

Estudio preliminar de residuos industriales como reactivos en sistemas de tratamiento pasivo DAS

Olivia Lozano Soria (1*), Cinta Barba Brioso (1), Adolfo Miras Ruiz (1), Patricia Aparicio Fernández (1), Joaquín Delgado Rodríguez (1)

(1) Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Universidad de Sevilla, 41012, Sevilla (España)

* corresponding author: olozano2@us.es

Palabras Clave: Drenaje ácido de minas, Sulfatos solubles, Epsomita. **Key Words:** DAM, Soluble sulphates, Epsomite.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los drenajes ácidos de mina (DAM) en la Faja Pirítica Ibérica (FPI) representa un desafío crítico debido a las elevadas concentraciones de metales y metaloides, se posiciona como uno de los mayores problemas ambientales en los distritos mineros de sulfuros masivos de la FPI. En este contexto, el sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) ha emergido como una posible solución técnica eficaz para tratar lixiviados con alta carga metálica utilizando la dispersión de un reactivo alcalino en una matriz inerte (Rötting et al., 2008), aunque su viabilidad económica se ve comprometida por el coste de los reactivos alcalinos tradicionales. Este estudio evalúa la idoneidad de diversos residuos industriales (RC, Liximag, Inertimag, MCB-100 y Magcal) como alternativas de bajo coste, integrando los principios de la economía circular en la remediación ambiental.

METODOLOGÍA

El éxito de este proceso de remediación reside en la precipitación química y el fraccionamiento de elementos hacia fases minerales sólidas. Sin embargo, la naturaleza de estos precipitados suele ser de baja cristalinidad, lo que dificulta su caracterización y la predicción de su comportamiento a largo plazo. Estudios recientes indican que fases minerales formadas bajo diversas condiciones de pH (principalmente oxihidróxidos-sulfatos de Fe y Al, así como fases carbonatadas) juegan un papel crucial en la retención de metales pesados. Mediante técnicas avanzadas se analizan las paragénesis de las fases sólidas neoformadas para comprender cómo estos nuevos sustratos controlan la retención metálica. Se emplearon columnas de lixiviación a escala de laboratorio saturadas con DAM procedente de la mina Peña de Hierro (Riotinto, Huelva), caracterizado por un pH entre 2 y 3, y una alta carga de sulfatos y metales-metaloides. El sustrato reactivo se configuró mezclando un 12,5% del residuo industrial con virutas de serrín como matriz inerte para asegurar la porosidad del sistema. La evolución del ensayo se monitorizó durante 81 días mediante el seguimiento de parámetros hidroquímicos y cuantificación elemental por ICP-OES/MS. Una vez finalizado, se caracterizaron detalladamente las fases secundarias mediante Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) en los frentes de reacción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización de los reactivos de partida reveló una composición mineralógica diferenciada. Tras el estudio detallado de datos en estudios previos, se establece que los reactivos analizados presentan alta reactividad e interacción con el AMD. En el caso de RC, compuesto mayoritariamente por calcita (99,3%), demostró ser altamente efectivo al estabilizar el pH en torno a 6,5. Por su parte, Liximag, Inertimag y MCB-100 elevaron el pH a valores próximos a 10, optimizando la inmovilización de metales divalentes, por lo que se determinó que los reactivos RC, Liximag, Inertimag y MCB-100 serían idóneos para el sistema DAS. En contraste, el reactivo Magcal se clasificó como no apto debido a su excesiva alcalinidad (pH 12,5). Atendiendo a criterios de eficiencia geoquímica y viabilidad económica se deberían descartar Magcal y MCB-100 para sistemas de tratamiento pasivo debido a su elevado valor añadido para algunos procesos primarios.

Los reactivos Liximag (M3) constituido por brucita (48,2%) y magnesita (41,9%), e Inertimag (M4) mayoritariamente periclase (48,2%) y magnesita (42%), se consolidan como las alternativas de mayor idoneidad. Tras la interacción de estos materiales con el DAM, se observó una zonación mineralógica marcada por un frente de oxidación ocre

superior de oxihidróxidos de Fe y Al de alta reactividad. Si bien la paragénesis inicial se ajusta a la formación de fases comúnmente reportadas como hidroxisulfatos (grupo alunita-jarosita) (Delgado et al., 2025), los nuevos datos revelan una complejidad mineralógica superior. La elevada actividad del Mg, procedente de la disolución oxidativa del reactivo, promueve una rápida neutralización de la acidez, con la formación de sulfatos hidratados (eflorescencias). La analítica de las soluciones demuestra valores de retención para Fe, Al y Cu superiores al 90%. Por otro lado, el análisis de SEM corroboró que estos agregados inmovilizan metales traza como Zn, probablemente mediante fenómenos de sustitución isomórfica (Lozano et al., 2026). Los ensayos con Inertimag demuestran la interacción del Mg de la periclasa con la consecuente formación de fases minerales sulfatadas del grupo de la melanterita (Fe-Cu-Zn) y otras como la epsomita (Mg) (Fig. 1). Por otro lado, en M3 la disolución de la brucita favorece la sobresaturación local con la aparición de sulfatos solubles como epsomita, hexahidrita, melanterita y coquimbita (identificados por DRX y confirmados por SEM-EDS) que actúan como sumideros temporales de metales divalentes (Mg-Fe-Zn-Cu). En zonas de saturación más profundas, el incremento sostenido de pH y la continua liberación de Mg hacia zonas inferiores, favorece la transición hacia fases carbonatadas altamente hidratadas tras la neutralización primaria, identificándose hidromagnesita, ferromagnesita e hidrocalcita.

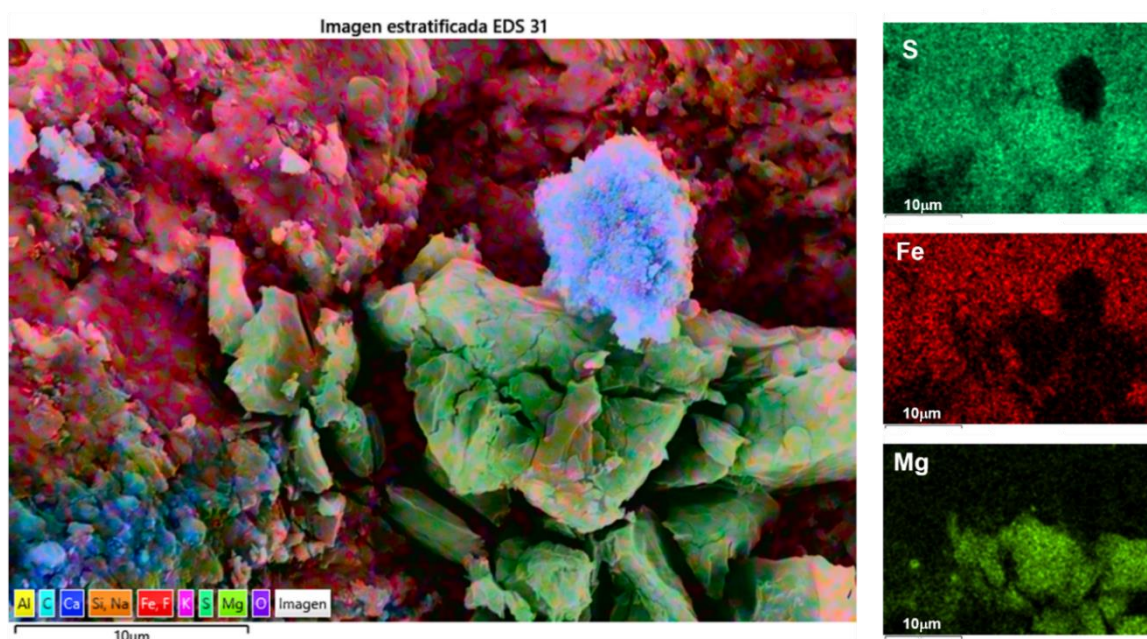


Fig 1. Paragénesis con hidroxisulfatos y agregados de sulfatos solubles tipo epsomita.

CONCLUSIONES

El uso de Liximag e Inertimag como sustratos reactivos en sistemas DAS no solo es técnicamente viable, sino que ofrece una capacidad de neutralización comparable a los reactivos tradicionales de alta pureza, con el valor añadido de reducir los costes operativos e integrando los principios de la economía circular en la remediación ambiental. La formación de oxihidróxidos y sulfatos secundarios demuestra una dinámica geoquímica favorable que promueve la retención metálica prolongada. Este enfoque proporciona una base sólida para el diseño de sistemas de tratamiento multietapa orientados a la recuperación de metales y la gestión sostenible de pasivos mineros en la FPI.

REFERENCIAS

- Delgado, J., Lozano, O., Ayala, D., Martín, D., Barba-Brioso, C. (2025): Geochemistry and Mineralogy of Precipitates from Passive Treatment of Acid Mine Drainage: Implications for Future Management Strategies. *Minerals*, **15**, 1. DOI:10.3390/min15010015.
- Lozano, O., Delgado, J., Barba-Brioso, C. (2026): Evaluación de la adecuación metodológica en la caracterización geoquímica de minerales del grupo Copiapita y Melanterita. *Geogaceta*, en prensa.
- Rötting, T.S., Thomas, R.C., Ayora, C., Carrera, J. (2008): Passive Treatment of Acid Mine Drainage with High Metal Concentrations Using Dispersed Alkaline Substrate. *J. Environ. Qual.*, **37**, 1741–1751. DOI: 10.2134/jeq2007.0517.