómenos que quedan registrados en la corteza terrestre generan y generaron una gran diversidad de rocas y minerales diferentes.



Cova dets Ases Mallorca (arriba) y Volcán de La Palma (abajo).

J.J. Enseñat (Societat Espeleològica Balear)



Instituto Geográfico Nacional

A modo de ejemplo, el análisis de rocas metamórficas nos habla de la generación de cordilleras, del incremento progresivo de las condiciones de presión y temperatura cuando las placas tectónicas chocan, lo que favorece la formación de minerales estables en condiciones de alta presión y temperatura. Las rocas sedimentarias son el registro de los procesos de la meteorización y erosión de la superficie terrestre, de la dinámica de los ríos y del mar, de la formación de suelos donde se desarrolla la cobertura vegetal y los cultivos. Las rocas ígneas, a su vez, registran eventos térmicos debidos al ascenso y enfriamiento de masas fundidas (magmas) desde el manto y/o la corteza terrestre o a través de erupciones volcánicas.

Los procesos generadores de rocas controlan tanto la composición mineral y química de las mismas, como su textura, que estará condicionada por el tamaño y la distribución de las fases que la formen. Estas características que presentan las rocas pueden, en ocasiones, ser observadas en muestra de mano. Sin embargo, es necesario recurrir frecuentemente a la microscopía de luz polarizada, o incluso a la microscopía electrónica en el caso de rocas de tamaño de grano fino, formadas por fases y minerales de tamaños nanométricos.

Gracias a la investigación de los materiales geológicos podemos responder a numerosas preguntas que se hacen los investigadores y la sociedad. Posiblemente, algunas de las preguntas más frecuentes son ¿Cómo fue el clima en el pasado? ¿El clima y sus variaciones se “leen” en las rocas?

Hay diversos trabajos que determinan las variaciones de temperatura en el agua del mar a partir de análisis químicos isotópicos de las conchas de composición calcítica ( $\text{CaCO}_3$ ) de organismos marinos microscópicos. Los isótopos de oxígeno más abundantes en el agua son  $\text{O}^{16}$  y  $\text{O}^{18}$ , siendo el  $\text{O}^{16}$  el más ligero y que,

“Las rocas sedimentarias son el registro de los procesos de la meteorización y erosión de la superficie terrestre.”

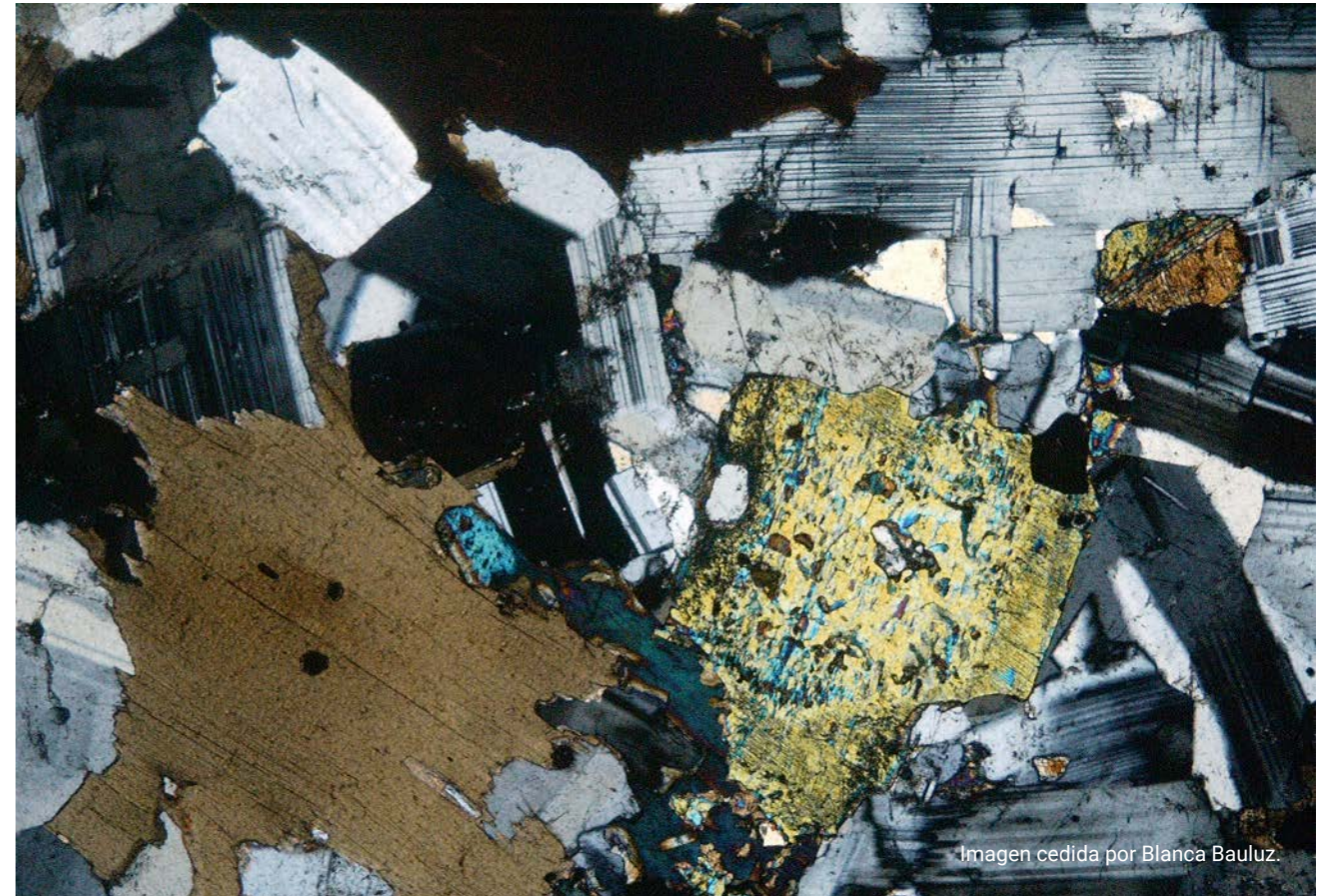


Imagen cedida por Blanca Bauluz.

Diorita. Roca ígnea. Imagen de microscopía de luz transmitida.



Rocas detríticas (sedimentarias) en estratos discordantes, Noroeste de Argentina.

Imagen cedida por las autoras.

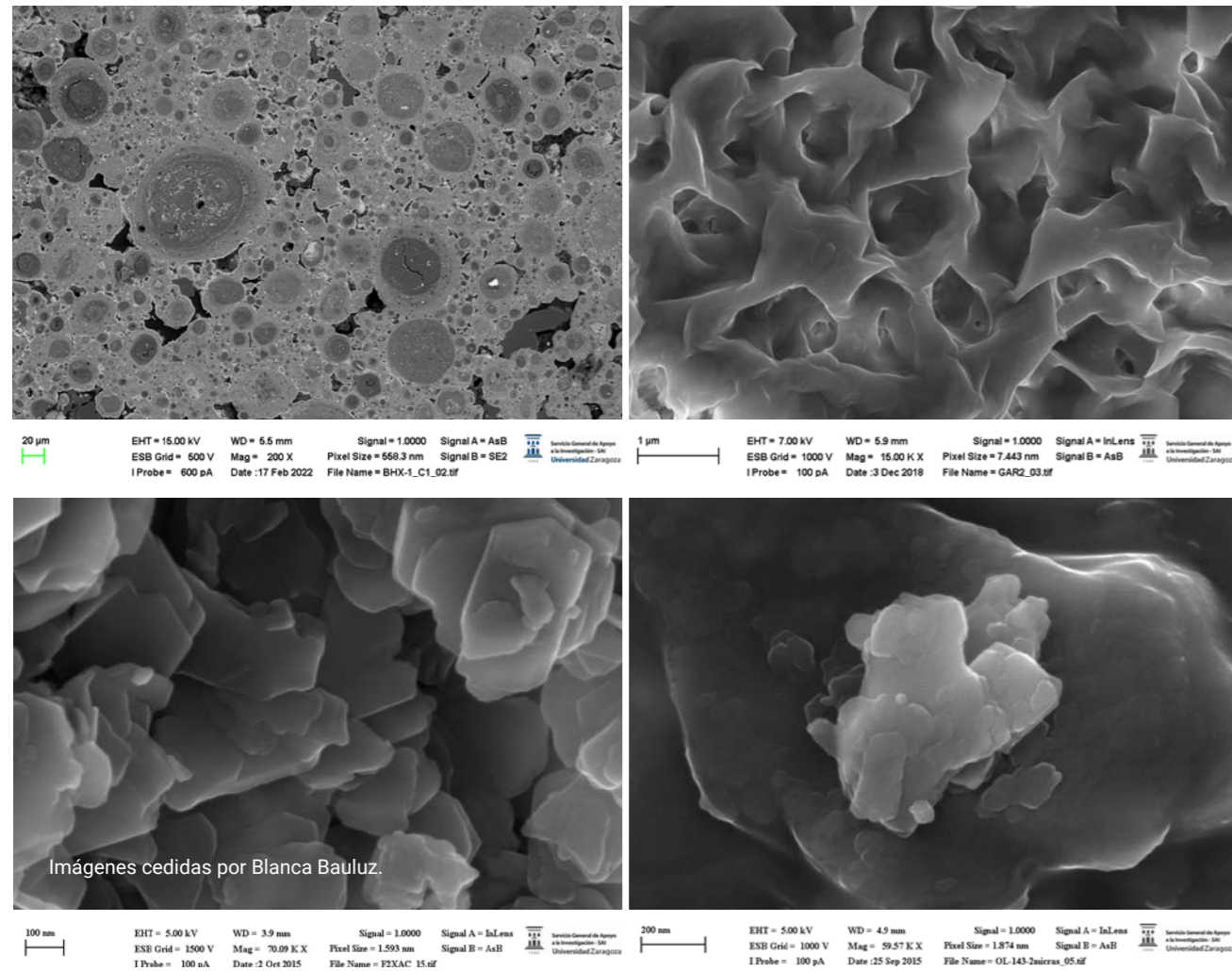
por tanto, más fácilmente se evapora de los dos. Las conchas de los organismos marinos, al crecer, incorporan oxígeno del agua del mar. Si la temperatura del agua varía, se producen enriquecimientos o empobrecimientos en el  $\text{O}^{18}$  de dicha agua y esta señal queda registrada en las conchas fósiles de los organismos compuestos de  $\text{CaCO}_3$ . A partir de estos datos se calcula la temperatura del agua del mar.

**Pero... ¿Cómo queda registrado el clima en rocas continentales?**

La distribución de suelos, a escala global, tiene un fuerte control latitudinal, es decir, la formación de suelos está controlada fundamentalmente por el clima. Los factores que condicionan el desarrollo de los diferentes tipos de suelos que encontramos a escala global son la temperatura, la precipitación y el tiempo, es decir, la duración del proceso de formación del suelo.

Cuando el agua de lluvia penetra en las rocas, comienza un proceso de meteorización química, a partir del cual se forman los suelos. Este proceso implica la disolución

de los minerales que forman la roca y la cristalización de nuevos minerales, frecuentemente minerales de la arcilla como esmectitas, caolinitas, illitas, y óxidos e hidróxidos de hierro, titanio y aluminio como hematites, goethita, rutilo, anatasa, bohemita y gibbsita. Cuanto más cálido y húmedo es el clima más avanza la meteorización química y el proceso de edafización.



Imágenes cedidas por Blanca Bauluz.

Imágenes de Microscopía electrónica de barrido. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: bauxita, esmectitas, caolinitas e illitas.

Los minerales de la arcilla son filosilicatos hidratados de tamaño muy pequeños, claramente inferiores a  $2\mu\text{m}$ , que se forman a baja temperatura ( $<200^\circ\text{C}$ ) y que, además, tienen un comportamiento plástico al mezclarlos con agua. Al iniciarse la meteorización química se suelen formar illitas, conforme avanza el proceso se forman esmectitas y, en las etapas más avanzadas, caolinitas. Si extrapolamos esta secuencia a las condiciones climáticas, podemos deducir que los suelos de zonas frías serán ricos en illitas, los de climas templados húmedos en esmectitas y en los climas tropicales muy húmedos se forman caolinitas.

Una vez formado el suelo, pueden darse una serie de procesos geológicos que afecten a dicho suelo con el paso del tiempo. Este conjunto de procesos se denomina "diagénesis" y tienen lugar a temperaturas de hasta  $200^\circ\text{C}$ , muy superiores, por tanto, a las temperaturas a las que se generaron los suelos, habitualmente entre 10

**“El final del Paleoceno y el inicio del Eoceno tuvo lugar hace unos 55 millones de años.”**

y  $30^\circ\text{C}$ . Estos procesos son: a) recristalización, en el que los minerales incrementan su tamaño, b) cementación en el que cristalizan carbonatos u otras fases que aportan dureza y consistencia al suelo, y c) modificación de minerales, en los que los minerales formados durante el proceso edáfico son reemplazados por nuevos minerales estables en condiciones diagénéticas. Estos suelos que se formaron en el pasado se denominan paleosuelos y los encontramos en el registro geológico.

Si nos centramos en el análisis de paleosuelos ricos en arcillas, podemos encontrar la coexistencia de arcillas autigénicas, es decir, formadas durante el desarrollo del suelo, arcillas detríticas, que formaban parte de la roca a partir de la cual se formó el suelo y arcillas diagenéticas, generadas durante la diagénesis. De estos tres tipos de arcillas, sólo las autigénicas nos darán información sobre las condiciones climáticas en las que se generó el suelo, lo que hace indispensable diferenciar el origen de las diferentes arcillas presentes en el paleosuelo.

Al ser las arcillas minerales de tamaños micro a nanométrico es difícil caracterizarlas y establecer su origen. Las arcillas no son visibles en un microscopio óptico y es necesario utilizar diversas técnicas como la difracción de rayos-X para su identificación, espectroscopía

de infrarrojos y Raman para determinar detalles estructurales, microscopías electrónicas de barrido y de transmisión para caracterizar la textura, la composición química y la estructura cristalográfica, entre otras.

Un ejemplo excelente de la formación de paleosuelos que se observa en el registro geológico lo encontramos en el límite Paleoceno-Eoceno. El final del Paleoceno y el inicio del Eoceno tuvo lugar hace unos 55 millones de años. En este "momento" la temperatura incrementó a escala global brusca y rápidamente, generándose lo que se denomina un "evento hipertérmico". Esto fue debido a la emisión de metano desde el fondo marino que posteriormente generó  $\text{CO}_2$ . Este evento climático, denominado en la bibliografía "máximo térmico del Paleoceno-Eoceno" (PETM), duró unos 150.000 años, hasta que el exceso de carbono en la

**Rocas sedimentarias que contienen el Límite Paleoceno- Eoceno, Noroeste de Argentina.**



Imagen cedida por Blanca Bauluz.



Imagen cedida por Blanca Bauluz.



Imagen cedida por Marcos Aurell.

atmosfera se reguló de modo natural. Este máximo térmico propició en el continente el desarrollo de mamíferos y euprimates; en el agua del mar incrementó el contenido en CO<sub>2</sub>, haciéndola más ácida y provocando la disolución de los caparzones calcícos de algunos organismos y la extinción de algunos foraminíferos.

**Y... ¿Cómo influyo este evento térmico en áreas continentales?**

En el Hemisferio Sur, en zonas continentales del NO de Argentina, este evento fue el responsable del desarrollo de diferentes tipos de suelos en rocas sedimentarias detríticas de ambientes fluviales (ríos y lagunas de inundación). En las rocas previas al tránsito Paleoceno-Eoceno se formaron vertisoles cálcicos, que evolucionaron a oxisoles en el tránsito al Eoceno, reflejando un incremento en la intensidad de la meteorización química. Este desarrollo de suelos produjo la cristalización de nuevas arcillas a partir de la disolución de aluminosilicatos de

potasio en las rocas sedimentarias que actuaron como sustrato. Las nuevas arcillas generadas fueron fundamentalmente esmectita en los vertisoles y caolinita en los oxisoles. En estos materiales se observa, además de las características propias de los oxisoles, como son los colores violáceos y abundantes nódulos de óxidos de hierro, que las proporciones relativas de caolinita y esmectita varían en los paleosuelos, registrando una ciclicidad en la mineralogía. En concreto, se han descrito cinco ciclos de paleoprecipitación y paleotemperatura. Los ciclos con altos contenidos en caolinita reflejan periodos húmedos y cálidos de intensa meteorización química, en los que hubo un incremento medio anual de la precipitación de unos 1500mm y de 5°C. Por otro lado, los ciclos en los que predomina la esmectita corresponden a momentos menos cálidos y húmedos. Estos ciclos reflejan “breves” eventos hipertérmicos en el límite Paleoceno-Eoceno en el Hemisferio Sur, que se correlacionan bien con episodios de calentamientos bien establecidos y documentados en el Hemisferio Norte.

Otro ejemplo de paleosuelos observables en el registro geológico, son los que se localizan en el límite Jurásico-Cretácico, hace unos 130 millones de años, en el NE de la Península Ibérica. Estos paleosuelos se sitúan sobre calizas karstificadas del Hauteriviense-Barremiense Inferior (Cretácico Inferior). Mientras que en el oeste de Europa se describen para este periodo del tiempo geológico una alternancia de estaciones húmedas y secas, en la Península Ibérica y, en concreto, en la Cordillera Ibérica, se observa el desarrollo de lateritas y bauxitas formadas a partir materiales continentales margosos y calizos generados a partir del agua de lagos. Estos paleosuelos lateríticos y bauxíticos, característicos de climas tropicales húmedos, están enriquecidos en hierro, silicio, aluminio y titanio, en comparación con las rocas a partir de las cuales se han formado.

Las lateritas contienen abundantes pisoides ferruginosos, generalmente de tamaños milimétricos que suelen estar formados por laminas concéntricas de hematites

▲  
**Paleosuelos ferruginosos en la zona de Salta, Noroeste de Argentina (izquierda) y Paleosuelos lateríticos en Fuentespalda, Teruel, Noreste de la Península Ibérica (derecha).**

“Los ciclos con altos contenidos en caolinita reflejan periodos húmedos y cálidos de intensa meteorización química.”

y goethita y que se incluyen dentro de las matrices arcillosas que forman el suelo. Esta estructura interna concéntrica sugiere un crecimiento episódico de los pisoides, formándose goethita (oxihidróxido de hierro), cuando el suelo está embebido en agua de lluvia, y hematitas (óxido de hierro) en periodos más secos. Las arcillas donde se alojan los pisoides se caracteriza por contener altas concentraciones de caolinita autigénica, que forma agregados vermiculares.

En las bauxitas, el contenido en caolinita es menor que en las lateritas, lo que sugiere que la meteorización química que forma estos paleosuelos es mucho más intensa y la sílice entra en disolución y es lixiviada, evacuada, del paleosuelo. Esto produce un incremento relativo de titanio, aluminio y hierro, favoreciendo la cristalización de abundantes hidróxidos de aluminio (bohemita, diásporo y gibbsita) y óxidos de hierro y titanio. Una característica de las bauxitas es el desarrollo de ooides de tamaños centímetros con envueltas concéntricas visibles en muestra de mano que contienen además geles amorfos, a partir de los cuales pudieron cristalizar las fases mencionadas anteriormente. En las bauxitas, a diferencia de las lateritas, no quedan restos de las rocas

de partida, lo que implica que la meteorización química fue extremadamente intensa, debido a un clima muy cálido y húmedo.

En el caso de las lateritas de la Cordillera Ibérica, se observa además una variación vertical de base a techo, caracterizada por una disminución del contenido en caolinita y el incremento en illita y esmectita, sugiriendo un cambio en las condiciones climáticas de cálidas y húmedas a frías y secas en el final del Hauteriviense y el inicio del Barremiense.

**“Es posible leer el clima que se desarrolló en los continentes en el pasado a partir del estudio mineralógico de las arcillas.”**

**Bauxita (roca sedimentaria aluminica) en muestra de mano, formada por pisoides centimétricos constituidos por envueltas de fases ferruginosas y aluminicas.**

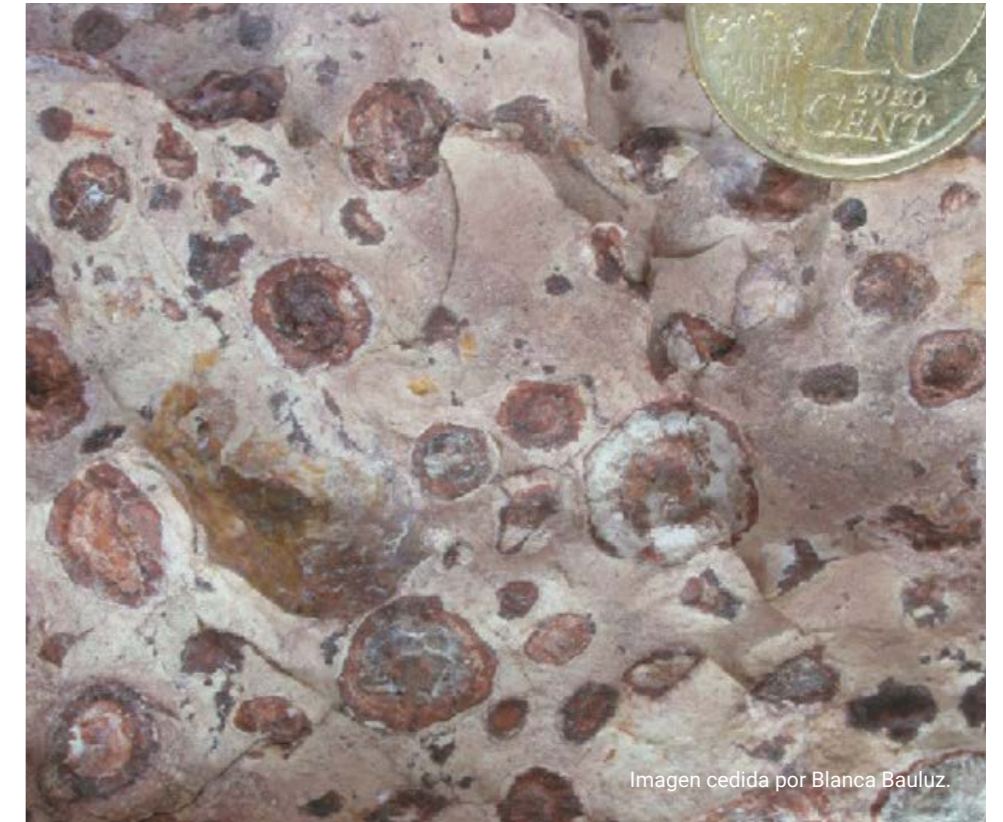


Imagen cedida por Blanca Bauluz.



**Imagen de microscopía de luz reflejada de un pisolite de un paleosuelo laterítico, formado por laminas concéntricas de hematitas y goethita que reflejan cambios cíclicos en las condiciones de humedad.**

Imagen cedida por Elisa Laita

**Entonces... ¿El clima y sus variaciones se “leen” en las rocas?**

Efectivamente podemos afirmar que es posible “leer” e identificar el clima que se desarrolló en los continentes en el pasado, así como sus variaciones, a partir del estudio mineralógico de las arcillas, investigando para ello paleosuelos que no hayan sufrido intensas modificaciones tras su formación y utilizando herramientas específicas.

Blanca Bauluz y Elisa Laita  
Dpto. de Ciencias de la Tierra  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Zaragoza

**REFERENCIAS**

- Do Campo M., Bauluz B., del Papa C., White T., Yuste A., Mayayo M.J. (2018). Evidence of cyclic climatic changes recorded in clay mineral assemblages from a continental Paleocene-Eocene sequence, northwestern Argentina. *Sedimentary Geology*, 368, 44–57.
- Laita E., Bauluz B., Aurell M., Badenas B., Canudo J. I., Yuste A. (2020). A change from warm/humid to cold/dry climate conditions recorded in lower Barremian clay-dominated continental successions from the SE Iberian Chain (NE Spain). *Sedimentary Geology*, 403, 105673.
- Laita E., Bauluz B., Aurell M., Badenas B., Yuste A. (2022). Weathering events recorded in uppermost Hauterivian–lower Barremian clay-dominated continental successions from the NW Iberian Range: climatic vs. tectonic controls. *Journal of Iberian Geology*, 48, 45–63
- Yuste A., Camacho I., Bauluz B., Mayayo M.J., Laita E. (2020). Palaeoweathering events recorded on siliciclastic continental deposits (Albian, Lower Cretaceous) in NE Spain. *Applied Clay Science*, 190, 105598.