

Evaluación de residuos mineros con elementos potencialmente tóxicos (EPT) como fuente extractiva de metales

Evaluation of mining waste with potentially toxic elements (PTE) as a metals extractive source

M. A. Navarrete-Aguilar ^a, I. Almaraz-Méndez ^a, A. M. Teja-Ruiz ^b, J.C. Juárez-Tapia ^a, G. Cisneros-Flores ^a, J. I. Martínez- Soto ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Hidalgo Km 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42184, México.

^b Dirección de Laboratorios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto 42184, México.

Resumen

Entre aquellos residuos mineros que generan mayor preocupación ambiental se encuentran las presas que jales, que pese a los recubrimientos que se aplican sobre las superficies para evitar futuras percolaciones, la fina granulometría de sus partículas propicia el transporte y diseminación de las mismas ante fuertes lluvias o vendavales en zonas conurbadas a la actividad minera. El presente estudio reporta la caracterización de los polvos residuales, comprobando la condición mixta de las partículas que favorecen la liberación de elementos traza y metales base. Se identificó un inosilicato de calcio y hierro como matriz de la muestra, además de la presencia de especies como galena, esfalerita y cubanita, que corroboran las altas concentraciones de metales base moderadamente enriquecidos. Los índices de acumulación reportan la presencia de elementos potencialmente tóxicos con relación a la plata, el elemento de mayor factor de enriquecimiento y por el cual es posible catalogar a estos residuos mineros como una fuente extractiva alternativa.

Palabras Clave: Residuos mineros, factor de enriquecimiento, índice de acumulación, fuente alternativa, caracterización.

Abstract

Among those mining waste that generates the greatest environmental concerns are the mining tailing, which despite the coatings that are applied to the surfaces to prevent future percolation, the fine granulometry of their particles encourages their transport and dissemination in the event of heavy rain or gales in areas surrounding mining activity. The present study reports the characterization of the residual powders, verifying the mixed condition of the particles that favor the release of trace elements and base metals. Calcium and iron inosilicate were identified as the matrix of the sample, in addition to species such as galena, sphalerite and cubanite, which corroborate the high concentrations of moderately enriched base metals. The accumulation indices report the presence of potentially toxic elements in relation to silver, the element with the highest enrichment factor and for which it is possible to classify these mining waste as an alternative extractive source.

Keywords: Mining waste, characterization, enrichment factor, accumulation index, alternative source.

1. Introducción

La constante explotación de un ecosistema deviene en la pérdida de la resiliencia al recuperar sus recursos (Ansari et. Al, 1999). Pese a los esfuerzos por las comunidades y las mismas empresas de subsanar las consecuencias de la explotación minera con la inundación o cobertura con

materiales inertes de sitios de arranque, el recubrimiento con geomembranas en presas de jales y programas de reforestación con especies capaces de absorber metales traza o resistir las adversidades de los úsels alterados (Sánchez, 2012; Kinnunen et al., 2019).

A nivel mundial, la gran cantidad de accidentes ambientales relacionados con la actividad minera ha impulsado la búsqueda

*Autor para la correspondencia: al421315@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: na419497@uaeh.edu.mx (Maria Azucena Navarrete-Aguilar), al421315@uaeh.edu.mx (Israel Almaraz-Méndez), aislinn_teja@uaeh.edu.mx (Aislinn Michelle Teja-Ruiz), jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio Cesar Juárez-Tapia), ci336682@uaeh.edu.mx (Gabriel Cisneros-Flores), ma262816@uaeh.edu.mx (Jesús Iván Martínez-Soto)

de un equilibrio entre la normatividad y la rentabilidad, donde se regule las consecuencias negativas sobre el medio ambiente y se refuercen las acciones dirigidas a una economía circular (Von der Goltz et al., 2019; Deiana et al., 2023). El adecuado manejo, tratamiento y neutralización de residuos peligrosos requiere de la clasificación de su composición química como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) u oligoelementos, sin embargo, también involucra etapas operativas costosas que deben absorber las empresas. Determinar las características físicas y químicas de los polvos, gases o soluciones residuales abre un área de oportunidad en la propuesta de nuevas aplicaciones y el uso de residuos como una fuente extractiva alternativa que cubra o enriquezca la demanda por ciertos elementos de interés económico, cambiando así, el concepto de ganga por mena (Black et al., 2005; Benshaul-Tolonen, 2019). En 2023, Acordi et al. realiza la valorización de residuos mineros provenientes de la minería de carbón desde una perspectiva de economía circular, reportando que la matriz mineralógica de los polvos residuales está compuesta por sílice, alúmina y óxido de hierro, logrando clasificarlos como materiales no peligrosos adecuados para la búsqueda de aplicaciones en el sector de la construcción (Acordi et al., 2023; Fernihough, 2021).

Fabiańska et al. (2024) reportó la alteración geoquímica de residuos mineros generados en 1998 causadas por la meteorización a partir de la caracterización petrográfica y mineralógica. Debido al tiempo y almacenamiento de los residuos en los vertederos, las alteraciones mineralógicas de los polvos se relacionan con la oxidación de sulfuros de hierro, principalmente goethita y jarosita. El resto de la matriz mineralógica no presenta señales de alteración ni la presentación de elementos potencialmente tóxicos (Fabiańska et al., 2024; Ciesielczuk et al., 2014)

En los distritos mineros donde el arranque, procesamiento, concentración y extracción de recursos se ve reflejado en más de doscientos años de historia, las problemáticas ambientales resultan parte de su cotidianidad. Todo tipo de residuos logran entrar en contacto con la naturaleza, incluyendo suelos y recursos hídricos de servicio poblacional (Moreno et al., 2012; Helena- Xavier et al., 2023).

Hernández-Ramos (2024) evaluó el uso de relaves de metales preciosos como material cementario suplementario al ser caracterizado principalmente mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) y microscopia electrónica de barrido (MEB) corrobora la matriz del material como un gel de hidrato de silicato de calcio (CSH), para posteriormente mejorar sus propiedades mediante la actividad mecánica y térmica a 1000°C durante 140 min. El proceso de calcinación contribuye a la reducción del tamaño de los cristales y sus propiedades mecánicas fueron corroboradas mediante ensayos de comprensión confinada e índice de actividad de resistencia (Hernández-Ramos et al., 2024)

Pizarro- Barraza (2024) resaltan la importancia de los relaves mineros como una fuente generadora de nanomateriales desde una perspectiva ambiental con múltiples aplicaciones como la medicina, la electrónica y la tecnología de materiales. Establecen que el aprovechamiento de residuos mineros es comúnmente subestimado aun cuando presentan altas leyes de metales que pueden ser aprovechados como un valor agregado de los productos principales, así como el aprovechamiento de material ganga para rellenos inertes y material de construcción, atendiendo de primera una gestión

sostenible de los sólidos residuales en la industria minera (Pizarro- Barraza et al., 2024).

El presente estudio, reporta la caracterización de residuos sólidos de granulometría fina que, al estar a la intemperie en zonas conurbadas al distrito minero de Zimapán, y no contar con medios de contención y reserva adecuados, se dispersan al contacto con los agentes de erosión. El estudio de estos residuos sólidos es fundamental para la búsqueda de alternativas de tratamiento o incluso su reintegración al proceso extractivo como fuentes secundarias en busca de operaciones mineras sustentables.

2. Diseño experimental

La muestra representativa fue obtenida en la zona conurbada del distrito minero de Zimapán, Hgo. Dicha muestra fue secada, homogenizada por la técnica de cuarteo y acotada a distintos diámetros de partícula según el tren de tamices pertenecientes a la serie de Tyler que se muestran en la tabla, acompañados de un Ro- Tap.

Tabla 1. Tren de tamices utilizado para el análisis granulométrico de los residuos mineros

Rango de malla	-80+150	-150+170	-170+250	-250+325	-325+400	-400
Equivalencia en µm	>104	-104 +88	-88 +61	-61 +43	-43 +33	<33

Las partículas acotadas a 61 µm fueron utilizadas para realizar el estudio de los polvos a partir de la técnica de DRX usando un equipo Inel Equinox 2000 con radiación CoKα (1.78901 Å), 40 kV y 25 mA para definir las especies mineralógicas mayoritarias. Posteriormente, las partículas fueron embebidas en resina epóxica para la formación de una probeta con acabado espejo. Dicha probeta fue analizada mediante la técnica de MEB y por Espectroscopía por Dispersión de Energía de Rayos X (EDS) usando un equipo a JEOL modelo JSM 6300 de 30 KV a diferentes ampliaciones con electrones retrodispersados, esto con la finalidad de definir la morfología y homogeneidad química de la muestra, además de realizar análisis químicos puntuales y el procedimiento de mapeo para obtener un reporte semicuantitativo de la composición de la muestra.

Para el análisis granulométrico, se consideró 0.5 g de las partículas acotadas en cada malla y se le sometió a un ataque ácido usando 15 mL de ácido clorhídrico y 5 mL de ácido nítrico, la digestión se realizó durante 90 min a una temperatura de 85°C. La solución resultante fue aforada a 100 mL y analizada mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) usando un equipo Perkin Elmer 8300, los resultados obtenidos mediante esta técnica permitieron el cálculo de leyes de corte, factores de enriquecimiento e índices de acumulación para la evaluación de los residuos mineros solidos como fuentes extractivas alternativas.

El cálculo de factores de enriquecimiento se realizó mediante la siguiente expresión:

$$FE = \frac{(X/Fe)_{Muestra}}{(X/Fe)_{Corteza}}$$

Ec. (1)

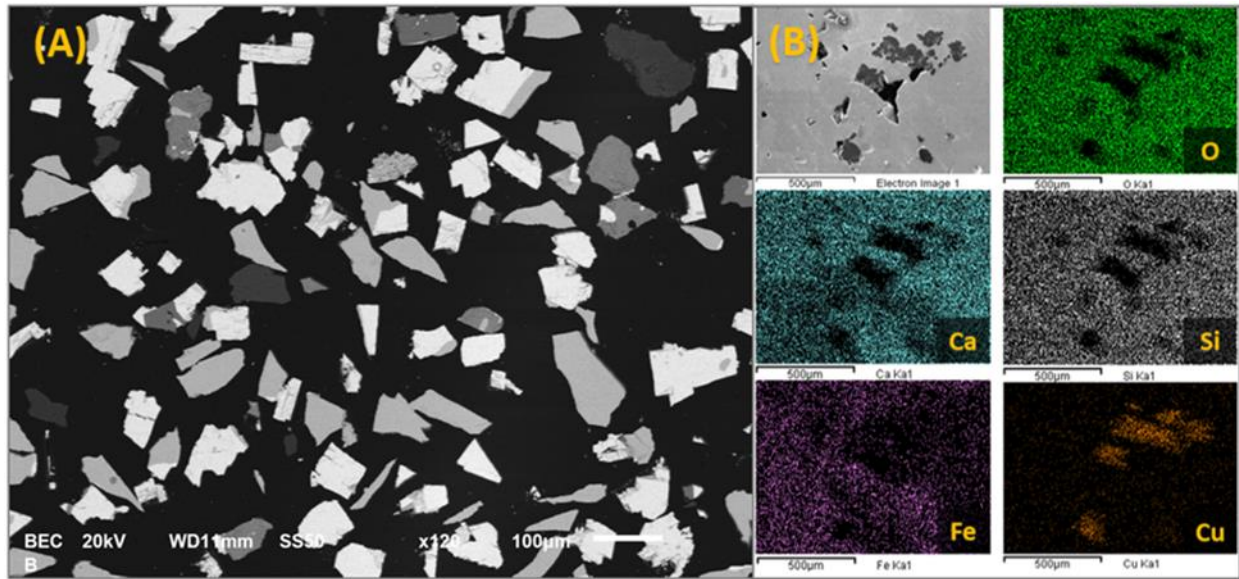


Figura 1. (A) Micrografía de los residuos sólidos acotada a 61 µm, obtenida con electrones retro dispersados. (B) Mapeo de la matriz mineralógica de la muestra de polvos residuales de plantas de beneficio.

Donde $(X/Fe)_{\text{muestra}}$, representa la relación entre la concentración del elemento de interés y la concentración de hierro en la muestra. El termino $(X/Fe)_{\text{corteza}}$, plantea la relación entre la concentración del elemento de interés y la concentración de hierro en la corteza terrestre. Se usa al hierro como referencia, siendo este el elemento base de interés económico más abundante en la roca madre. El factor de enriquecimiento establece la concentración mínima que debe cumplir un depósito mineral para considerarse como fuente extractiva de cierto elemento, por lo que puede utilizarse en el planteamiento de fuentes extractivas alternativas.

El cálculo de los índices de Geoacumulación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{Cn}{1.5 Bn}$$

Donde Cn se refiere a concentración del elemento de interés en la muestra analizada y Bn corresponde a la concentración geoquímica del elemento en la corteza terrestre. Este intervalo permite informar sobre un valor numérico que representa un parámetro de contaminación en suelos o sedimentos asociado al impacto ambiental de actividades de origen antropogénico.

3. Caracterización Mineralógica

Las micrografías obtenidas mediante la técnica de MEB-EDS con electrones retrodispersados permitieron identificar partículas metálicas (tonalidad clara), no metálicas (tonalidad

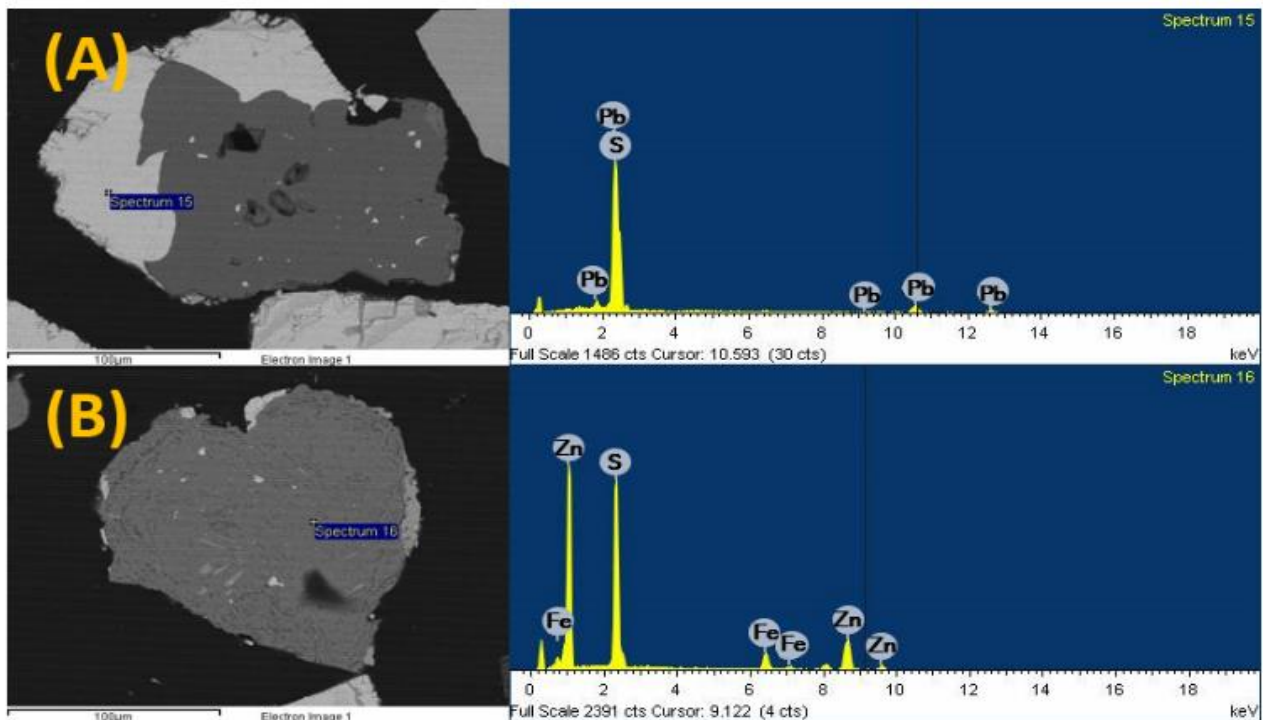


Figura 2. Análisis puntuales de la muestra en mineral en polvo (A) Sulfuro de plomo (B) Sulfuro de zinc y hierro.

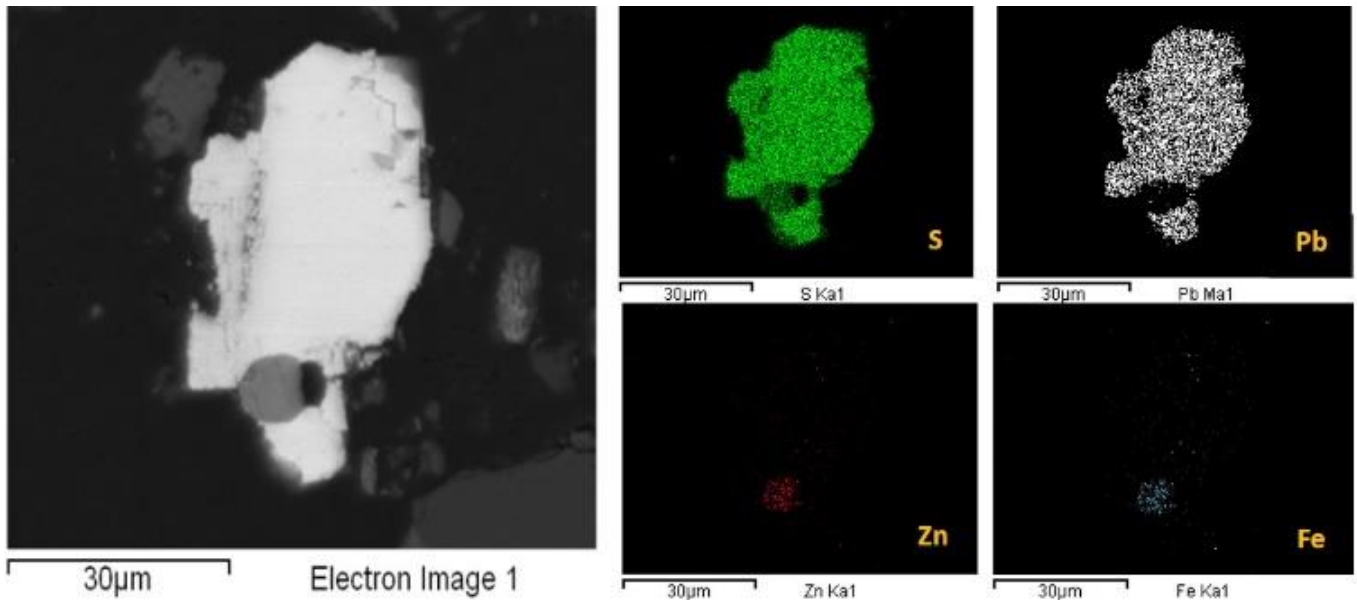


Figura 3. Mapeo de los residuos mineros

oscura) y mixtas, condición que favorece el contacto de los elementos de interés en medios extractivos o con agentes de erosión al no encontrarse refractadas en la matriz mineral. Las partículas acotadas a malla 250 (aprox. 61 µm), muestran una morfología heterogénea de aristas irregulares, donde se observa la asociación de las partículas metálicas con el material ganga, sin embargo, la variación en la tonalidad sugiere la relación mineralógica de más de una especie mineral de carácter metálico con base a la escala de grises (Ver figura 1A).

Por otro lado, el mapeo realizado mediante esta técnica permitió corroborar la matriz mayoritaria de la muestra compuesta por Ca, Fe, Si y O, elementos que se observan de manera distintiva en zonas coincidentes de la micrografía, como se observa en la figura 1B, además se confirmó la presencia de Fe y Cu en las mismas zonas de barrido, elementos relacionados con la sección multimetálicos de la muestra.

Mediante el análisis puntual se logró identificar dos fases mineralógicas minoritarias correspondientes al contenido de

plomo y zinc. En la figura 2A, se realizó el análisis EDS de una partícula metálica asociada a la matriz mineralógica, los elementos reportados se asocian a un sulfuro de plomo simple comúnmente conocido como galena, la cual es la única especie mineral conformada solamente por azufre y plomo en la naturaleza, además de ser característica de este tipo de yacimientos conformados por una compleja asociación de sulfuros (Ostrooumov, M., 2009; Méndez-Ortiz et al., 2007). En la figura 2B, se analizó una partícula de tonalidad media, que se relacionó con la especie esfalerita, un sulfuro de zinc simple que suele contener impurezas de hierro en su estructura que dificultan los procesos lixiviación y tostación (Wu et al., 2024). Con la finalidad de corroborar la composición elemental de estos elementos se utilizó la técnica de mapeo mediante MEB para identificar las zonas de coincidencia donde convergen los metales base con la matriz sulfurada. En la figura 3, se presenta el mapeo realizado a una partícula mixta, donde se observa el contenido mayoritario de azufre relacionado con Pb y de manera minoritaria, en forma de inclusión, el azufre se relaciona con el contenido de Zn y Fe.

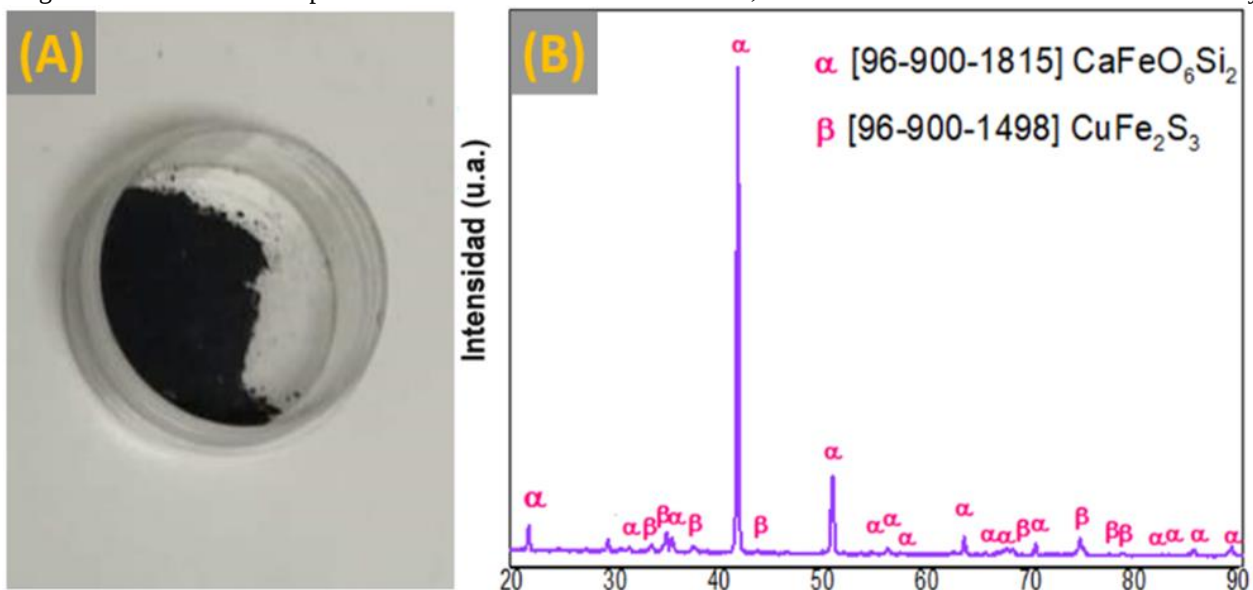


Figura 4. (A) Polvos residuales de la zona conurbada de Zimapán, Hgo. (B) Análisis de DRX de las partículas acotadas a 61 µm.

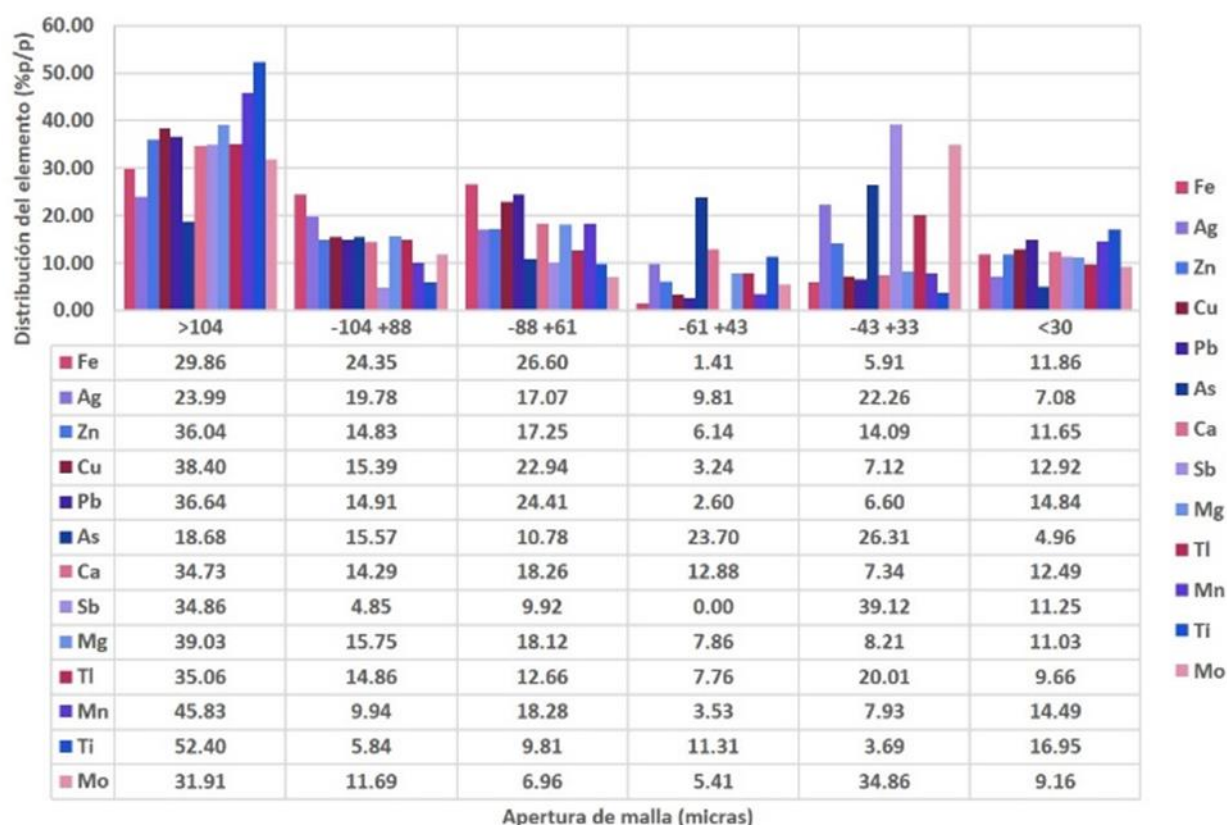


Figura 5. Análisis Granulométrico de los residuos minerales provenientes del área conurbada de Zimapán, Hidalgo.

De manera macroscópica los residuos mineros muestran una tonalidad verdosa oscura con finas partículas con brillo metálico rojizo (ver imagen 4). El análisis realizado por DRX de la muestra en polvo permitió reportar dos fases mineralógicas. Como matriz de la muestra se identificó un inosilicato conformado por $\text{CaFeSi}_6\text{O}_2$ (Archivo de difracción de polvo 96-900-1815), este mineral de la familia de los piroxenos se distingue de los diópsidos a razón de su alto contenido de hierro, elemento que toma el lugar de magnesio en la estructura del mineral. Son característicos de yacimientos skarn relacionados a aglomerados de sulfuros metálicos que conforman una mena compleja (Méndez-Ortiz et al., 2007). La segunda fase identificada en el difractograma de la figura 4B, se relaciona con el contenido de hierro y cobre registrado por el mapeo de la figura 1B, cuya composición se define como CuFe_2S_2 [96-900-1498]. Ambas especies minerales son distintitas de rocas metamórficas ricas en calcio que dan lugar a mármoles rosados que se diferencian por sus impurezas de hierro (Dai et al., 2019).

4. Análisis granulométrico y análisis químico

La distribución elemental que se obtiene mediante análisis granulométrico calcula la relación entre la ley de corte de cada elemento de interés y el peso retenido, con respecto a la totalidad de la muestra, por lo que este contenido es expresado en porcentaje (%p/p) (Burroughs-Gill, 1989; Ballester et al., 2000). En la tabla 1, se observa que la mayor distribución de los elementos corresponde a las partículas cotadas a 104 μm . La muestra sin tamizar fue analizada mediante ICP para determinar el contenido elemental mayoritario reportando al Fe como el elemento de mayor concentración en la muestra

mineral (78 481 ppm), seguido del calcio (20 272 ppm) y el cobre (18 388 ppm).

En el caso de la plata (860 ppm) y el plomo (10 864 ppm), que son elementos que suelen estar asociados debido a la relación mineralógica entre la galena y las especies de plata, resultan de interés extractivo para su posterior comercialización, sin embargo, aunque la presencia de arsénico y antimonio son indicadores mineralógicos de altas leyes de oro y plata también, implican complejidades estructurales que dificultan su extracción (A.M. Teja-Ruiz et al., 2020).

Con la finalidad de determinar el grado de liberación de elementos potencialmente tóxicos se realizó un análisis granulométrico de la muestra en polvo, la cual fue sometida a un ataque ácido usando agua regia. El análisis de la solución resultante mediante ICP, permitió establecer la relación entre el peso retenido en el tren de tamices seleccionados y la ley del elemento de interés (ver figura 5).

La relación de leyes obtenida a partir del análisis granulométrico demuestra que, pese a que la mayor distribución de elementos metálicos de interés económico (Fe, Ag, Zn, Cu, Pb, Ti y Mo) se logra acotando la muestra a un diámetro de partícula mayor (104 μm), equivalente a la malla -80 +150. La liberación de elementos potencialmente tóxicos como el Tl, As y Sb tiene lugar a un tamaño de partícula más fino, equivalente a la malla 400, lo que dificulta la contención de los residuos sólidos en presas de jales, a razón del impacto ambiente que implica el área de contacto de las partículas finas con el medio, además favorecer la dispersión de los polvos mediante agentes de erosión hace áreas urbanizadas.

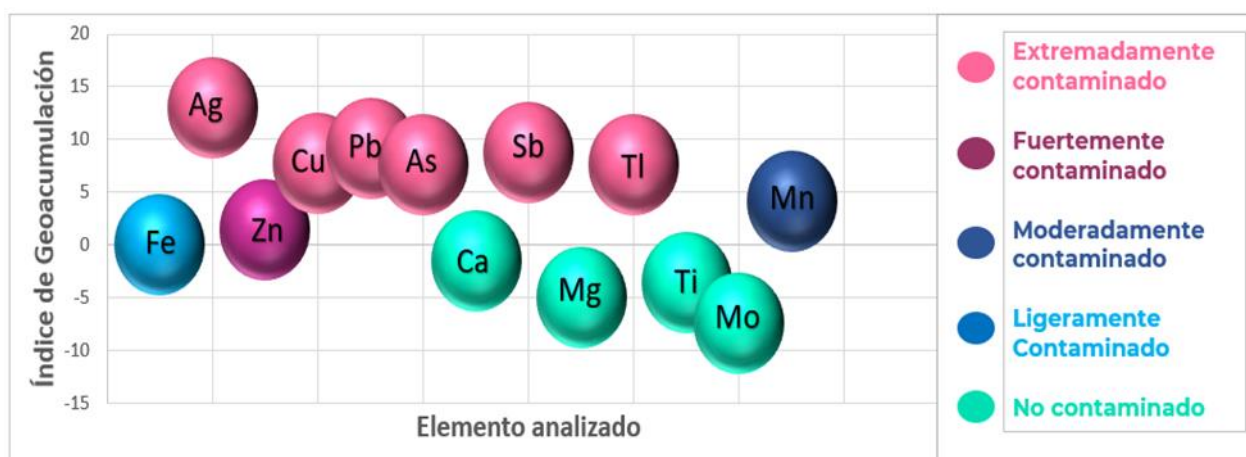


Figura 6. Factores de enriquecimiento de los residuos minerales de Zimapán, Hidalgo.

5. Evaluación de leyes minerales y elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Una vez caracterizada la muestra, química y mineralógicamente, se realizó el cálculo de los factores de enriquecimiento para la serie de elementos analizados mediante ICP. En la figura 5, se presenta la distribución de elementos que se atribuyen a la roca madre, es decir, elementos que no superan la concentración media en la corteza terrestre y que no son de relevancia económica, pese a su abundancia, entre ellos se encuentra el Fe, Zn, As, Ca, Mg, Mn y Ti. Los elementos moderadamente enriquecidos son el Cu, Mo, Tl y Sb, siendo estos dos últimos de interés ambiental al ser considerados elementos traza que superan los límites permisibles. En el caso del Cu y el Mo, aunque son elementos de interés económico el molibdeno funge como subproducto de la explotación del cobre, por lo que debería considerarse su explotación de manera conjunta. Finalmente, el único elemento que cuenta con un factor de enriquecimiento (FE) lo suficientemente alto para su explotación es la plata.

La determinación de índices de acumulación, que se presentan en la figura 7, permitieron evaluar, al menos, a la mitad de los elementos analizados como extremadamente contaminantes, destacando la presencia del Pb, Tl, Sb y As, elementos traza susceptibles a la disolución en medio acuoso, y en el caso de los semimetales, con efectos cancerígenos en su estado trivalente, comúnmente generado por la actividad antropogénica (Drahota et al., 2023; Gebel, 1997).

Elementos como el Ca, Fe y Mg, relacionados con la matriz mineralógica de la muestra se clasifican como elementos no contaminantes o ligeramente contaminantes. Únicamente el zinc se categorizó como elemento fuertemente contaminante y el manganeso en la escala intermedia como elemento moderadamente contaminante. En el caso de la plata, elemento cuya concentración abre el área de oportunidad ante la reintegración de sólidos residuales a las etapas de extracción, no fue catalogado como EPT.

6. Conclusiones

La muestra de polvos que conforman los residuos mineros de la zona conurbada de Zimapán presenta la matriz mineralógica de un inosilicato de calcio y hierro característico

de minerales sometidos a un metamorfismo de contacto, lo que enriquece este tipo de depósitos con aglomerados sulfurosos de metales base.

La marcada diferencia entre las distribuciones elementales obtenidas mediante el análisis granulométrico, sugieren la necesidad de una etapa de separación gravimétrica favorecida por las características físicas de la muestra, con la finalidad de concentrar las partículas finas que favorecen la dispersión de elementos potencialmente tóxicos.

La presencia de arsénico y antimonio debe ser caracterizada de manera minuciosa mediante análisis puntuales para establecer su relación con el metal precioso. La plata muestra el mayor factor de enriquecimiento con respecto al resto de los elementos analizados, y aunque su relación con los semimetales deviene en un indicador mineralógico, estos elementos trazan son castigados económicamente y pueden representar la formación de sulfosales plata, complicando el proceso de extracción y la deposición electroquímica, volcando el interés extractivo en la recuperación de otros metales base como el zinc, el plomo o el cobre.

Referencias

- Acordi J., Simão L., Faraco M.N.S., Borgert C.H., Olivo E., Montedo O.R.K., Raupp-Pereira F. (2023). Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. *Resources Policy*. 80, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103243>.
- Ansari A. A., Singh I. B. y Tobschall H. J. (1999). Status of anthropogenically induced metal pollution in the Kanpur Unnao industrial region of the Ganga plain, India. *Environm. Geo.* 38, 25-33. DOI: 10.1007/s002540050397.
- Ballester, A.; Felipe Verdeja, L.; Sancho, J. (2000) *Metalurgia Extractiva*, 2nd ed.; Síntesis: Barcelona, Spain, Vol. 1. ISBN: 84-7738-802-4
- Benshaul-Tolonen A. (2019) Choques industriales locales y mortalidad infantil. *Journal of Economics* 129, 620, 1561 – 1592.
- Black D., McKinnish T., Sanders S. (2005) The economic impact of the coal boom and bust. *Journal of Economics*, 115, 503,449-47.
- Burroughs-Gill, C. (1989) *Metalurgia extractiva no ferrosa*, first ed. Limusa, D.F., Mexico ISBN: 968-18-2016-9.
- Ciesielczuk J., Misz-Kennan M., Hower J.C., Fabiańska M. J. (2014) Mineralogy and geochemistry of coal wastes from the Starzykowice coal-waste dump (Upper Silesia, Poland) *International Journal of Coal Geology*, 127, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.02.007>.
- Dai J., Xue C., Chi G., Ji H., Zhao X., Zhao Y., Li J., Symons D.T.A. (2019) Geological, geochronological and geochemical characteristics and genesis of the Arqiale skarn Zn-Pb deposit, Western Tianshan, Northwest China. *Ore Geology Reviews*, 106, 79-96.

- Deiana C., Giua L. (2023) This site is closed! The effect of decommissioning mining waste facilities on mortality in the long run. *Journal of Environmental Economics and Management*, 119, 102797. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102797>.
- Domínguez, J. A. E., Lupercio, A. Z., Reyna, J. V., & Quintanilla, J. A. V. (2007). Caracterización ecológica y diversidad de los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (81), 51-63.
- Drahota P., Venhauerova P., Strnad L. (2023) Speciation and mobility of arsenic and antimony in soils and mining wastes from an abandoned Sb–Au mining area. *Applied Geochemistry*, 152, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105665>.
- Fabiańska M.J., Ciesielczuk J., Szerba M., Misz-Kennan M., Wiclaw D., Szram E., Nádudvari A., Ciesielska Z. (2024) Weathering alterations of coal mining wastes geochemistry, petrography, and mineralogy, a case study from the Janina and Marcel Coal Mines, Upper Silesian Coal Basin (Poland) *International Journal of Coal Geology*, 281, 2024, 104407. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104407>.
- Fernihough A., O'Rourke K.H. (2021) El carbón y la revolución industrial europea. *Journal of Economics*, 131,635, 1135 – 1149.
- Gebel, T. (1997). Arsenic and antimony: comparative approach on mechanistic toxicology. *Chemico-biological interactions*, 107(3), 131-144. [https://doi.org/10.1016/S0009-2797\(97\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2797(97)00087-2).
- Helena-Xavier, L., Ottoni M., Peixoto-Abreu L.P. (2023) A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106840>.
- Hernández-Ramos S.M., Trejo-Arroyo D.L., Cholico-González D.F., Rodríguez-Torres M. G., Zárate-Medina J., Vega-Azamar R. E., León-Patiño C. A., Ortiz-Lara N. (2024) Characterization and effect of mechanical and thermal activation in mining tailings for use as supplementary cementitious material Case Studies in Construction Materials, 20, e02770. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02770>.
- Juárez Tapia J.C., Francisco Patiño Cardona F., Roca Vallmajor A., Teja Ruiz A. M., Reyes Domínguez I.A., Reyes Pérez M., Pérez Labra M. and Flores Guerrero M.U. Determination of Dissolution Rates of Ag Contained in Metallurgical and Mining Residues in the S₂O₃ 2⁻-O₂-Cu²⁺ System: Kinetic Analysis. *Minerals* 2018, 8, 309; doi:10.3390/min8070309.
- Kinnunen P.H.M., Kaksonen A. H. (2019) Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*, 228, 153-160.
- Lara, M. M. (2012). Evaluación de estrategias de manejo arrecifal en Akumal, Q. Roo: Disturbios antropogénicos y enfermedades coralinas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México).
- Méndez-Ortiz B.A., Carrillo-Chávez A., Monroy-Fernández M.G. (2007) Acid rock drainage and metal leaching from mine waste material (tailings) of a Pb-Zn-Ag skarn deposit: environmental assessment through static and kinetic laboratory tests. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 2,161-169.
- Moreno, R.; Téllez, J.; Fernández, M (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 28, 203–21. ISSN 0188-4999.
- Mosquera, F. M. M., Brahan, W. K., & Asprilla, Y. D. M. (2019). Efecto de la actividad minera sobre la comunidad de macroinvertebrados en cuerpos de agua lóticos, en la subregión del San Juan, Chocó, Colombia. *Revista Bioetnia*, 16(1), 39-53.
- Pizarro- Barraza F., Thiagarajan D., Ramadoss A., Manikandan V. S., Dhanabalan S.S., Venegas-Abarzúa C., Sotomayor-Soloaga P., Campos-Nazer J., Morel M. J., Thirumurugan A. (2024) Unlocking the potential: Mining tailings as a source of sustainable nanomaterials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202,114665.
- Ostrooumov, M. (2009). *Mineralogía Analítica Avanzada*, first ed. Sociedad Mexicana de Mineralogía, Ciudad de México. 2009. ISBN: 978-607-424-095-5.
- Sanchez R. (2012) *Minería y Medio ambiente*. Secretaría de economía. Dirección General de Promoción Minera: https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/informacion_sectorial/mineria/mineria_y_medio_ambiente.pdf.
- Teja-Ruiz A. M., Reyes-Domínguez I.A., Acevedo-Sandoval O.A., Palacios-Beas E.G., Flores-Guerrero M.U., Pérez-Labra M., Juárez-Tapia J.C. (2020) Silver leaching from miargyrite (AgSbS₂) sulfosalt in the system S₂O₃ 2⁻-Ca (OH)₂: Kinetic analysis and experimental design approach, 198, 105456. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105456>.
- Von der Goltz J, Barnwal P. (2019) Mines: The local wealth and health effects of mineral mining in developing countries. *Journal of Development Economics*, 139, 1 – 16.
- Wu Y., Li M., Luo X., Wei C., Deng Z., Li X., Peng X., Sun P. (2024) Selective separation of zinc from germanium-bearing iron cake via a roasting–leaching process. *Separation and Purification Technology*, 337, 126166. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126166>.