

# Concentración y distribución de metales críticos en lateritas, bauxitas y lodos rojos

Blanca Bauluz (1\*), Elisa Laita (2), Alfonso Yuste (1)

(1) IUCA - Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza (España)

(2) Departamento de Geología - CEACTEMA. Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas sn, 23071, Jaén (España)

\* corresponding author: [bauluz@unizar.es](mailto:bauluz@unizar.es)

**Palabras Clave:** Bauxitas, Lateritas, Lodos rojos, Metales críticos. **Key Words:** Bauxites, Critical metals, Laterites, Red muds.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de meteorización química a partir de los cuales se forman rocas ricas en aluminio (ej. lateritas y bauxitas) dan lugar también a la concentración de metales que son considerados críticos por la Unión Europea (European Commission, 2023), entre los que se incluyen Be, Sr, Sc, V, Co, Nb, Hf, Ta, W, Ga, Bi, Ge, As, Sb y los elementos de las tierras raras (REE). Además, los residuos de bauxita resultantes de la extracción de alúmina mediante el proceso Bayer (lodos rojos), también son una valiosa fuente de estos metales (Binnemans et al., 2015). Estos metales tienen un gran interés económico dadas sus numerosas aplicaciones relacionadas con la generación de energías alternativas y en la producción de vehículos no contaminantes (Goodenough et al., 2017). Por ello, este trabajo se centra en la caracterización mineralógica y geoquímica de lateritas, bauxitas y lodos rojos con el fin de evaluar la concentración de metales críticos en estos materiales y determinar qué fases minerales controlan su distribución.

## METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Se han analizado un total de 25 lateritas y 22 bauxitas del NE de la Península Ibérica. Las lateritas proceden de cuatro perfiles continentales del Cretácico Inferior del SE de la Cordillera Ibérica mientras que las bauxitas proceden de depósitos de bauxitas kársticas del Cretácico localizados en las Sierras Exteriores del Pirineo y en la Serranía de Cuenca. También se han analizado tres bauxitas y sus correspondientes lodos rojos suministrados por tres compañías: Alteo (Francia), Mytilineos S.A. (Grecia) y una empresa española cuyo nombre es confidencial.

Las lateritas y algunas bauxitas kársticas habían sido previamente caracterizadas desde un punto de vista mineralógico (Laita et al., 2020, Laita et al., 2021). Las lateritas están principalmente formadas por caolinita, fases tipo illita, esmectita, cuarzo, hematites, goethita y proporciones menores de ortoclasa, ilmenita, rutilo, anatasa y diásporo. Las bauxitas se componen principalmente de boehmita, caolinita, hematites, goethita, gibbsita y proporciones menores de rutilo y anatasa. Se llevaron a cabo análisis geoquímicos del contenido en elementos traza de las muestras en los Laboratorios Actlabs (Canadá) mediante espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) y se determinó la mineralogía de las bauxitas y los lodos rojos suministrados por las empresas mediante difracción de rayos X (DRX) en la Universidad de Zaragoza. Utilizando el software systat13, se realizaron matrices de correlación a partir de los datos mineralógicos y geoquímicos de las lateritas, las bauxitas y los lodos rojos. Se analizaron, además, diferentes fracciones de lodos rojos por ICP-MS (<0,15/53, <53/20 y <20 µm), para determinar en qué fracción se concentran los metales críticos y se seleccionaron 4 muestras de lateritas y 4 muestras de bauxitas kársticas con alto contenido en metales críticos para identificar mediante microscopía electrónica de barrido (FESEM) y de transmisión (TEM) qué fases minerales contienen los metales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las bauxitas proporcionadas por las empresas griega y española están formadas principalmente por gibbsita (~88%) mientras que en la bauxita griega el mineral dominante es el diásporo (69%). Las tres muestras contienen también proporciones menores de boehmita, goethita, anatasa, rutilo, hematites y calcita (<5-10%). Los tres lodos rojos están formados principalmente por gibbsita (18-48%), hematites (16-29%) y goethita (5-19%) junto con diásporo, boehmita y calcita (5-15%), nyererita y ussingita (5-8%) y proporciones menores de anatasa, rutilo y albita (<5%).

Los resultados de ICP-MS muestran que las bauxitas kársticas tienen un contenido promedio en metales críticos de 1302 ppm mientras que el de las lateritas es de 772 ppm, lo que refleja que la concentración de estos metales es mayor cuanto mayor es el proceso de meteorización química. Por otro lado, el contenido en metales críticos de los lodos rojos proporcionados por las empresas es de 2152 ppm, que si se compara con el de las bauxitas de las que proceden (1146 ppm), refleja que el factor de enriquecimiento de metales críticos en estos residuos bauxíticos es casi el doble. Además, entre las fracciones de los lodos rojos analizadas, los metales críticos se concentran más en la fracción <math><20\ \mu\text{m}</math> (2320 ppm).

De acuerdo con las matrices de correlación, en las lateritas, aquellos metales críticos pertenecientes al grupo de los metales de transición (Sc, V, Co, Nb, Hf, Ta, W), al de otros metales (Ga y Bi) y al de los metaloides (As y Sb) presentan una buena correlación con la caolinita, goethita y hematites, mientras que los alcalinotérreos (Be y Sr) tienen buena correlación con la illita y las REE con la caolinita. Los resultados de TEM muestran la presencia de monacita, xenotima, zircón, óxidos de La y óxidos de Ce formando fases discretas (nanopartículas que forman agregados de hasta 100 nm) que están adsorbidas en la superficie de la caolinita. Todo esto indicaría que tanto los óxidos de Fe y Ti, como los minerales de la arcilla controlan la distribución de los metales críticos en las lateritas (Laita et al., 2024).

En las bauxitas kársticas, solo los metales de transición, otros metales y metaloides tienen buena correlación con el hematites y la goethita, por lo que podrían estar adsorbidos en la superficie de estos minerales. La ausencia de correlación de las REE con los minerales que forman las bauxitas se debe a que se encuentran en fosfatos y circones que no se detectaron por DRX, pero se observaron en el FESEM. Estos minerales presentan tamaños mayores que las fases observadas en las lateritas (1-10  $\mu\text{m}$ ). Los fosfatos están enriquecidos en tierras raras ligeras (La, Ce, Pr, Nd y Sm) y/o tierras raras pesadas (Gd, Dy, Er e Yb) e Y, mientras que los circones están enriquecidos en Y.

Por último, en las bauxitas suministradas por las empresas, la mayoría de los metales presentan en general buena correlación con la boehmita, calcita, diásporo y hematites, mientras que la correlación es negativa con la gibbsita. Por el contrario, en los lodos rojos, ningún metal se correlaciona con la boehmita, algunos sí se correlacionan con diásporo, hematites y anatasa y todos (excepto el grupo de otros metales) se correlacionan con nyereita y ussigita. Esto indicaría que, tras la extracción de la alúmina de las bauxitas, los metales críticos pasan a incorporarse a aquellos minerales que se han formado durante el proceso Bayer, así como a los que son resistentes a dicho proceso.

## REFERENCIAS

- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Pontikes, Y. (2015). Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review. *J. Clean. Prod.*, **99**, 17–38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.089
- European Commission (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023. Final Report. DOI: 10.2873/725585.
- Goodenough, K.M. Wall, F., Merriman, D. (2017). The rare earth elements: demand, global resources and challenges for resourcing future generations. *Nat. Resour. Res.*, **27**, 201–216. DOI: 10.1007/s11053-017-9336-5
- 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). *Sediment. Geol.*, **403**, 105673. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2020.105673
- Laita, E., Bauluz, B., Mayayo, M.J., Yuste, A. (2021). Mineral and textural transformations in mixtures of Al-rich and Al–K-rich clays with firing: Refractory potential of the fired products. *Ceram. Int.*, **47(10)**, 14527–14539. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.032
- Laita, E., Bauluz, B., Yuste, A. (2024). The role of clay minerals in the concentration and distribution of critical metals in lateritic palaeosols from NE Iberia. *Appl. Clay Sci.*, **249**, 107264. DOI: 10.1016/j.clay.2024.107264

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2021-123127OB-I00) y es parte de la ayuda JDC2022-048348-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR”