

Evaluación del potencial generador de ácido de mina en jales mineros del estado de Zacatecas

Evaluation of the generating potential of mine acid in mining tailings in the state of Zacatecas

A. Ruiz-Sánchez ^{a,c,*}, G. T-Lapidus ^b, J. C. Juárez Tapia ^c

^aTecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. Boca del Río, Ver.

^bDepartamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Ciudad de México. C.P. 09340.

^cÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, Hidalgo C.P 42184, México.

Resumen

En este trabajo se acoplaron la caracterización por microscopía electrónica (SEM) y el balance acido-base para estudiar el potencial generador de ácido de mina en jales mineros de Sombrerete Zacatecas. Los resultados mostraron que los jales mineros tienen un pH de 7.2, es decir, contiene baja concentración de fases alcalinas para atenuar el ácido de mina generado. Además, se determinó que la concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) tales como Cu, Zn, As, Cd y Fe, fue superior a los límites establecidos por la norma SEMARNAT (2004), por lo que representan un riesgo para el medio ambiente. A partir del balance ácido-base (PN/PA = 0.24) se puede decir que los jales mineros tienen un alto potencial generador de ácido de mina y como consecuencia, promover la disolución de EPT's. Además, el 3.7% de pirita presente ocluida en la ganga (silicatos), sugiere que esta fase de sulfuro no podría oxidarse fácilmente por el oxígeno y humedad, y, por lo tanto, no ocurrirá la producción de ácido de mina.

Palabras Clave:

Drenaje ácido de mina, Jales mineros, Potencial de Neutralización, Potencial de acidez

Abstract

In this work, the characterization by electron microscopy (SEM) and the acid-base balance were coupled to study the generating potential of mine acid in mine tailings from Sombrerete Zacatecas. The results showed that the mining tailings have a pH of 7.2, that is, they contain a low concentration of alkaline phases to attenuate the generated mine acid. In addition, it will be reduced that the concentration of potentially toxic elements (EPT's) such as Cu, Zn, As, Cd and Fe, was higher than the limits established by the SEMARNAT standard (2004), which represents a risk for the environment. medium environment. From the acid-base balance (PN/PA = 0.24) it can be said that mining tailings have a high potential to generate mine acid and, as a consequence, promote the dissolution of EPT's. Furthermore, the 3.7% pyrite present occluded in the gangue (silicates), suggests that this sulfide phase could not be easily oxidized by oxygen and moisture, and therefore the production of mine acid will not occur.

Keywords:

Acid mine drainage, Mine tailings, Neutralization potential, Acidity potential

1. Introducción

La minería es una de las principales actividades que ha contribuido en el desarrollo económico, no obstante, dicha actividad es la responsable de la generación de residuos de roca, y jales mineros. Los residuos de roca corresponden a la cantidad de suelo removido en los yacimientos previo a la explotación de los minerales de interés, mientras que los jales mineros corresponden a aquellos residuos sólidos resultantes del procesamiento de minerales después de recuperar los valores de interés comercial como Cu, Pb, Zn, Ag, Au, etc (Nwaila et al; 2021a y b). De acuerdo

con Araya et al. (2020, 2021) a nivel mundial la industria minera genera alrededor de 10 billones de toneladas de jales mineros por año, con la tendencia a duplicar esta cantidad para el año 2035.

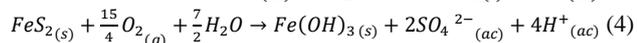
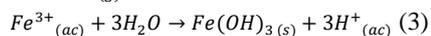
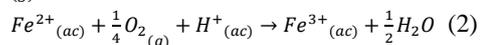
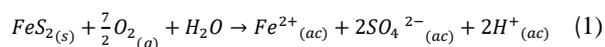
Entre los principales problemas asociados a los residuos de roca y jales mineros destacan la generación de drenaje ácido de roca y drenaje ácido de mina. Ambos tipos de drenajes son el resultado de la oxidación de los minerales tipo sulfuro presentes en algunos yacimientos minerales. La oxidación de los sulfuros es promovida principalmente por la actividad microbiana (*Thiobacillus ferrooxidans*), la humedad y el oxígeno (Nwaila et al; 2021a y b). El ácido generado (H^+) en la oxidación de los minerales tipo

*Autor para la correspondencia: angel.rs@bdelrio.tecnm.mx

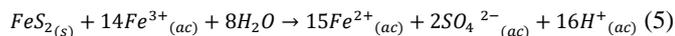
Correo electrónico: angel.rs@bdelrio.tecnm.mx (Ángel Ruiz-Sánchez), gtl_2000@yahoo.com (Gretchen Terri Lapidus- Lavine), jcuarez@uaeh.edu.mx (Julio C. Juárez Tapia).

sulfuro facilita la disolución de otras fases mineralógicas presentes, las cuales contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT's) tales como: Cr, Pb, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Fe, Al, Se, Te, Mo y Hg. Generando de esta manera, afectaciones al medio abiótico (agua y suelo, principalmente mantos acuíferos) y a la salud de los organismos vivos (seres humanos y animales) que habitan en los límites de los depósitos. Afortunadamente, el ácido generado puede ser neutralizado por la presencia de silicatos, hidróxidos y carbonatos, fases mineralógicas presentes en algunos yacimientos mineros (Remon et al., 2005; Hernández-Mendiola et al., 2016; Gómez-Bernal et al., 2017; Salas-Luévano., 2017; Flores de la Torre et al., 2018).

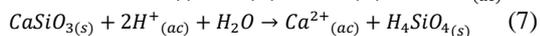
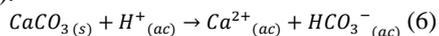
Como se mencionó anteriormente, la generación de ácido resulta de la oxidación de minerales tipo sulfuros como la pirita, pirrotita, covelita, calcopirita, enargita, entre otros. Pero, la abundancia de pirita con respecto a los otros sulfuros es la razón principal por la que la pirita se toma como mineral para representar las reacciones químicas de tal proceso. En ese sentido, la reacción 1 representa la oxidación de la pirita debido al oxígeno y la humedad, mientras que la reacción 2 indica la inmediata oxidación del ion ferroso por el oxígeno mismo. Si el pH establecido en el lugar de depósito es mayor a 2, entonces se promueve la precipitación de una parte del ion férrico producido en la reacción 2, dando lugar a la generación de 3 moles de H^+ (reacción 3). Por lo tanto, el proceso global (reacción 4) para la oxidación de la pirita dar lugar a un máximo 4 mol de H^+ .



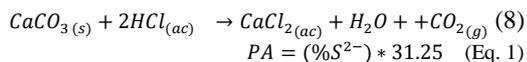
Por otro lado, si el pH es menor a 2, el ion férrico obtenido en la reacción 2 actúa como un agente oxidante y potencializa la oxidación de la pirita, generando de esta manera 16 moles de ácido (reacción 5).



La producción máxima de ácido a partir de la oxidación de sulfuros es conocido como potencial ácido (PA), mientras que la cantidad de ácido que puede neutralizarse (reacciones 6 y 7) por los silicatos, hidróxidos y carbonatos se denomina potencial de neutralización (PN).



La determinación del PN se realiza a través de la neutralización con ácido clorhídrico (reacción 8), mientras que la estimación del valor de PA se puede determinar a partir del porcentaje de sulfuro en forma de pirita (Eq. 1).



De acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT (2003) una relación PN/PA < 1.2 significa que el jale minero no tiene la suficiente cantidad atenuadores de ácido, por lo que existe un alto potencial generador de drenaje ácido e inmediata disolución de EPT's, la cual puede prevenirse agregando agentes neutralizantes como $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, CaO , $Al(OH)_3$, Na_2CO_3 o $NaOH$ (Park et al., 2019). En cambio, una relación de PN/PA > 1.2 indica la abundancia de atenuadores de ácido de mina y, por lo tanto, un

bajo potencial de generación de drenaje ácido, lo que implica un casi nulo riesgo en la disolución de EPT's, respectivamente.

El problema sobre la generación de drenaje ácido de roca o drenaje ácido de mina en los jales mineros es muy importante desde el punto de vista ambiental, no obstante, la granulometría, la presencia de arcillas, así como la considerable concentración de metales base como por ejemplo Pb, Zn o Cu, y metales preciosos como Au y Ag en este tipo de residuos, abre la posibilidad de considerar a este tipo de residuos como materia prima de valor agregado para la industria minera e industria de la construcción, para el establecimiento de procesos metalúrgicos que permitan la recuperación de valores (Nwaila et al; 2021a y b) y en la fabricación de materiales de construcción (Kuranchie et al, 2015), respectivamente.

Por otro lado, el estudio de la generación de drenaje ácido de mina en jales mineros del norte de México (Flores de la Torre et al., 2018; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Gómez-Bernal et al., 2017; Hernández Mendiola et al., 2016; Flores de la Torre et al., 2018; Armienta et al., 2016) se ha estudiado a través del balance ácido-base como lo establece la norma NOM-141-SEMARNAT (2003), no obstante, los valores obtenidos para la relación PN/PA bajo esta metodología no son suficientes para analizar la generación del drenaje ácido debido a que no se solicita un análisis mineralógico sobre la liberación y asociación (con la ganga) de los minerales tipo sulfuros, los cuales al oxidarse dan lugar al drenaje ácido.

Por lo antes mencionado, en este trabajo se presenta un estudio sistemático para evaluar el potencial generador de drenaje ácido de los jales mineros proveniente del Estado de Zacatecas y su posible aprovechamiento como materia prima para la recuperación de metales base (Pb, Cu y Zn), estableciendo para ello la determinación del balance ácido-base, la extracción secuencial, parámetros físicos y químicos, porcentaje total de pirita y la liberación/ asociación de pirita con la ganga.

2. Desarrollo Experimental

La muestra de jales mineros utilizados para este estudio proviene de Sombrerete Zacatecas. El muestreo de dicha muestra se realizó mediante la técnica cono y cuarteo, obteniéndose de esta manera una muestra representativa de aproximadamente 12 kg. El total de la muestra se separó por tamaño usando tamices con número 40, 80, 100, 150, 200 y 300, respectivamente. De las fracciones obtenidas se tomaron aproximadamente 0.2 gramos para su digestión con agua regia (75% HCl y 25% HNO₃). Los licores obtenidos en las digestiones se analizaron mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, *Varian SpectraAA220fs*) o Espectrometría de Emisión Atómica acoplada a Plasma generado por microondas (*MP-AES, Agilent 4210*).

Por otro lado, aproximadamente 100 gramos de jales mineros se molieron cuidadosamente en un mortero de ágata hasta obtener un tamaño de partícula menor a 38 μm (malla 400) para analizarlos en el equipo portátil *Olympus Delta XRF Analyzer*, utilizando el método *Geochem*.

Aproximadamente 5 gramos de la muestra de jale minero proveniente del análisis de XRF se compactó firmemente en un portamuestra de acrílico para analizarse en un difractor *D8 Advance* en el intervalo 4°-90° para el ángulo 2θ, a una velocidad de 8°/min. La identificación de las fases mineralógicas se llevó a cabo en el software *Diffra. Eva 5.0*. Otros 5 gramos de jale minero proveniente del análisis de XRF se montó sobre una probeta cilíndrica de resina epóxica de baja densidad. La probeta se pulió con lijas de carburo de silicio con diferente tamaño de grano (200, 800 y 1200) en presencia de agua, hasta la obtención de un acabado tipo espejo, el cual fue recubierto con grafito para

augmentar sus propiedades conductoras. El análisis se llevó a cabo en un Microscopio electrónico *XL30 Phillips* acoplado a un sistema de microanálisis con Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), haciendo uso de la técnica de electrones retrodispersos. Las condiciones del análisis fueron 20kV, SS50 y WD 10mm.

En un vaso de precipitado de 500 mL se agregaron 30 g de jale minero con la cantidad de agua desionizada suficiente para obtener una densidad de pulpa igual a 100 g/L. La lechada se mantuvo a una velocidad de 400 rev/min mediante una propela marina (para bajos caudales) de acero inoxidable durante 10 minutos e inmediatamente después se filtró cuidadosamente. En el filtrado obtenido se determinó el pH y la conductividad eléctrica usando el equipo Orion® *Star A215 Benchtop pH/conductivity meter* previamente calibrados.

0.2 gramos de muestra de los jales mineros fue digerida con agua regia. Un gramo adicional de la misma muestra fue digerido únicamente con HCl concentrado. Los licores de estas digestiones se analizaron por AAS. La diferencia entre las lecturas de concentración para hierro se atribuye al hierro proveniente de la pirita. Para comparar esta prueba, se realizó el mismo procedimiento utilizando un gramo de concentrado mineral con aproximadamente 35% de hierro en forma de pirita y 65% de hierro como calcopirita.

El potencial de neutralización se determinó mediante la prueba modificada de balance ácido-base (PM-ABA) sugerida por Lawrence y Wang (1997), la cual se describe en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Para ello se tomaron 1.5 gramos de muestra y se pusieron en contacto 4 gotas de HCl al 25% v/v sobre un vidrio de reloj, observando el grado de efervescencia como nulo, bajo, moderado o fuerte. Después se coloraron 2 gramos de muestra en un matraz de 250 mL con 90 ml de agua desionizada y agitación constante de 400 rpm mediante un agitador magnético. En el matraz se agregaron las cantidades de HCl 1N en el momento indicado de acuerdo con la Tabla 1. Después de 22 horas se ajustó el pH y la agitación se mantuvo durante dos horas más, finalizando el experimento con la titulación del exceso de HCl 1N usando para ello NaOH 0.1N. El valor de NP (g de CaCO₃/kg) se determinó a partir de los moles de HCl consumidos en el experimento y la estequiometría correspondiente a la reacción 6.

Tabla 1. Adición de HC para la determinación de PN.

Grado de efervescencia	Volumen de HCl 1N (mL)		
	0h	2h	22h
Nulo	1	1	Si el pH de la solución es mayor a 2.5, entonces se ajusta a un valor de 2. Pero si el pH es menor a 2, entonces es necesario repetir la prueba
Bajo	2	1	
Moderado	2	2	
Fuerte	3	2	

3. Resultados y discusión

Granulometría y composición

En las Figuras 1a y 1b se muestra la granulometría correspondiente a la muestra de jales mineros estudiado en este trabajo. Como se puede observar, el 18.2% de los jales mineros tiene un tamaño de partícula menor a 50µm, mientras que el 17.17%, 19.19% y 17.4% corresponde a tamaños de +50 µm, +75µm y +94 µm, respectivamente. Asimismo, el 27.96% de los jales mineros contiene partículas con tamaño en el intervalo de 150 µm - 600 µm. Con base en la granulometría se estimaron los

tamaños promedio P₅₀ =90 µm y P₈₀ =170 µm (Figura 1b), correspondientes al paso del 50% y 80% de los jales mineros, respectivamente. La granulometría (Figura 1a y 1b) confirma que la muestra de los jales mineros representa un problema para la salud de los seres humanos debido a que el 20% son partículas finas de fácil transporte por el viento a las vías respiratorias al cuerpo humano, ingresando de esta manera los EPT's.

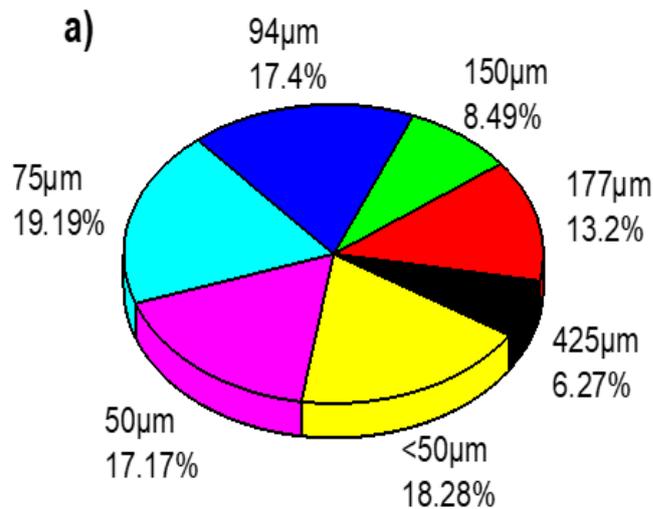


Figura 1a. Tamaño de partícula en los jales mineros.

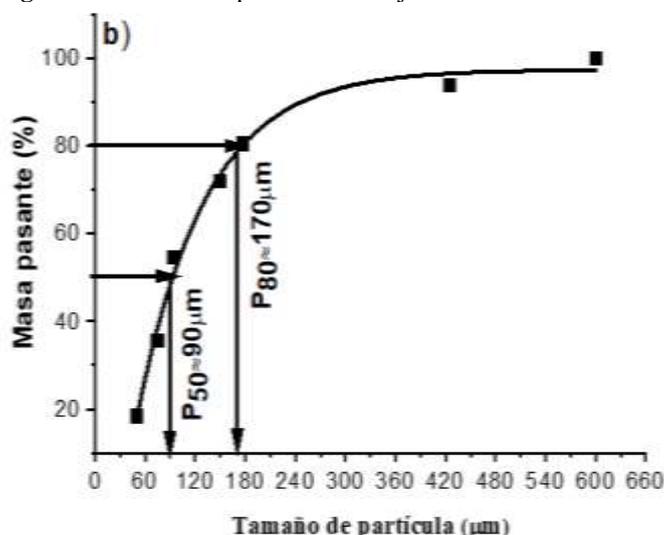


Figura 1b. P₅₀ y P₈₀ para los jales mineros.

Las Figuras 1c y 1d muestran el contenido de Cu, Pb, Zn, As, Fe y Ca en los jales mineros. Estos resultados muestran de jales mineros es altamente heterogéneo, por lo que no hay una correlación directa entre el contenido metálico y el tamaño de partícula. Cabe señalar que el contenido de Cu, Pb, Zn, As y Fe en cada una de las fracciones supera las concentraciones límite establecidas en la NOM-141-SEMARNAT-1993, confirmado de esta manera que los jales mineros representan un riesgo a la salud por EPT's: No obstante, es importante mencionar que las concentraciones mostradas en las Figuras 1c y 1d se obtienen únicamente si condiciones en el depósito fueran similares a un agua regia. En ese sentido, el grado de disolución de los EPT's dependerá de las condiciones químicas establecidas por el oxígeno, la humedad y los microorganismos en el depósito. La distribución de la concentración total de metales (Figura 2) muestra que el aproximadamente el 80% de Cu, Pb y Zn están distribuidos en partículas con tamaño menor a 177µm, lo cual representa una ventaja para la industria minera debido a que el jale minero no necesita de una molienda en el caso que se busque

recuperar los metales antes mencionados. Por su puesto, que para valorizar los jales mineros también es necesario conocer las fases minerales en la que se encuentran el Cu, Pb y Zn, para evaluar el tipo de proceso hidrometalúrgico para su recuperación.

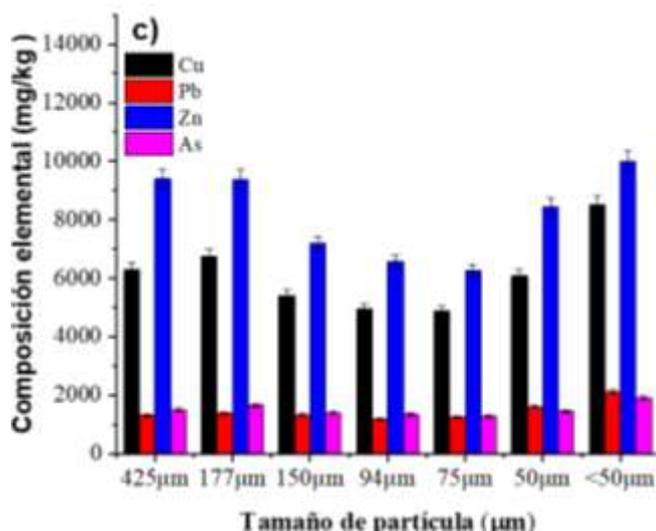


Figura 1c. Contenido de cobre, plomo, zinc y arsénico en los jales mineros.

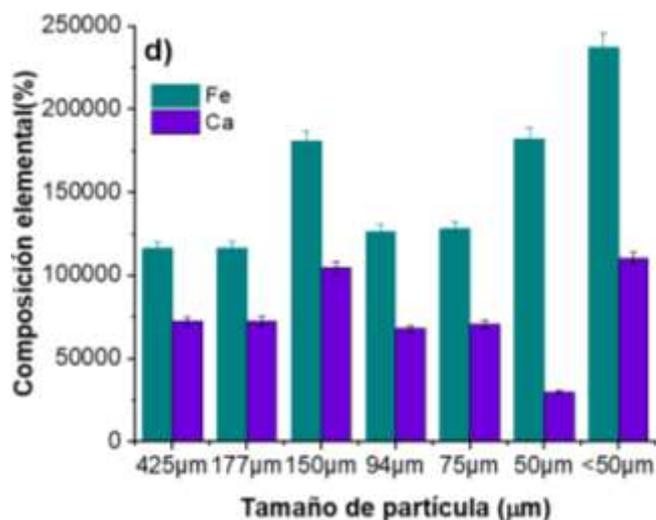


Figura 1d. Contenido de hierro y calcio en los jales mineros.

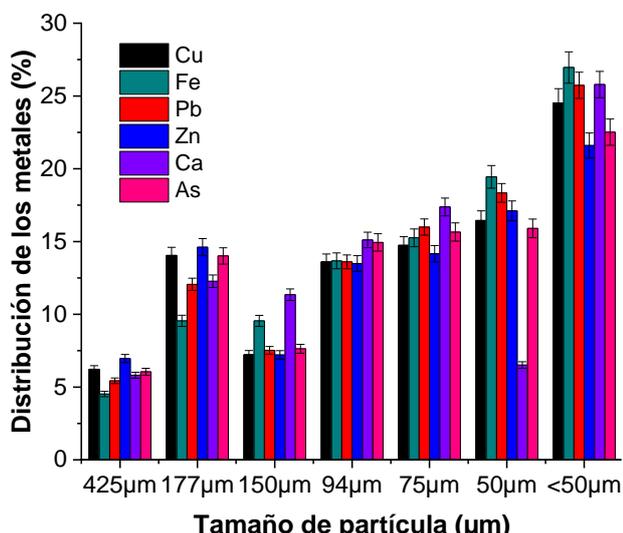


Figura 2. Distribución del contenido total de Cu, Fe, Pb, Zn, Ca y As en los diferentes tamaños de partícula para los jales mineros.

Caracterización física y química

El difractograma de la Figura 3 muestra la presencia de cuarzo (SiO₂), andradita (Ca₃Fe₂(SiO₄)₃) y microclina (KAlSi₃O₈), como las fases minerales en mayor abundancia, las cuales aportan en mayor medida el Fe, Ca y Si, obtenidos por XRF (Tabla 2 6). En el difractograma no se encontraron las fases minerales que aportan el contenido de Cu, Pb, As y Zn, probablemente porque tales fases se encuentran en un porcentaje menor al 5%, límite de detección de XRD.

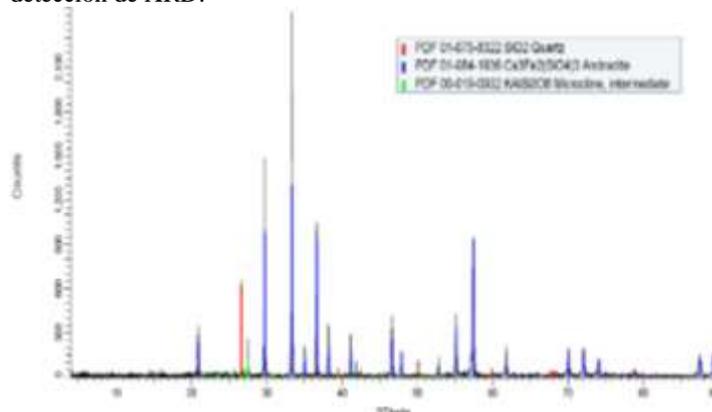


Figura 3. Difractograma correspondiente a la muestra de jale minero.

Tabla 2. Contenido metálico puntual mediante XRF.

Elemento	Contenido metálico, mg/kg
Cu	6332
Fe	198500
Pb	1350
Ca	83000
Zn	7415
As	1425
Si	36200
Al	4600
Mn	1325
P	1000

Las micrografías de SEM (Figuras 4 y 5), confirman en primer lugar la heterogeneidad en el tamaño de partícula (Figura 1a), la abundancia de hierro (color rojo), silicio (color verde) y azufre (color azul), así como la presencia de fases complejas en las cuales probablemente se encuentran ocluidas las fases minerales que aportan Zn, Ca, Fe, As (Spectrum 22).

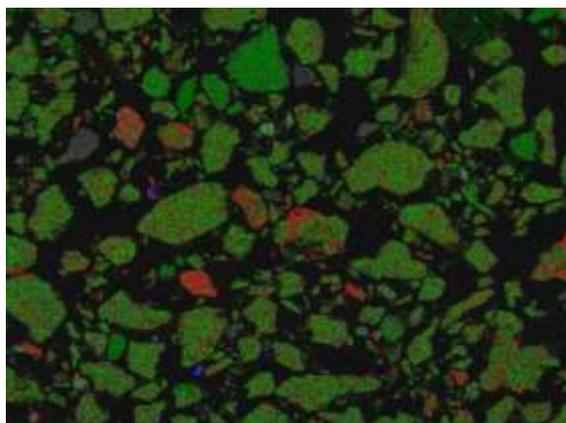
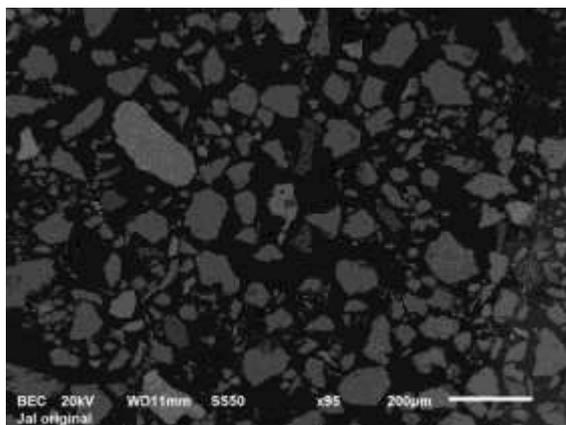


Figura 4. Micrografías de SEM y mapeo en los jales mineros.

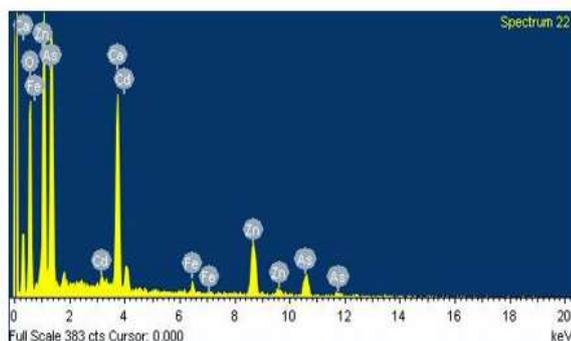
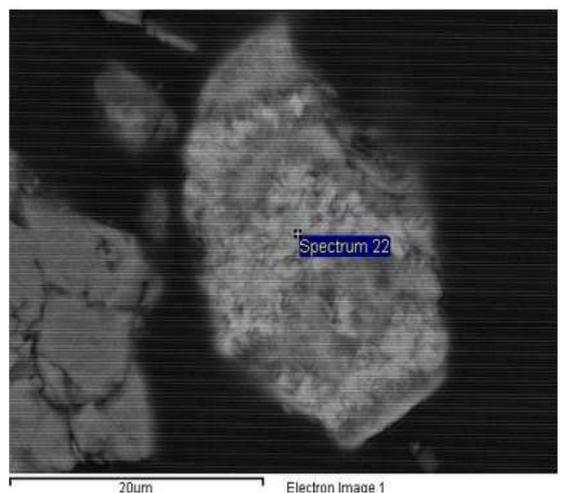


Figura 5. Micrografía de EDS para los jales mineros

ácido, no obstante, es muy interesante observar que el 3.7% de pirita (Tabla 3) en los jales mineros se encuentra ocluida en la abundancia de fases complejas (spectrum 16, Figura 6). Por lo que a pesar de que relación de PN/PA=0.24 sugiera un alto potencial generador de drenaje ácido y riesgo de disolución de los EPT's presentes. La nula liberación de la pirita permite establecer que en realidad los jales mineros ubicados en Sombrerete Zacatecas podrían no generar drenaje ácido por lo que no existe riesgo de disolución de EPT's.

Por otro lado, es importante mencionar que los jales mineros analizados en este estudio contienen concentraciones importantes de Cu, Zn y Pb (Tabla 2), por lo que este tipo de residuos se pueden considerar como una fuente secundaria para la recuperación de este tipo de elementos. En especial, el cobre puede ser el elemento más atractivo debido a que su concentración de 6 kg/tonelada de jales mineros es similar a los procesos metalúrgicos conocido como lixiviación en terreros.

Tabla 3. Algunos parámetros físicos y químicos en los jales mineros estudiados en este trabajo.

Parámetro	Valor
pH	7.26±0.02
Conductividad eléctrica (µS/cm)	463±1.8
Contenido de pirita (%)	3.7
PN (g CaCO ₃ /kg jal)	14.75±0.68
PA (g CaCO ₃ /kg jal)	61.5±0.5
PN/PA	0.24

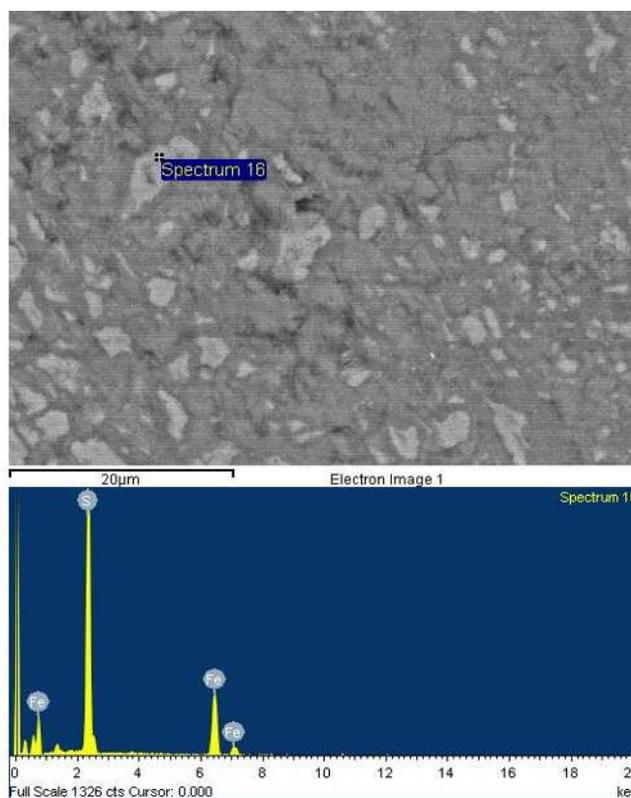


Figura 6. Mineral de pirita en el jale minero.

Conclusiones

La caracterización por SEM en conjunto con el balance ácido-base (PN/PA) permitieron un mejor análisis sobre la generación de drenaje ácido en la muestra de jales mineros.

El valor de pH pH=7.26 y la baja conductividad (463 µS/cm) indican la poca presencia de fases alcalinas capaces de atenuar

Con base en la relación PN/PA, los jales mineros estudiados en este trabajo se pueden considerar como generadores de drenaje ácido. No obstante, la pirita ocluida en la ganga no está totalmente disponible para ser oxidada por el oxígeno, humedad y los microorganismos en el lugar de depósito.

Por el bajo potencial generador de drenaje ácido en el jale minero, la concentración importante de Cu, Pb y Zn, le otorga la posibilidad de ser considerado como materia prima para la recuperación de estos metales a través de un proceso metalúrgico y/o para el uso en la fabricación de concreto para la construcción debido a la alta concentración de silicio (36200 mg/kg jal), que sugiere la abundancia de arcilla.

La metodología de la caracterización por SEM y el balance ácido-base utilizada en esta investigación se puede aplicar a otros jales mineros localizados en el norte de México.

Agradecimientos

Ángel Ruiz Sánchez agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada en la Convocatoria de estancias posdoctorales por México modalidades 1 y 2 para llevarse a cabo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo bajo la dirección del Dr. Julio Cesar Juárez Tapia. Ángel Ruiz Sánchez agradece también a la profesora María Isabel Lázaro Báez por permitir el acceso al laboratorio de Hidrometalurgia del Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el apoyo técnico de Francisco Galindo Murrillo, Martha Imelda Franco Vázquez, Rosa Lina Tovar Tovar e Izanami López Acosta.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Araya, N., Kraslawski, A., Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121555.
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., Cisternas, L. A. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284, 112060.
- Armienta, M. A., Mugica, V., Reséndiz, I., Arzaluz, M. G. (2016). Arsenic and metals mobility in soils impacted by tailings at Zimapán, México. *Journal of soils and sediments*, 16(4), 1267-1278.
- de la Torre, J. A. F., Mitchell, K., Gómez, M. S. R., Barrera, A. L. G., Flores, L. Y., González, F. J. A. (2018). Effect of plant growth on Pb and Zn geoaccumulation in 300-year-old mine tailings of Zacatecas, México. *Environmental earth sciences*, 77(10), 386.
- Gómez-Bernal, J. M., Ruiz-Huerta, E. A., Armienta-Hernández, M. A., Luna-Pabello, V. M. (2017). Evaluation of the removal of heavy metals in a natural wetland impacted by mining activities in Mexico. *Environmental earth sciences*, 76(23), 801.
- Hernández-Mendiola, E., Romero, F. M., Gutiérrez-Ruiz, M., Rico, C. A. M. (2016). Solid phases controlling the mobility of potentially toxic elements and the generation of acid drainage in abandoned mine gold wastes from San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, México. *Environmental Earth Sciences*, 75(11), 969.
- Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., Habibi, D., & Mohyeddin, A. (2015). Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*, 2(1), 1083137.
- Lawrence R.W. y Wang Y (1997). "Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage" Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, Canada.
- Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT. (2003). Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Frimmel, H. E., Tolmay, L. C., Rose, D. H., Bourdeau, J. E. (2021a). Valorisation of mine waste-Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example. *Journal of Environmental Management*, 295, 113013.
- Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Tolmay, L. C., Rose, D. H., Nwaila, P. C., Frimmel, H. E. (2021b). Valorisation of mine waste-Part II: Resource evaluation for consolidated and mineralised mine waste using the Central African Copperbelt as an example. *Journal of Environmental Management*, 299, 113553.
- Park, I., Tabelin, C. B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M., Hiroyoshi, N. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588-606.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D. (2006). *Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México* [Strategy for Identifying the Environmental Risk of Tailings in a Mining District: A Case Study in the District of Guanajuato, Mexico]. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23, 54-74.
- Remon, E., Bouchardon, J. L., Cornier, B., Guy, B., Leclerc, J. C., Faure, O. (2005). Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, 137(2), 316-323.
- Salas-Luévano, M. A., Mauricio-Castillo, J. A., González-Rivera, M. L., Vega-Carrillo, H. R., Salas-Muñoz, S. (2017). Accumulation and phytostabilization of As, Pb and Cd in plants growing inside mine tailings reforested in Zacatecas, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(23), 806.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1993, Norma oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993 (antes NOM-052-ECOL-1993), que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.