

Carbonatación mineral de yeso para un desarrollo de material sostenible

Natasha C. Acosta Pérez (1*), Carlos Pimentel (2), German Montes-Hernández (3), Pablo Almarza-Cifuentes (1), Matthias Kellermeier (4), Alexander E.S. Van Driessche (1)

(1) Instituto Andaluz de Ciencias de La Tierra, IACT-CSIC. Armilla, Granada (España)

(2) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid (España)

(3) Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, Grenoble, France

(4) Material Science, BASFSE, Ludwigshafen, Germany

* corresponding author: acosta.natasha@csic.es

Palabras Clave: Carbonatación mineral, Carbonato de calcio, Yeso, Vaterita, Espectroscopia Raman. **Keywords:** Mineral carbonation, Calcium carbonate, Gypsum, Raman spectroscopy.

INTRODUCCIÓN

La mitigación del cambio climático requiere la reducción de las emisiones de CO₂, provenientes principalmente de la combustión fósil y de la producción de cemento (IPCC, 2023). Entre las tecnologías desarrolladas con el fin de reducir estas emisiones, la carbonatación mineral ofrece una vía prometedora por ser un proceso efectivo y seguro para el almacenamiento del CO₂ (Lacheheb et al., 2020). Los materiales resultantes de la mineralización de CO₂ incluyen minerales como la calcita, el aragonito y la vaterita, que son ampliamente utilizados en la industria del papel, en la farmacéutica, en la cosmética y en la construcción, entre otros (Trushina, 2014, Jin et al., 2024). Una ventaja de la carbonatación mineral es que diferentes residuos industriales pueden ser utilizados como materia prima para llevar a cabo la carbonatación. En este contexto, el yeso (CaSO₄·2H₂O) es especialmente interesante debido a las grandes cantidades que se generan como subproducto o producto de deshecho, por ejemplo, en la construcción (placas de yeso) y en la síntesis de fertilizantes (fosfyeso) (Akfas et al., 2024, Hargis et al., 2024). En este sentido, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar un método eficiente y viable de captura de dióxido de carbono mediante la carbonatación directa de residuos de yeso, promoviendo la sostenibilidad al transformar los residuos ambientales en productos útiles y valiosos.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo, basada en Pimentel et al. (2026), consiste en la adición de 5,5 g de yeso en 100 mL de solución carbonatada (Na₂CO₃ o K₂CO₃), con una concentración de 0,5 M. El experimento de carbonatación se realiza a temperatura ambiente, en un reactor autoclave de 0,250 L y con un agitador mecánico. Con el fin de comprobar la viabilidad de utilizar el carbonato obtenido como materia prima en la construcción, este se mezcló con una solución acuosa con cloruro de magnesio y estroncio a una temperatura de 80°C, durante 24 horas. La monitorización de la reacción in situ y en tiempo real se llevó a cabo mediante espectroscopia Raman, medición de pH, conductividad y potencial de calcio. La caracterización detallada del material de partida y los productos generados se realizó mediante difracción de rayos X por el método del polvo (DRX), espectroscopia infrarroja (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y ensayos mecánicos.

RESULTADOS

La carbonatación del yeso se promovió mediante su interacción con una solución acuosa de carbonato. La reacción comienza con la disolución rápida del yeso, aumentando en la solución las concentraciones correspondientes a iones sulfato y calcio acuosos, alrededor de los 5 minutos (Fig. 1). Seguidamente, la reacción pasa por una fase intermedia entre 5 a 10 minutos donde se forma carbonato de calcio amorfo (ACC). Luego el ACC se transforma, a partir del minuto 13, dando lugar a la vaterita como única fase observada mediante espectroscopia Raman (Fig. 1a). Durante el experimento, el pH de la solución disminuye gradualmente de ~10,7 a ~10,2, durante los primeros 30 min (Fig. 1b), debido al consumo parcial de los iones carbonato mediante la mineralización de CaCO₃. Este proceso se ve favorecido por: la alta velocidad de disolución del yeso, la relación adecuada SO₄²⁻/CO₃²⁻ (mayor a 1 en el momento

que tiene lugar la cristalización de la vaterita), el pH moderadamente alcalino y la alta fuerza iónica del medio. La vaterita obtenida presenta alta pureza (>95–99%) y una elevada área superficial (9–22 m²/g). La vaterita presenta morfologías esféricas o en estrella, formadas por la agregación de nanopartículas (< 100 nm). Estas características la hacen altamente reactiva y útil en aplicaciones industriales. Al mezclarse con agua y sales de Mg²⁺/Sr²⁺, la transformación de vaterita en aragonito genera una estructura entrelazada que le otorga una resistencia a un nivel comparable al del cemento Portland ordinario.

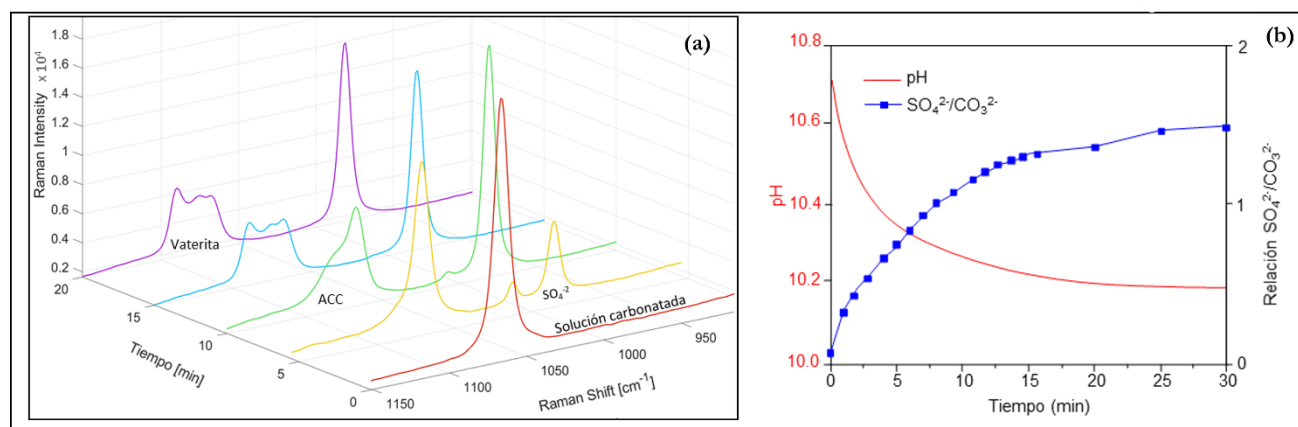


Fig 1. (a) Representación de los espectros Raman dependientes del tiempo adquiridos durante la carbonatación. (b) Evolución temporal de la relación entre concentraciones de iones sulfato y carbonato disueltos, según se deriva de los experimentos Raman *in situ* y, la variación del pH en función del tiempo durante la carbonatación (modificado de Pimentel et al., 2026).

IMPLICACIONES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado que es posible abordar dos desafíos ambientales críticos simultáneamente: la descarbonización de la atmósfera y la gestión adecuada de los residuos de yeso, a través de la carbonatación a temperatura ambiente y sin aditivos. Dentro de los resultados se logró obtener vaterita de alta pureza y elevada superficie específica que puede ser útil en diversas aplicaciones como en la construcción. Los ensayos realizados en el presente trabajo indican que la vaterita, obtenida mediante la captura de CO₂, puede ser utilizada como cemento de carbonato, ya que su transformación en aragonito ha manifestado tener una resistencia a la compresión comparable a la obtenida al utilizar cemento Portland. Adicionalmente, el producto secundario generado (Na₂SO₄ o K₂SO₄) podría reutilizarse en fertilizantes o reprocesarse, contribuyendo a una economía circular. Si bien el concepto es preliminar y requiere una evaluación más exhaustiva, estos resultados sugieren que la carbonatación del sulfato de calcio podría aprovecharse para convertir los abundantes residuos de yeso (p. ej., fosfoyeso, yeso rojo, citroyeso, entre otros) en un producto de interés económico, capturando, al mismo tiempo, dióxido de carbono, lo que contribuiría a un futuro más sostenible.

REFERENCIAS

- Akfas, F., Elghali, A., Aboulaich, M., Benzaazoua, J. (2024): Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? *Sci. Total Environ.*, **908**, 168196.
- Hargis, C.W., Chen, I., Maraghechi, H., Monteiro, P.J.M. (2024): Microstructure Development of Calcium Carbonate Cement through Polymorphic Transformations. *Cem. Concr. Compos.*, **153**, 105715.
- IPCC (2023): *Climate Change 2023: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 184 pp.
- Jin, F., Zhao, M., Xu, M., Mo, L. (2024): Maximising the Benefits of Calcium Carbonate in Sustainable Cements: Opportunities and Challenges Associated with Alkaline Waste Carbonation. *Materials Sustainability*, **2**.
- Lachehab, A., Mertah, O., Hassoune, H. (2020): Utilization of phosphogypsum in CO₂ mineral sequestration by producing potassium sulphate and calcium carbonate. *Mater. Sci. Energy Technol.*, **3**, 611-625.
- Pimentel, C., Montes-Hernández, G., Almarza-Cifuentes, P., Kellermeier, M., VanDriessche, A. (2026): From Waste to Value: Conversion of Calcium Sulfate to vaterite via carbon capture and storage. *Adv. Funct. Mater.*, **34**, e19977.
- Trushina, D.B. (2014): CaCO₃ vaterite microparticles for biomedical and personal care applications. *Mater. Sci. Eng.*, **45**, 644–658.