






## **Balance ácido-base y disolución de elementos potencialmente tóxicos en jales mineros ubicados en el Estado de Hidalgo**

### **Acid-base balance and dissolution of potentially toxic elements in mine tailings located in the State of Hidalgo**

J. C. Juárez Tapia <sup>a</sup>, A. Ruiz-Sánchez <sup>a,b,\*</sup>, E. J. Muñoz Hernández <sup>a</sup>, M. Gordillo Salazar <sup>a</sup>  
V. Alarcón Elvira <sup>b</sup>, M. Reyes Pérez <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Pachuca de Soto, Hidalgo C.P 42184, México.

<sup>b</sup>Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, México. Carretera Veracruz-Córdoba Km 12. C.P 94290. Boca del Río, Ver, México.

#### **Resumen**

En este trabajo se cuantificó el balance ácido-base en tres muestras (M1, M3 y M5) de jales mineros provenientes de la Presa Dos Carlos ubicada en el Estado de Hidalgo, así como la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT's) disueltos en solución acuosa (pH=4.5) de ácido nítrico y sulfúrico que simula agua de lluvia ácida. Los resultados de pH, potencial de neutralización (PN), potencial de acidez (PA) y potencial de óxido reducción (ORP) fueron suficientes para determinar que los jales mineros localizados en el Estado de Hidalgo tienen un alto potencial generador de drenaje ácido, en particular la muestra M1, ubicada en las coordenadas geográficas 20°06'23.8"N 98°42'50.4"W. En las pruebas a pH= 4.5 el plomo se disolvió en un valor mayor a 10 mg/L, superando de esta manera el límite máximo permisible (LMP) establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, lo que representa un riesgo de contaminación por movilidad de este metal a cuerpos de agua.

**Palabras Clave:** Drenaje ácido, disolución de elementos potencialmente tóxicos, jales mineros del Estado de Hidalgo, Balance ácido-base.

#### **Abstract**

In this work, the acid-base balance was quantified in three samples (M1, M3 and M5) of mining tailings from the Dos Carlos Dam located in the State of Hidalgo, as well as the concentration of dissolved potentially toxic elements (EPT's) in aqueous solution (pH=4.5) of nitric and sulfuric acid which is a simulation for acid rain. The results of pH, neutralization potential (NP), acidity potential (AP) and oxide reduction potential (ORP) were sufficient to determine that the mining tailings located in the State of Hidalgo have a high potential for generating acid drainage, in particular sample M1, located at the geographic coordinates 20°06'23.8"N 98°42'50.4"W. In the tests at pH= 4.5, lead dissolved in a value greater than 10 mg/L, thus exceeding the maximum permissible limit (MPL) established by the Official Mexican Standard NOM-052-ECOL-1993, which means an additional risk for the contamination of bodies of water due to the mobility of this metal.

**Key words:** Acid drainage, dissolution of potentially toxic elements, mining tailings in the State of Hidalgo, acid-base balance

#### **1. Introducción**

La minería es una de las principales actividades que contribuye en el desarrollo económico de México, no obstante, esta actividad es la responsable de generar residuos como agua de mina, residuos de roca y jales mineros, respectivamente. Entre los residuos antes mencionados, los jales mineros corresponden a aquellos materiales sólidos provenientes del beneficio de minerales una vez que se han recuperado valores de interés comercial como Cu, Pb, Zn, Ag y Au (Nwaila et al., 2021a y b). El riesgo de este tipo de materiales está relacionado con su disposición a cielo abierto, donde el establecimiento de procesos de intemperismo natural

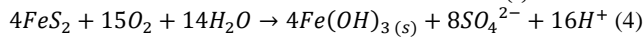
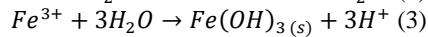
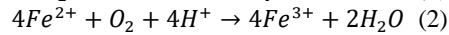
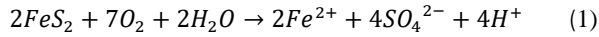
promueven la generación de drenaje ácido como resultado de la oxidación de minerales tipo sulfuro entre los que destacan la pirita, arsenopirita, calcopirita y covelita. La oxidación de los sulfuros ocurre, en el lugar de depósito, por el contacto con el oxígeno, la humedad y por la acción microbiana de *Thiobacillus ferrooxidans* (Wang et al., 2019)

Las reacciones químicas que describen la generación de drenaje ácido toman como referencia a la pirita por su abundancia en este tipo de residuos. En ese sentido, la reacción 1 representa la disolución de la pirita a ion ferroso, seguida por la reacción 2 que muestra la oxidación de ion ferroso a ion férrico. Si el pH

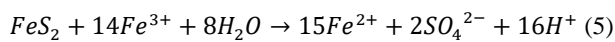
\*Autor para la correspondencia: angel.rs@bdelrio.tecnm.mx

**Correo electrónico:** jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio C. Juárez-Tapia), angel.rs@bdelrio.tecnm.mx (Ángel Ruiz-Sánchez), mu449806@uaeh.edu.mx (Erick J. Muñoz-Hernández), go467901@uaeh.edu.mx (Melissa Gordillo-Salazar), m20990432@bdelrio.tecnm.mx (Victoria Alarcón-Elvira), mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes-Pérez)

establecido en el lugar de depósito es mayor a 2, entonces es posible que el ion ferroso se oxide en su totalidad a ion férrico, estableciéndose de esta manera su precipitación en forma de Fe(OH)<sub>3</sub> y una liberación de 3 moles de H<sup>+</sup> (reacción 3). Por lo antes mencionado, el proceso global que describe la generación de ácido a partir de la oxidación de la pirita muestra la producción de 4 mol de H<sup>+</sup> por mol de pirita (reacción 4).

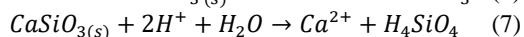
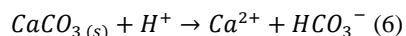


Si durante la disolución de la pirita el pH es menor a 2, entonces parte del hierro total se distribuye en forma de ferroso y férrico, lo que permite al ion férrico actuar como un oxidante adicional, liberando así 16 moles de ácido (reacción 5) por mol de pirita disuelta.

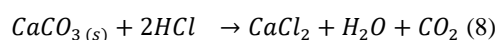


El ácido (H<sup>+</sup>) producido durante la oxidación de los minerales tipo sulfuro se considera el responsable de la disolución de las fases mineralógicas que acompañan a los jales mineros, dando lugar a la disolución de los siguientes metales en forma acuosa: Cr, Pb, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Fe, Al, Se, Te, Mo y Hg. Estos metales en forma iónica reciben el nombre de elementos potencialmente tóxicos (EPT's). La movilidad de los EPT's representa riesgos directos 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 (Hernández-Acosta et al., 2009)

El ácido que puede generarse por la oxidación del total de sulfuros recibe el nombre de potencial de acidez (PA). La neutralización, total o parcial, de este ácido es posible solo con la adición de alguna sustancia alcalina como hidróxido de sodio, hidróxido de calcio o carbonato de calcio (Park et al., 2019). No obstante, en el caso de los jales mineros hay fases minerales alcalinas como silicatos, hidróxidos y carbonatos que funcionan como neutralizantes (reacciones 6 y 7) (Remon et al., 2005; Hernández-Mendiola et al., 2016; Gómez-Bernal et al., 2017). La cantidad de ácido factible de neutralización a partir de las fases minerales que acompañan a los jales mineros recibe el nombre de potencial de neutralización (PN).



Los valores de PN y PA se determinan mediante la titulación directa con ácido clorhídrico (ecuación 8) y a partir del contenido total de ion sulfuro (ecuación 1) en forma de pirita (Ruiz-Sánchez et al., 2023), respectivamente.



$$PA = (\%S^{2-}) * 31.25 \quad (Ec. 1)$$

La NOM-141-SEMARNAT (2003) considera que una relación PN/PA < 1.2 describe a un jale minero con baja capacidad neutralizante de ácido, pero con alto potencial generador de drenaje ácido y riesgo de disolución de EPT's. En cambio, una relación de PN/PA > 1.2 en un jale minero sugiere la presencia abundante de atenuadores de ácido y, por lo tanto, un bajo riesgo de potencial de generación de drenaje ácido y nula disolución de EPT's.

Con base en lo antes mencionado, es posible resaltar la importancia de estudiar a los jales mineros de manera sistemática debido al impacto ambiental que pueden generar, en particular, por tratarse de un problema a nivel mundial en donde la industria minera genera aproximadamente 10 billones de toneladas de jales mineros por año (Araya et al., 2020 y 2021) con la tendencia a duplicar esta cantidad para el año 2035.

A partir de la situación antes descrita, en este trabajo se presenta un estudio sobre el balance ácido-base en términos del PA, PN, pH, ORP, así como la disolución de los EPT's en solución acuosa para muestras provenientes de los 55 millones de toneladas de jales mineros depositados en la Presa de Jales Dos Carlos hace más de 200 años (Romero et al., 2008), específicamente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Pachuca de Soto, Estado de Hidalgo.

El objetivo de esta investigación es cuantificar las concentraciones de EPT's que podrían movilizarse hacia los medios abiótico (agua y suelo) y biótico (seres humanos) en una situación de exposición a lluvia ácida (promovida por las emisiones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre como resultado de la actividad industrial y sector automotriz) cuyo pH es aproximadamente 4.5. Además, de elaborar un análisis del contenido de metales base (Pb, Cu, Zn) y preciosos (Ag, Au) para establecer si este tipo de residuos puede ser considerado como materia prima de valor agregado en procesos de lixiviación para la recuperación de metales de interés comercial.

## 2. Desarrollo Experimental

Las muestras de jales mineros se recolectaron en el Estado de Hidalgo durante el mes de marzo de 2023. La toma de muestra se llevó a cabo en al menos 10 puntos del sitio de depósito. Los puntos de muestreo se seleccionaron en función del color de los residuos, así como en el valor de pH (usando 4 in 1 Soil Suvery Instrument) observado a una profundidad de aproximadamente 15 cm. Las muestras recolectadas tuvieron una masa aproximadamente de 100 kilogramos cada una y mediante la técnica de coneo y cuarteo se obtuvieron muestras representativas con masa aproximadamente 15 kg, las cuales se usaron en los experimentos que se describen en esta investigación. Las coordenadas de tres puntos de muestreo correspondientes para tres muestras representativas son las siguientes: 20°06'23.8"N 98°42'50.4"W (muestra M1), 20°06'12.8"N 98°42'51.5"W (muestra M3) y 20°06'18.0"N 98°42'40.5"W (muestra M5), respectivamente.

Las muestras representativas se colocaron en charolas para su secado a 80°C por 72 horas. A partir de las muestras secas se realizó la granulometría (usando tamices con número 60, 100, 120, 140, 200, 270 y 400) tal y como lo establece la norma ASTM C 117 – 95 para partículas finas. Las tres muestras representativas, así como las diferentes fracciones obtenidas por la granulometría se digitaron con agua regia (75% HCl y 25% HNO<sub>3</sub>) usando aproximadamente 0.2 gramos de muestra retenida en cada malla. Los licores obtenidos en las digestiones fueron analizados mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, Varian SpectrAA220fs), Espectrometría de Emisión Atómica acoplada a Plasma generado por microondas (MP-AES, Agilent 4210) o mediante el equipo ICP-Optima 8300 (Perkin Elmer)

Las fracciones de jales mineros con tamaño de partícula menor a 38µm (malla 400) fueron analizados 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 usando el software Diffrac. Eva 5.0. Estas fracciones

también se analizaron en un microscopio óptico binocular compuesto NOV-XSZ-107T. De igual manera, 2 gramos de cada una de las muestras analizaron en un equipo portátil Olympus Delta XRF Analyzer (Ruiz Sánchez et al., 2023).

Por otro lado, en un vaso de precipitado de 500 mL se preparó una lechada en una proporción de 100 g/L de jales mineros usando agua desionizada. La lechada se mantuvo a una agitación constante de 400 rpm durante 10 minutos con una propela marina. El licor se filtró cuidadosamente y se recolectó para medir el pH, ORP y conductividad eléctrica, usando para ello una sonda multiparamétrica Hanna HI98194 previamente calibrada.

El valor de PN se determinó mediante la prueba modificada de balance ácido-base (PM-ABA) sugerida por Lawrence y Wang (1997) descrita en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y en el trabajo de Ruiz Sánchez et al (20223), usando para ello 1.5 gramos de muestra de jale minero. En dicha medición la masa de jales mineros se puso en contacto con HCl 1N. Después de 24 horas el HCl que no reaccionó se valoró con NaOH 0.1N. El valor de PN (g de CaCO<sub>3</sub>/kg) se determinó a partir de los moles de HCl consumidos en el experimento como lo describe la estequiometría correspondiente a la reacción 8.

Para la estimación del PA se utilizó el método químico descrito por Ruiz-Sánchez et al. (2023) en donde se propone una aproximación en la cuantificación de hierro en forma de pirita, considerando la diferencia entre las lecturas de concentración de hierro obtenidas por al digerir, por separado, 0.2 g de muestra seca con agua regia (25% HNO<sub>3</sub>-75%HCl) y 0.2 g en HCl concentrado. Por último, se realizó el estudio de la disolución de los EPT's en el medio acuoso (pH= 4.5) de ácido nítrico y ácido sulfúrico (Moreno et al., 2019)

### 3. Resultados y discusión

#### Recolección y caracterización física de la muestra

En la Figura 1 se muestra el valor de pH medido en tres diferentes puntos de muestreo en el lugar de depósito de los jales mineros. La muestra M1 fue la más ácida (pH= 5.1) y su color amarillo se puede atribuir a la oxidación de las fases mineralógicas presentes. En cambio, las muestras M3 y M5 presentaron valores casi neutros (pH= 6.5) y un color café que sugieren la presencia fase minerales poco oxidadas, pero con nutrientes suficientes para el desarrollo de la vegetación, misma que puede actuar como adsorbente de EPT's (Hernández, 2001). Lo antes mencionado se respalda por el hecho que los jales mineros con el valor de pH más ácido (pH=5.1, muestra M1) no muestran vegetación. Además, la relación entre el color de los jales y la generación de ácido ya se ha establecido como una un parámetro que está relacionado con su grado de oxidación (Romero y Gutiérrez, 2010).



**Figura 1.** Muestras de jales mineros provenientes de la Presa Dos Carlos en el Estado de Hidalgo.

Para confirmar que el color de los jales se relaciona con el grado de oxidación de las fases minerales, las muestras M1, M3 y M5 se trataron en forma térmica en una mufla de laboratorio a 350°C por un tiempo de dos horas. Los resultados obtenidos muestran una coloración rojiza para las muestras M1 y M3 que puede atribuirse

a la formación de óxidos de hierro a partir de ion férrico, producto de la oxidación de la pirita de acuerdo con la reacción 4.



**Figura 2.** Muestra de jales mineros provenientes de la Presa Dos Carlos en el Estado de Hidalgo, con tratamiento térmico de 350°C por 2 horas. M1, M3 y M5 (de izquierda a derecha).

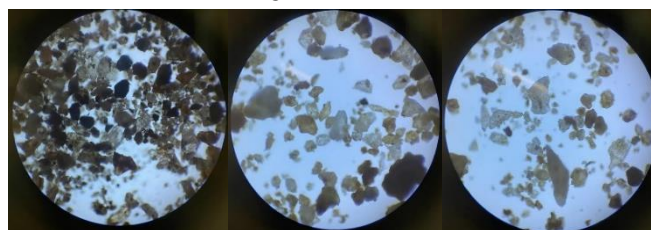
La variación de color en las muestras (Figuras 1 y 2) está de acuerdo con los parámetros correspondiente de pH, conductividad y ORP (Tabla 1), en donde para la muestra M1 es posible la presencia de ácidos y oxidantes disueltos, que en conjunto aumentan la conductividad y ORP, respectivamente. Para los licores de las muestras M3 y M5, los valores altos de conductividad y valores relativamente bajos de ORP, sugieren la presencia de iones, por ejemplo, calcio, magnesio y manganeso, como se muestra más adelante en la Tabla 3.

Por otro lado, en el tratamiento térmico, por separado, también se encontró una pérdida de masa de aproximadamente 2%, la cual se puede asociar a materia orgánica, puesto que el origen de los jales mineros de esta investigación es del tipo epitermal y resultaron de procesos de cianuración- amalgamamiento de mercurio.

**Tabla 1.** Parámetros en el licor de la lechada a 100 g/L.

	M1	M3	M5
pH	4.55±0.02	7.20±0.02	7.5±0.01
Conductividad(μS/cm)	3125±21	655±17	901±21
ORP (mV vs SHE)	386±5	180±17	125±7

Las muestras seleccionadas se observaron a través del microscopio óptico, en donde para las muestras M1 y M3 fue posible encontrar la presencia de especies oscuras que pueden atribuirse a fases minerales con cierto grado de oxidación (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). No obstante, para el caso de la muestra M5, la imagen del microscopio óptico indica la presencia de fases minerales más claras que pueden atribuirse a los silicatos (cuarzo y andradita, por ejemplo) como lo demuestra el difractograma con su respectivo análisis semicuantitativo (Figura 4).



**Figura 3.** Muestras de jales mineros provenientes de la Presa Dos Carlos localizada en el Estado de Hidalgo. Imágenes de microscopio óptico. M1, M3 y M5 (de izquierda a derecha).

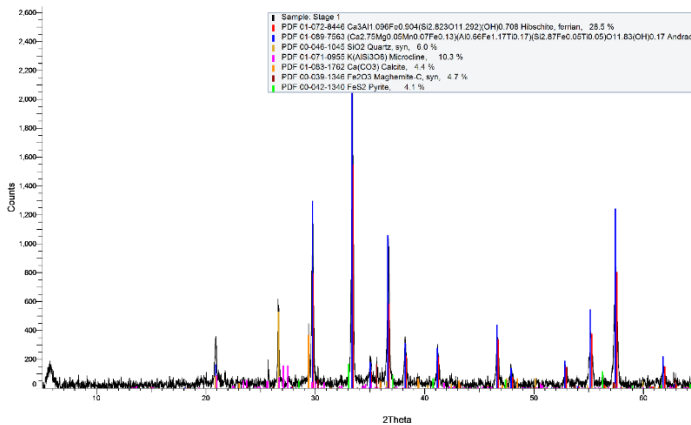


Figura 4. Difractograma de Rayos X correspondiente a una muestra aleatoria de jales mineros de la Presa Dos Carlos.

Composición química y granulometría de los jales mineros

En la Tabla 2 se muestran las concentraciones metálicas para las muestras M1, M3 y M5 de jales mineros, así como para una muestra aleatoria tomada en el lugar de depósito. Como se puede observar, la composición metálica es totalmente heterogénea por lo que no es posible asociar la variación de la composición en función de la ubicación de la muestra. No obstante, se observa que el hierro es el elemento más abundante, probablemente en forma de silicatos y pirita como lo muestra el difractograma de la Figura 4. Con base en el análisis semicuantitativo por Difracción de Rayos X (Figura 4) el contenido de pirita es alrededor de 4.1%, valor numérico similar a lo reportado por Moreno (2009) en un análisis de caracterización amplio usando Difracción de Rayos X y microscopía electrónica de Barrido. Este contenido de pirita equivale a un 2.2 % de S<sup>2-</sup>.

Tabla 2. Composición metálica de los jales mineros de la Presa Dos Carlos.

	Contenido metálico (mg/kg o g/ton)			
	M1	M3	M5	Muestra aleatoria
Pb	238.5	3741.5	555	650
Fe	19150	18750	15251	17800
Cu	53.5	212	140	150
Zn	356	1200	960	860
As	0.5	1.5	4.2	2.5
Ca	4405	3923	9201	5800
Mg	998	1348	3681	1700
Mn	2488	4736	3805	3850
Si	8500	6578	9200	5500
Ag	51.5	40.5	21.3	38.5

Por otro lado, es importante mencionar que los valores de concentraciones para los metales de la Tabla 2 exceden los límites establecidos por la NOM-141-SEMARNAT-1993 para residuos sólidos, por lo tanto, estos metales representan un riesgo para el medio ambiente, en particular para las aguas subterráneas. Desde luego, el riesgo de contaminación está sujeto a que en el lugar de depósito se establezcan condiciones lo suficientemente ácidas como el agua regia para promover la disolución completa de este tipo de residuos; sin embargo, como tales condiciones probablemente no se vaya a establecer de manera natural, se consideró un escenario más real, en donde los jales mineros estén en contacto con lluvia ácida (pH aproximadamente de 4.5) simulada a partir de una mezcla de ácidos sulfúrico, nítrico y carbónico, respectivamente.

Otro resultado importante esta investigación es el tamaño de partícula (el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula de

125µm) para este tipo de residuos, debido a que los fuertes vientos del Estado de Hidalgo pueden favorecer el transporte desde el lugar de depósito hacia la población, transportando este tipo de partículas al sistema respiratorio de los seres humanos que habitan a los alrededores de la Presa Dos Carlos. Como se puede observar en la Figura 5, aproximadamente 30% de las partículas contiene un tamaño menor a 37 micras con la desventaja adicional que, en este tamaño de partícula se encuentra una alta concentración de plomo (aproximadamente 600 g/ton) y su exposición representa suma un riesgo más a la salud. Aunado a ello, la abundancia de silicio también representa un problema a la salud debido a que este metal es precursor de la enfermedad pulmonar conocida como silicosis (Gomes y Silva, 2021).

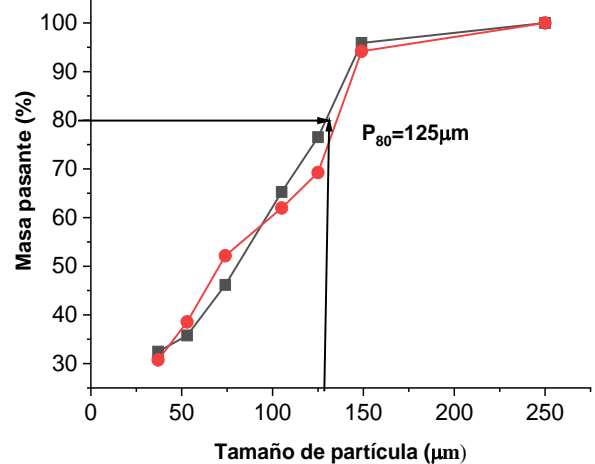


Figura 5. Distribución del tamaño de partícula en los jales mineros del estado de Hidalgo. M1 (línea color rojo) y muestra aleatoria (línea color negro).

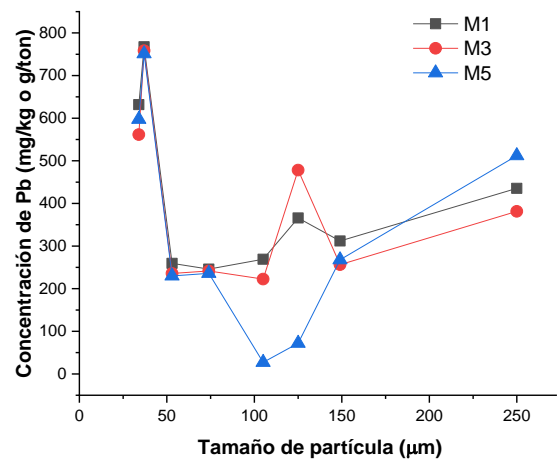


Figura 6. Distribución de la concentración de plomo en jales mineros del estado de Hidalgo.

Drenaje ácido y disolución de EPT's

Si bien en este trabajo carece de una caracterización completa por microscopía electrónica de barrido y análisis puntales de EDS para confirmar a los sulfuros minerales presentes, es importante mencionar que la presencia de ella es alrededor de 5% (Moreno,2009), porcentaje total que corresponde a pirita (FeS<sub>2</sub>), esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), Calcocita y covelita (Cu<sub>2</sub>S, CuS), respectivamente. El valor de 5% para el contenido de sulfuros es aproximadamente similar al 4.1% obtenido en este trabajo, solo que en este caso se atribuye únicamente a pirita y no a la suma del total de sulfuros, por su puesto, el bajo contenido de plomo, zinc y cobre sugieren poca abundancia de galena y esfalerita. A partir del 4.1% de pirita se

obtuvo un valor de PA igual a 68 kg CaCO<sub>3</sub>/ton correspondiente a la muestra aleatoria. A partir de este cálculo, en la Figura 7 se observa que la muestra M1 es altamente ácida, es decir, carece de fases minerales atenuantes de ácido que pudieran contrarrestar el drenaje ácido que se genere a futuro. En cambio, las muestras M3 y M5 contiene al menos 20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton para atenuar en cierta medida el ácido que pudiera generarse por la oxidación completa de los sulfuros. Con base en estos resultados, la relación PN/PA resultó 0.3, es decir, menor a 1.2; por lo tanto, es posible decir que los jales mineros localizados en la Presa Dos Carlos tienen un alto potencial generador de drenaje ácido y riesgo de disolución de EPT's.

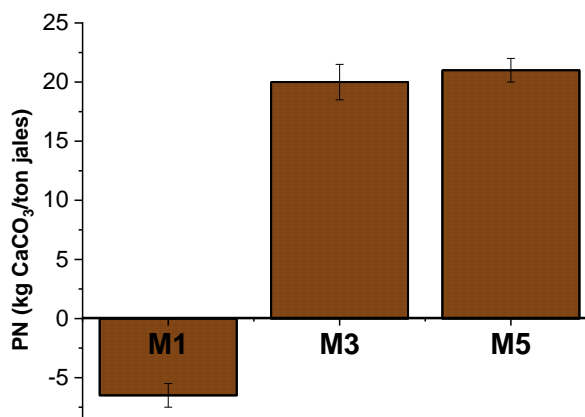


Figura 7. Potencial de Neutralización en los jales mineros provenientes de la Presa de Dos Carlos. Muestra aleatoria de jales.

Con respecto a la disolución de EPT's a pH=4.5, en la Tabla 3 se observa que el plomo es el único metal que se disuelve en una concentración superior al límite máximo permisible (LMP) establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. Por tal motivo, los lixiviados de la Presa de Dos Carlos bajo condiciones de pH=4.5 (aproximadamente al pH de la lluvia ácida) presentan alto riesgos de movilidad por plomo y de contaminación a cuerpos de agua.

Tabla 3. Concentración de EPT's en una solución de pH=4.5 con jales mineros de la Presa Dos Carlos.

	Contenido metálico (mg/kg o g/ton)			
	M1	M3	M5	Muestra aleatoria
L.M.P	10	10	10	10
Pb	17.5	14	11	13.5
As	0.4	0.1	0.1	0.1
Ni	4	2	2	1.5
Ag	51.5	40.5	21.3	2.5
Ca	55	46	42	62
Mg	74	71	58	65
Mn	68	72	47	52

**Valor agregado de los jales mineros**

Los resultados de esta investigación muestran el bajo contenido de metales base (Pb, Zn y Cu) por lo que se demuestra que este tipo de residuos no son una alternativa como materia prima para establecer un proceso metalúrgico que permita recuperar un metal base como lo propusieron Ruiz-Sánchez y colaboradores en el 2022. En cambio, el contenido de plata (Figura 8) abre una oportunidad atractiva, para usar los jales mineros de la Presa Dos Carlos en la recuperación de plata, en particular por las siguientes razones: (i) el 80% de los jales tiene un tamaño de 125 μm por lo

que no es necesario realizar una molienda adicional para disminuir el tamaño de partícula y mejorar la cinética del proceso y, (ii) la baja cantidad de metales base (Cu, Pb y Zn) no representa un problema para el consumo de tiourea o tiosulfato cal usarse como alternativas para el proceso de cianuración en la disolución de plata.

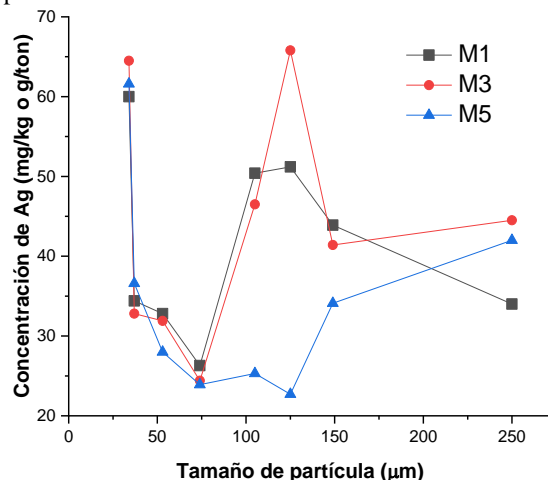


Figura 8. Distribución de la concentración de plata en jales mineros del estado de Hidalgo.

Con respecto al proceso de lixiviación los experimentos preliminares, usando 0.1M peróxido de hidrógeno-tiourea 0.2M, han permitido obtener el 20% de la plata total en forma disuelta después de 60 minutos. Si bien este porcentaje de disolución es muy bajo, los autores consideramos la necesidad de realizarla caracterización minuciosa por microscopía electrónica de barrido para identificar las fases minerales en las que se encuentra la plata y entonces proponer cambios en el proceso de lixiviación y/o sugerir nuevos sistemas de lixiviación.

Por último, debido a la alta concentración de silicio en este tipo de residuos se recomienda utilizar a los jales mineros de la Presa Dos Carlos como aditivos en la producción de morteros para la industria de la construcción (Kuranchie et al., 2015)

**4. Conclusiones**

- Los jales mineros de la Presa Dos Carlos presentan alto potencial de generación de drenaje ácido y un alto riesgo para la salud de la población que habita en los límites del depósito.
- El plomo es elemento tóxico de mayor riesgo debido a que su disolución a pH=4.5 supera el LMP establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993.
- Los jales mineros de la Presa Dos Carlos pueden considerarse como una materia prima potencial para la recuperación de plata, pero es necesario realizar una caracterización detallada sobre la mineralogía en la que se encuentra este metal precioso para proponer un sistema de lixiviación favorable.

**Agradecimientos**

Ángel Ruiz Sánchez agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el segundo año de beca otorgada en la Convocatoria de Estancias Posdoctorales por México Modalidades 1 y 2.

**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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>
- de la Torre, J.A.F., Mitchell, K., Gomez, 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, Mexico. *Environ. Earth Sci.*, 77(10), 386.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7563-7>
- Kuranchie, F.A., Shukla, S.K., Habibi, D., Mohyeddin, A., (2015). Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Eng.* 2 (1), 1083137.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>
- Gómez-Bernal, J. M., Ruiz-Huerta, E. A., Armenta-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.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7144-1>
- Hernández, G. R. (2001). Nutrición Mineral de las Plantas. Material didáctico. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114.
- 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5755-6>
- Lawrence R.W. and Wang Y., (1997). “Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage” Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, Canada.
- Moreno, R., Monroy, M. G., Castañeda, E. P. (2009). Evaluación geoquímica de residuos mineros (Jales O Colas) demineralización de tipo epitermal, Hidalgo, México. *Revista Geológica de América Central*, (41), 79-97.
- 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 posoperación 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>
- 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113553>
- 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>
- 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.012>
- Romero, F. M., Gutiérrez Ruíz, M., (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53.
- Romero, F. M.; Armienta, Ma. A.; Gutiérrez, M. E.; Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 24: 43-54.
- Ruiz-Sánchez, A., Tapia, J. C. J., Lapidus, G. T. (2023). Evaluation of acid mine drainage (AMD) from tailings and their valorization by copper recovery. *Minerals Engineering*, 191, 107979.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107979>
- Sánchez, Á. R., Juárez-Tapia, J. C., Lapidus, G. T., (2022). Evaluación del potencial generador de ácido de mina en jales mineros del estado de Zacatecas. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 9(9), 65-70.  
DOI: <https://doi.org/10.29057/aactm.v9i9.9405>
- 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.
- Wang, X., Jiang, H., Fang, D., Liang, J., Zhou, L. (2019). A novel approach to rapidly purify acid mine drainage through chemically forming schwertmannite followed by lime neutralization. *Water research*, 151, 515-522.
- Gomes, C. S., Silva, E. A., (2021). Health Benefits and Risks of Minerals: Bioavailability, Bio-Essentiality, Toxicity, and Pathologies. In *Minerals latu sensu and Human Health: Benefits, Toxicity and Pathologies* (pp. 81-179). Cham: Springer International Publishing.