

# Caracterización química y mineralógica de escorias mineras para su valorización en la fabricación de elementos de construcción civil

Dino Lucio Quispe (1), Edwin Roberto Gudiel (1), María Dolores Basallote (2\*), Rafael León (2), Jonatán Romero (2), Carlos R. Cánovas (2)

(1) Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Andina del Cusco. MZA. A LOTE. 5 URB. Ingeniería Larapa, San Jerónimo, Cusco (Perú)

(2) Departamento de Ciencias de la Tierra & Centro de Investigación en Recursos Naturales, Salud y Medioambiente. Universidad de Huelva. Campus 'El Carmen' s/n, 21071, Huelva (España)

\* corresponding author: [maria.basallote@dct.uhu.es](mailto:maria.basallote@dct.uhu.es)

**Palabras Clave:** Escoria de fundición, Valorización de residuos, Activación alcalina, Reactividad mineral, Geopolímero.

**Key Words:** Slag, Waste valorization, Alkali activation, Mineral reactivity, Geopolymer.

## INTRODUCCIÓN

Las escorias mineras son el subproducto de la fundición de menas metálicas, destinadas a concentrar el metal de interés económico. Estos materiales se caracterizan por tener una composición rica en silicatos y óxidos metálicos que condicionan su reactividad. En este sentido, hay un creciente interés en el aprovechamiento de estos materiales en los últimos 30 años, especialmente enfocado como material de construcción, diferentes aplicaciones ambientales y en la recuperación de metales de interés económico (Piatak et al., 2015). Sin embargo, estas escorias pueden presentar elevadas concentraciones de metales que pueden limitar sus usos y suponer un riesgo ambiental bajo condiciones de meteorización. Es necesario, por tanto, una caracterización de estas escorias, debido a las variaciones composicionales asociadas al tipo de mineral, tipo de fundente, características del proceso de fundición, etc. En este sentido, la minería en Perú se ha asentado en los últimos años como uno de los pilares económicos, con un 53 % de los bienes de exportación asociados a la minería. Sin embargo, esta intensa actividad lleva asociado un impacto ambiental con la generación de grandes volúmenes de residuos de extracción y procesado, que requieren una adecuada gestión ambiental. Este trabajo se centra en la caracterización química y mineralógica de diferentes escorias de fundición procedentes del centro del Perú para conocer su idoneidad como materiales de construcción en ingeniería civil.

## METODOLOGÍA

Se muestrearon diferentes tipos de escorias ( $n=3$ ) de fundición procedentes de áreas mineras del centro del Perú. Mediante un muestreo sistemático, se recogió una muestra composite de 50 kg. Estas muestras fueron llevadas a los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Andina del Cusco, donde se procedió al cuarteo, tamizado, secado a 30 °C, molienda y preparación de las muestras para caracterización química y mineralógica, y para la aplicación de productos. La composición química de las muestras fue determinada mediante ICP-OES e ICP-MS tras digestión con mezcla de ácidos ( $\text{HNO}_3$ , HF y HCl). Para evaluar la reactividad mineral de las muestras se realizó un test de pH-paste consistente en medir el pH y la conductividad eléctrica (EC) de la muestra en contacto 1 hora con agua destilada (ratio 1:2). Las muestras fueron analizadas mediante difracción de rayos X (DRX) con un equipo Bruker D8 Advance con radiación Cu K $\alpha$  y mediante un microscopio electrónico de barrido con cañón de emisión de campo (FESEM) Marca JEOL, modelo JSM-IT500-HR.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

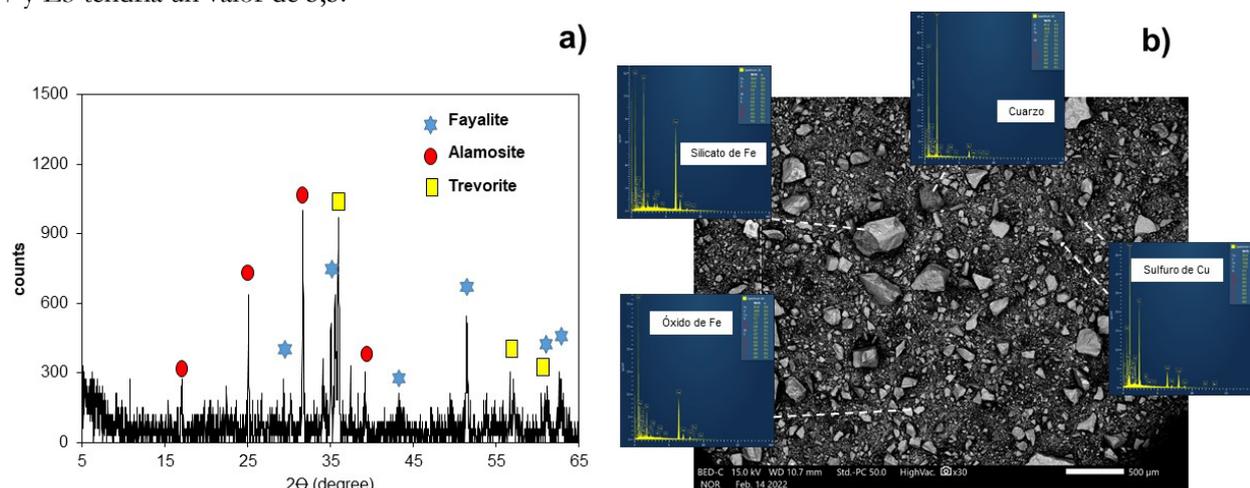
La Tabla 1 muestra la composición química de las escorias estudiadas, caracterizadas por su elevado contenido en Fe (36-71 % en peso de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y Si (25-26 % en peso de  $\text{SiO}_2$ ). Las escorias E1 y E2 presentaron además elevadas concentraciones de Ca (14-17 % en peso de CaO), a diferencia de E3 con un escaso contenido en Ca. Respecto al contenido en elementos traza, las escorias E1 y E2 destacan por su contenido en Zn (18433-20101 mg/kg), Mn (2015-2561 mg/kg), Pb (2061-2615 mg/kg) y W (1127-1184 mg/kg). Por el contrario, la escoria E3 contiene

concentraciones significativas de Cu (11549 mg/kg) y As (902 mg/kg). El test de reactividad indica que la escoria E3 (EC de 263  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) es mucho más reactiva que las escorias E1 y E2 (EC 40-68  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Codigo	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mn	Cu	Zn	As	W	Pb	pH	EC
	%	%	%	%	%	%	%	mg /kg		$\mu\text{S}/\text{cm}$					
E1	36	25	17	3.7	2.0	0.40	0.03	2561	2146	18433	317	1127	2061	7.43	40
E2	41	26	14	3.7	1.7	0.42	0.03	2015	2282	20101	331	1184	2615	7.24	68
E3	71	25	0.80	4.5	0.60	1.1	0.2	268	11549	7096	902	33	582	5.73	263

**Tabla 1.** Composición química de las escorias estudiadas y su reactividad ante el test pH-paste.

Respecto a su composición mineralógica, las escorias E1 y E2 presentaron una composición vítrea debido a la calcinación a temperaturas muy elevadas, mientras que E3 está compuesta fundamentalmente por fayalita, un silicato de Fe comúnmente formado durante la fundición de minerales ricos en Fe, un óxido de Fe y Ni conocido como trevorita, que posee propiedades magnéticas y por alamosita, un silicato de plomo (Fig. 1a). Las imágenes de FESEM confirman la presencia de silicatos (i.e., fayalita) y óxidos (cuarzo, magnetita, trevorita, etc.) como componentes principales (Fig. 1b), con la presencia minoritaria de sulfuros alojados en la estructura de silicatos. Para obtener geopolímeros de uso en construcción es necesaria una materia prima rica en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, prevaleciendo los materiales cristalinos sobre los amorfos. De esta forma, y aunque se han reportado relaciones de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en geopolímeros entre 1,6 y 5, estos materiales tienen una gran durabilidad y resistencia mecánica cuando la relación adquiere un valor de 4 (Mabroum et al., 2020). En este sentido, las escorias E1 y E2 tendrían una relación próxima a 7 y E3 tendría un valor de 5,5.



**Fig 1.** Patrón de DRX (a) e imagen de FESEM (b) de la escoria E3.

## CONCLUSIONES

El análisis preliminar de las escorias utilizadas muestra la idoneidad para ser utilizadas en la síntesis de geopolímeros para aplicaciones de construcción, especialmente E3 por su carácter cristalino y su relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El alto contenido de elementos de interés económico (Cu, Zn o W) sugiere, además, su estudio para la extracción de estos metales, que están asociados a los silicatos de Fe.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el proyecto “Nuevos conglomerantes producto de la valorización de escorias mineras (Cu-Zn) para ser usados en la construcción y proyectos de ingeniería civil”, aprobado bajo Contrato N 013-201--FONDECYT-BM-INC.INV.

## REFERENCIAS

- Mabroum, S., Moukannaam, S., El Machi, A., Taha, Y. Benzaazoua, M., Hakkou, R. (2020): Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, **1**, 100014.
- Piatak, N.M., Parsons, M.B., Seal, R.R. (2015): Characteristics and environmental aspects of slag: a review. *Appl. Geochem.*, **57**, 236-266.