

Vermiculitas tratadas hidrotermalmente: capacidad de adsorción de CO₂ e implicaciones geológicas

Ayoub Lahchich (1*), Pedro Alvarez Lloret (1), Javier F. Reynes (2), Celia Marcos (1*)

(1) Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo (Asturias, España)

(2) Dpto. de Química Orgánica e Inorgánica, Universidad de Oviedo, Av. Julián Clavería, 8, 33005, Oviedo (España)

* corresponding author: uo285853@uniovi.es; cmarcos@uniovi.es

Palabras Clave: Vermiculitas, Tratamiento hidrotermal, Tratamiento térmico a alta temperatura, Tratamiento mecanoquímico, Dióxido de carbono. **Key Words:** Vermiculites, Hydrothermal treatment, High-temperature thermal treatment, Mechanochemical treatment, Carbon dioxide.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo analiza la evolución estructural de varias vermiculitas comerciales sometidas a tratamientos hidrotermales, mecanoquímicos y térmicos, con especial énfasis en los mecanismos de transformación bajo condiciones de interacción fluido-sólido. Para ello, se evalúa cómo la combinación de atmósfera reactiva (CO₂) y activación mecánica induce modificaciones cristalográficas y texturales con implicaciones geológicas y aplicadas (Marcos et al., 2023; Lahchich et al., 2024, 2025).

OBJETIVOS

1º) Comparar los efectos estructurales de tratamientos físicos e hidrotermales en vermiculitas de distinto origen. 2º) Evaluar la influencia del origen mineralógico en la respuesta del material a estos tratamientos. 3º) Integrar resultados estructurales, texturales y funcionales. 4º) Inferir implicaciones geológicas y potenciales aplicaciones como material con capacidad adsorbente.

METODOLOGÍA

Vermiculitas comerciales de Uganda (U) y de China (CHS y CHO) fueron sometidas a los siguientes tratamientos: 1) hidrotermales (100 °C, 10 bar, 24 h, con y sin CO₂); 2) mecanoquímicos (30 Hz, 30 min); 3) térmicos (1000 °C, 20 °C·min⁻¹, 1 h). La caracterización se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétricos (TG/DTG) para la caracterización estructural y mediante análisis BET (Brunauer-Emmett-Teller) para la caracterización textural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que los tratamientos aplicados generan alteraciones estructurales diferenciadas. Los tratamientos físicos inducen deshidratación abrupta, exfoliación y pérdida parcial de orden cristalino. Por el contrario, los tratamientos hidrotermales, especialmente en presencia de CO₂, implican interacción fluido-sólido, lixiviación de cationes y reorganización estructural progresiva, lo que demuestra que ambos procesos no son equivalentes, incluso cuando producen efectos texturales similares.

Desde el punto de vista textural, la superficie específica (S_{BET}) disminuye tras el tratamiento térmico, mientras que aumenta significativamente tras los tratamientos hidrotermales y mecanoquímicos. La activación mecanoquímica induce reducción de tamaño de partícula, delaminación y amorfización parcial, generando defectos estructurales responsables del incremento de S_{BET} y volumen de poro. Por su parte, el tratamiento hidrotermal con CO₂ favorece la reorganización laminar sin colapso estructural, optimizando la accesibilidad porosa. Atendiendo, a su origen mineralógico, las vermiculitas más puras tienden a amorfizarse progresivamente, mientras que las más heterogéneas muestran procesos de vermiculitización y reordenamiento estructural, evidenciando trayectorias evolutivas distintas.

La relación estructura–función no es lineal: incrementos de S_{BET} no implican necesariamente mayor capacidad adsorbente, ya que la funcionalidad está controlada por la accesibilidad y conectividad de los sitios activos más que por el área superficial total. En este contexto, la cristalinidad juega un papel clave: su disminución favorece la generación de porosidad, mientras que valores más altos incrementan la estabilidad estructural.

Finalmente, se identifica un efecto de memoria estructural, donde el comportamiento hidrotermal depende del estado previo del material, condicionando su evolución textural y funcional.

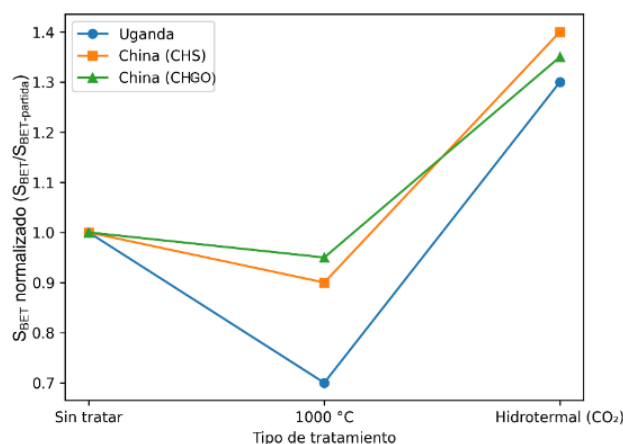


Fig 1. Evolución de la superficie específica normalizada ($S_{\text{BET}}/S_{\text{BET-partida}}$) en función del tratamiento aplicado en vermiculitas de distinto origen (U, CHS y CHO), evidenciando la influencia de la composición mineralógica en la evolución textural.

Tabla 1. Resumen de los efectos estructurales y texturales de los tratamientos aplicados a la vermiculita. Nota: Las flechas (\uparrow , \downarrow) indican incremento o disminución relativa respecto a la muestra sin tratar.

Tratamiento	Mecanismo dominante	Efecto estructural	Efecto textural
Térmico	Deshidratación	Pérdida de orden	$\downarrow S_{\text{BET}}$
Mecanoquímico	Activación mecánica	Amorfización	$\uparrow S_{\text{BET}}$, $\uparrow V_p$
Hidrotermal (CO ₂)	Fluido–sólido	Reorganización	$\uparrow S_{\text{BET}}$, optimización

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que la evolución de la vermiculita está controlada por la interacción entre los mecanismos mecanoquímicos, responsables de la generación de desorden y defectos estructurales, y los procesos hidrotermales en presencia de CO₂, que gobiernan la transformación mineral mediante interacción fluido–sólido. En este contexto, la cristalinidad emerge como el parámetro clave que regula las propiedades texturales del material. Asimismo, el estado estructural inicial introduce un efecto de memoria mineralógica que condiciona la respuesta del sistema. En conjunto, estos factores permiten establecer un control preciso de la relación estructura–textura–función y apoyan modelos de transformación hidrotermal natural de la vermiculita.

FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

MINECO (PID2024-161146OB-C22, PCI2019–111931-2 y PID2021-126098OB)-FEDER (I00/701AEI/FEDER10.13039/501100011033) Servicios Científico Técnicos de la Univ. de Oviedo y Centro de Instrumentación Científica (CIC) de la Univ. de Granada

REFERENCIAS

- Marcos, C., Lahchich, A., Álvarez-Lloret, P. (2023): Hydrothermally treated vermiculites: Ability to support products for CO₂ adsorption and geological implications. *Appl. Clay Sci.*, **232**, 106791.
- Lahchich, A., Álvarez-Lloret, P., Leardini, F., Marcos, C. (2024): Heat Treatment at 1000 °C under Reducing Atmosphere of Commercial Vermiculites. *Minerals*, **14**, 232.
- , —, Reynes, J.F., Marcos, C. (2025): Relationships Between Physicochemical and Structural Properties of Commercial Vermiculites. *Materials*, **18**, 831.