



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN JALES  
MINEROS”**

**TESIS**

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

I.Q. VICTORIA ALARCON ELVIRA

DIRECTOR:

DR. ÁNGEL RUIZ SÁNCHEZ

CO-DIRECTOR

DRA. GABYCARMEN NAVARRETE RODRÍGUEZ

ASESOR

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

ASESOR

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

**ENERO 2023**

**BOCA DEL RÍO, VERACRUZ. MÉXICO**



**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

**Número Registro: A-01202-110221**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 22 del mes de noviembre de 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

**"EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN JALES MINEROS"**

Que presenta el (la) alumno(a):

**VICTORIA ALARCON ELVIRA**

Aspirante al Grado de:

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

**LA COMISIÓN REVISORA:**

  
Dra. Ángel Ruiz Sánchez

Director



DRA. GABYARMEN NAVARRETE RODRÍGUEZ

Co-Director



DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

Asesor



DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

Asesor





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Boca del Río, Ver **15/NOVIEMBRE/2022**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**VICTORIA ALARCON ELVIRA  
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

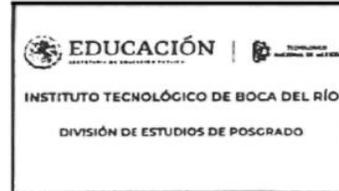
**“EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN JALES MINEROS”**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®  
Por nuestros mares responderemos*

**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB  
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.  
Tel. (229) 690 5010 dir01\_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



**2022 Flores**  
Año de Magón  
PRELUSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



**LICENCIA DE USO OTORGADA POR VICTORIA ALARCON ELVIRA**, de nacionalidad **Mexicana** mayor de edad, con domicilio ubicado en **C. Antonio Ballezo, oriente 107, Colonia Úrsulo Galván, Piedras Negras, Tlalixcoyan, Veracruz**, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **“EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN JALES MINEROS”** en adelante **“LA OBRA”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **“EL AUTOR Y/O EL TITULAR”**, a favor del **Instituto Tecnológico de Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrará por las cláusulas siguientes:

**PRIMERA –OBJETO: “EL AUTOR Y/O TITULAR”**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de **Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **“LA OBRA”**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

**SEGUNDA - TERRITORIO:** La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

**TERCERA -ALCANCE:** La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **“LA OBRA”** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

**CUARTA – EXCLUSIVIDAD:** La presente licencia de so aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico **de Boca del Río**; por lo tanto, **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** conserva los derechos patrimoniales y morales de **“LA OBRA”**, objeto del presente documento.

**QUINTA – CRÉDITOS:** El Instituto Tecnológico **de Boca del Río** y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **“AUTOR Y/O TITULAR”** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **“LA OBRA”**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

**SEXTA – AUTORÍA:** **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **“LA OBRA”** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Boca del Río, Veracruz, a los **30** días del mes de **ENERO** de 2023.

**“EL AUTOR Y/O TITULAR” “EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO”**

\_\_\_\_\_



## RESUMEN

En México la minería se considera una de las principales actividades económicas por el aporte sustancial en el Producto Interno Bruto de México, sin embargo, esta actividad da origen a la generación de grandes volúmenes de residuos del procesamiento de minerales una vez que se han recuperado por vía metalúrgica o pirometalúrgica los valores de interés comercial tales como Cu, Pb, Zn, Ag y Au. Este tipo de residuos recibe el nombre de jales mineros. 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 que esta cantidad se duplique para el año 2035. En México los jales mineros tienen su origen en la actividad minera de hace 450 años, principalmente en los estados de Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero. Esta actividad minera ha acumulado millones de toneladas de jales mineros, los cuales se han depositado a cielo abierto en lugares conocidos como presas de jales. La mayoría de los jales mineros en México provienen de procesos de amalgamamiento y cianuración, utilizados para la recuperación de oro y plata, respectivamente.

Por otro lado, Zacatecas es el segundo estado con mayor producción minero-metalúrgica del país, lo que implica la generación de miles de toneladas de residuos anuales, susceptibles a generar drenaje ácido de mina (DAM) y como consecuencia disolución de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) que se transportan a través de lixiviados, llegando a tener contacto con cuerpos de agua, generando un alto nivel de contaminación. Por tal motivo, en el presente trabajo de investigación se evaluó el potencial generador DAM en jales mineros del noroeste Estado de Zacatecas, mediante el método del balance ácido-base; es decir, de los potenciales de acidez (PA) y neutralización (PN), respectivamente. Así como la caracterización sistemática de las fases minerales tipo sulfuros presentes, su contenido metálico y el tamaño de partícula; con la finalidad de para discernir el potencial de DAM. Además, de un análisis sobre las diferentes alternativas que otorguen un valor comercial a este tipo de residuos y con ello aprovecharles en la medida de lo posible. En ese sentido, se presenta la opción de utilizar a los jales mineros como aditivos en la elaboración de morteros para la industria de la construcción.

Los resultados demostraron que los jales mineros del Estado de Zacatecas tienen una relación  $PN/PA=0.24$  lo que de acuerdo con la SEMARNAT (2003) correspondería a un residuo con alto potencial generador de DAM y de disolución de EPT's, no obstante, el análisis mineralógico de

los jales mineros en conjunto con la distribución de tamaño de partícula y composición metálica ha sido suficiente para confirmar que el 3.7% de pirita en los jales mineros no podría dar lugar a la generación de DAM y disolución de EPT's debido a que dicho sulfuro mineral se encuentra ocluido en los silicatos (hibschita ferriana, andradita, microclina) y cuarzo; lo que sugiere una oxidación lenta puesto que, en primer los silicatos atenuarían dicho ácido, y en segundo lugar, por la dificultad del oxígeno a difundir a través de los silicatos y provocar la oxidación directa de este sulfuro.

**Palabras clave:** Jales mineros, balance ácido-base, drenaje ácido de mina, elementos potencialmente tóxicos, potencial de acidez, potencial de neutralización, valorización de los jales mineros.

## ABSTRACT

In Mexico, mining is considered one of the main economic activities due to the substantial contribution to the Gross Domestic Product of Mexico, however, this activity gives rise to the generation of large volumes of waste from mineral processing once they have been recovered by via metallurgical or pyrometallurgical values of commercial interest such as Cu, Pb, Zn, Ag and Au. This type of waste is called mining tailings. According to Araya et al. (2020, 2021) worldwide, the mining industry generates around 10 billion tons of mining tailings per year, with the tendency for this amount to double by 2035. In Mexico, mining tailings originate from mining activity. 450 years ago, mainly in the states of Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima and Guerrero. This mining activity has accumulated millions of tons of mining tailings, which have been deposited in the open in places known as tailing dams. Most of the mining tailings in Mexico come from amalgamation and cyanidation processes, used for the recovery of gold and silver, respectively.

On the other hand, Zacatecas is the state with the second highest mining-metallurgical production in the country, which implies the generation of thousands of tons of waste annually, susceptible to generating acid mine drainage (AMD) and as a consequence dissolution of potentially toxic elements (EPT's) that are transported through leachate, coming into contact with bodies of water, generating a high level of contamination. For this reason, in the present research work, the potential DAM generator in mining tailings in the northwestern State of Zacatecas was evaluated, using the acid-base balance method; that is to say, of the potentials of acidity (PA) and neutralization (PN), respectively. As well as the systematic characterization of the sulfide-type mineral phases present, their metallic content and particle size; in order to discern the potential of DAM. In addition, an analysis of the different alternatives that give a commercial value to this type of waste and thus take advantage of them as much as possible. In this sense, the option of using mining tailings as additives in the preparation of mortars for the construction industry is presented.

The results showed that the mining tailings of the State of Zacatecas have a PN/PA ratio=0.24, which according to SEMARNAT (2003) would correspond to a residue with a high potential for generating DAM and dissolving EPT's, however, the mineralogical analysis of the mining tailings together with the particle size distribution and metallic composition has been sufficient to confirm that the 3.7% pyrite in the mining tailings could not give rise to the generation of DAM and dissolution of EPT's due to because said mineral sulfide is occluded in silicates (ferriana hibschite,

andradite, microcline) and quartz; which suggests a slow oxidation since, firstly, the silicates would attenuate said acid, and secondly, due to the difficulty of oxygen diffusing through the silicates and causing the direct oxidation of this sulfide.

**Keywords:** Mining tailings, acid-base balance, acid mine drainage, potentially toxic elements, acidity potential, neutralization potential, valorization of mining tailings.

## **AGRADECIMIENTOS**

A el Dr. Ángel Ruiz Sánchez por su apoyo incondicional y comprensión en todo momento. Gracias por permitirme formar parte de su equipo de trabajo a lo largo del desarrollo de este proyecto, por su orientación y conocimientos adquiridos que permitieron mejorar el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación.

A la Dra. Gabycarmen Navarrete Rodríguez por todo el apoyo proporcionado como co-director de este proyecto de investigación. Gracias Dra. Navarrete.

A mis asesores de esta investigación: Dra. María Del Refugio Castañeda Chávez y Dra. Fabiola Lango Reynoso por sus valiosas aportaciones y sugerencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (ConacyT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca con número de apoyo 773648.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM), en particular a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Boca del Río por darme la oportunidad de crecer mi acervo científico formando parte del programa Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, generación 2020-2022.

A todos los miembros del Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, profesores, compañeros de generación y personal que de alguna manera (directa o indirecta) contribuyeron en mi formación social, cultural y académica.

Gracias por todo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....</b>	<b>17</b>
2.1 La minería en México .....	17
2.2 Pasivos ambientales mineros .....	17
2.3 Residuos mineros.....	17
2.4 Jales mineros .....	19
2.5 Características de los jales mineros .....	20
2.5.1 Granulometría .....	20
2.5.2 Mineralogía.....	21
2.5.4 Drenaje ácido de mina.....	23
2.5.5 Elementos potencialmente tóxicos.....	23
2.6 Reacciones en la generación de acidez .....	24
2.7 Técnicas predicción de drenaje ácido.....	26
2.7.1 Ensayos estáticos.....	26
2.7.2 Balance Ácido-Base .....	27
2.8 Impactos negativos hacia el medio ambiente por parte de los Jales mineros .....	28
2.8 Usos alternativos de los jales mineros.....	28
2.8.1 Encapsulamiento: .....	29
2.8.2 Microencapsulación: .....	29
<b>3. MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>30</b>
3.1 Lugar de estudio.....	30
3.2 Antecedentes .....	31
3.3 Frontera de conocimiento .....	32
<b>4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>33</b>

4.1 Planteamiento del problema .....	33
4.2 Preguntas de investigación.....	34
4.3 Justificación.....	34
<b>5. HIPÓTESIS .....</b>	<b>35</b>
5.1 General .....	35
<b>6. OBJETIVOS.....</b>	<b>35</b>
6.1 General .....	35
6.2 Particulares .....	35
<b>7. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
7.1 Preparación de muestra .....	36
7.2 Balance Ácido-Base .....	36
7.2.1 Potencial de neutralización (PN).....	36
7.2.2 Potencial de acidez (PA) .....	37
7.3 Propiedades fisicoquímicas .....	37
7.3.1 pH y conductividad eléctrica .....	37
7.3.2 Granulometría y Contenido metálico.....	37
7.3.3 Mineralogía.....	37
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>39</b>
8.1 Relación Ácido-Base .....	39
8.2 Propiedades fisicoquímicas .....	39
8.2.1 pH y conductividad eléctrica .....	39
8.2.2 Granulometría .....	39
8.2.3 Contenido metálico.....	40
8.2.4 Mineralogía.....	42
8.3 Propuesta para otorgar valor agregado a los jales mineros .....	45
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>10. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>

11. ANEXO .....49

12. REFERENCIAS.....51

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clasificación de los residuos mineros.....	18
<b>Cuadro 2.</b> Oxidación de minerales tipo sulfuro.....	19
<b>Cuadro 3.</b> Neutralización de ácido mediante minerales .....	19
<b>Cuadro 4.</b> Granulometría en jales mineros .....	20
<b>Cuadro 6.</b> Impactos ambientales derivados de los jales y residuos mineros. ....	28
<b>Cuadro 7.</b> Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN.....	36
<b>Cuadro 8.</b> Valores de PN y PA correspondiente a la muestra de jal minero.....	39
<b>Cuadro 9.</b> Contenido metálico en muestra aleatoria cuantificada por AAS y FRX.....	42
<b>Cuadro 10.</b> Contenido de pirita en jal minero. ....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del municipio de Sombrerete, Zacatecas.....	30
<b>Figura 2.</b> Granulometría correspondiente a la muestra de jal minero.....	40
<b>Figura 3.</b> Composición metálica del jale minero a diferentes tamaños de partícula. (a) Cu, Pb, Zn y As. (b) Fe y Ca. ....	41
<b>Figura 4.</b> Difractograma correspondiente a la muestra de jal minero. ....	43
<b>Figura 5.</b> Micrográficas de MEB para la muestra de jal minero. (a) Heterogeneidad en el tamaño de partícula. (b) Mapeo para la localización de hierro (color rojo), silicio (color verde) y azufre (color azul), y (c) fases complejas con pirita. ....	44
<b>Figura 6.</b> Micrográficas de MEB correspondientes a la pirita contenida en la muestra de jales mineros. Amplíe el archivo para ver mejor los puntos azules en la imagen. ....	45
<b>Figura 7.</b> Proceso de obtención de los agregados de construcción. ....	46
<b>Figura 8.</b> Esquema para la elaboración de materiales de construcción a partir de agregados. .	46
<b>Figura 9.</b> Muestra de jal minero .....	49
<b>Figura 10.</b> Análisis previos a la determinación del potencial de neutralización (a) Medición de propiedades fisicoquímicas pH y conductividad eléctrica, (b) Determinación del grado de efervescencia utilizando HCL. (C) Muestras acondicionadas para posterior agitación.....	49
<b>Figura 11.</b> Digestión de la muestra. ....	50
<b>Figura 12.</b> Equipos para la caracterización de los jales mineros. (a-b) Contenido metálicos AAS y FRX. (c-d) Mineralogía DRX y MEB.....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería se considera una de las principales actividades económicas que contribuye en el crecimiento de México, no obstante, en esta actividad durante el procesamiento de los minerales para la obtención de metales de interés comercial por vía metalúrgica se generan grandes volúmenes de residuos, los cuales son depositados en zonas aledañas al sitio de procesamiento. Este tipo de residuos reciben el nombre de jales mineros, mismos que en el caso de México se localizan en los estados de Zacatecas, Chihuahua, San Luis Potosí, Jalisco, Michoacán, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero (Salas, 2014). Se estima que la industria minera, genera alrededor de 1500 a 2000 millones de toneladas de residuos, entre los que destacan aproximadamente 200000 toneladas correspondientes al estado de Zacatecas (Escobar *et al.*, 2016). Los jales mineros del Estado de Zacatecas tienen su origen en procesos de amalgamamiento utilizados desde la época colonial para la recuperación de oro y plata.

Uno de los principales problemas asociados a los jales mineros es la generación de DAM debido a la oxidación de los minerales tipo sulfuro por el intemperismo y la acción catalizadora de bacterias (Vidales y Katerine, 2018). El ácido generado puede dar lugar a la disolución de otras fases mineralógicas cuya estructura contiene EPT's (Salas, 2014), provocando impactos ambientales a corto y largo plazo que propician alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelo y agua, ya que los lixiviados provenientes de este proceso se convierten en una fuente difusa difícil de controlar, afectando de esta manera grandes volúmenes de agua que se dispersan por infiltración, lluvia o corrientes superficiales propagándose hacia otros cuerpos de agua cercanos.

La presencia de DAM en medios acuáticos conlleva al incremento de la concentración de hierro (esto provoca coloración roja/naranja), sulfatos y metales como Pb, Cu, Zn, Fe, Al, Mn, Hg Cd y Ni, lo que genera un desequilibrio en el pH (Aduvire, 2006; Forigua *et al.*, 2017), y como consecuencia el deterioro en la calidad del agua, la destrucción de la vida acuática y el desequilibrio del ecosistema.

Los jales mineros también contienen minerales consumidores de ácido como los silicatos, hidróxidos y carbonatos, los cuales neutralizan de manera natural el ácido generado (Lira y Ignacia, 2021). La capacidad de los jales mineros para generar DAM depende del equilibrio entre los minerales potencialmente generadores de ácido y los minerales atenuadores de ácido.

La generación de ácido a través de la oxidación de sulfuros se conoce como potencial ácido (PA), mientras que la cantidad de ácido que puede neutralizarse por los atenuadores se denomina potencial de neutralización (PN). Para estimar la relación PN/PA existen distintos procedimientos, actualmente el más común utilizado para pronosticar la posible generación de DAM es la "Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (Lawrence y Wang, 1997). En este sentido, la evaluación del potencial de generación de DAM sugiere el riesgo de disolución de EPT's e identifica las características de los jales mineros. Esta información, puede ayudar a predecir o controlar la generación de DAM a largo plazo o establecer el tipo de atenuador que es posible agregar para dar estabilidad a los minerales tipo sulfuro.

Por lo antes mencionado, el objetivo de la investigación es evaluar el potencial de DAM a partir del balance ácido-base y las propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, granulometría, contenido metálico y mineralogía) de una muestra de jal minero proveniente de la región noroeste del Estado de Zacatecas, para determinar si existe riesgo de disolución de EPT's y establecer acciones en la prevención de este efluente, así como el análisis de algunos procesos alternativos que disminuyan el impacto ambiental provocado por los jales mineros, a través del usos de ellos, como por ejemplo su aplicación como aditivos para la elaboración de morteros utilizados en la industria de la construcción.

## **2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1 La minería en México**

La tradición minera en México inició desde épocas prehispánicas, con la explotación a pequeña escala de yacimientos epitermales en las regiones de Zacatecas, Taxco, Pachuca, Querétaro, Guanajuato y Santa Bárbara. Donde se aprovechaban diversos minerales en estado nativo como la plata, el oro, cobre, estaño y mercurio (en forma de cinabrio). No obstante, hasta épocas coloniales la actividad minera alcanzó mayor relevancia económica y social, proporcionando insumos para las industrias de la construcción siderurgia, química y metalurgia contribuyendo al desarrollo del país. A principios del siglo XX el avance tecnológico en la industria minera favoreció en la incorporación de procesos metalúrgicos como la flotación y la cianuración en México, permitiendo explotar grandes cantidades de minerales con valor comercial ocasionando grandes volúmenes de desechos entre los que se destacan los jales mineros. De acuerdo con la secretaría de economía en el 2013, los estados con mayor aportación minera nacional correspondían inicialmente al estado de Sonora seguido por Zacatecas, Chihuahua, Durango, San Luis Potosí. No obstante, hasta marzo del 2018 a la fecha, el estado de Zacatecas ocupa primer lugar de la producción minera de plata, zinc y plomo a nivel nacional, segundo y tercer lugar en la producción de cobre y oro (Maldonado Tapia, 2011; Ramírez *et al.*, 2020).

### **2.2 Pasivos ambientales mineros**

Aquellos efluentes, restos o depósitos de residuos, emisiones, procedentes de las operaciones mineras en inactividad o abandono, implican un riesgo constante a la población y zonas circundantes. Los pasivos ambientales mineros comprenden escombreras, socavones y presas de relaves de minas sin operación o en abandono que provocan alteraciones en zonas de influencia de estos desechos, en forma específica los jales mineros históricos o abandonados pueden ocasionar impactos medio ambientales como afectaciones en aguas subterráneas o superficiales, presencia de elementos potencialmente tóxicos, contaminación de suelos y aire en zonas circundantes.

### **2.3 Residuos mineros**

Los residuos mineros (relaves o colas), generados por las operaciones de procesamiento y explotación de minerales que se han depositado a lo largo del tiempo en las regiones mineras del país, en conjunto con la generación de drenaje ácido de mina, son una fuente significativa de contaminación por metales pesados en aguas superficiales y subterráneas (Zamora y Benzaazoua, 2003).

De acuerdo con la NOM-157-SEMARNAT-2009 los residuos mineros se pueden clasificar en función de su procesamiento tal y como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Clasificación de los residuos mineros.

---

<b>Residuos mineros</b>		
<b>Residuos provenientes de la minería</b>		
a) Terreros		
b) Tepetates		
Residuos provenientes del beneficio de minerales	<b>Residuos de la concentración de minerales</b>	<b>Residuos del beneficio físico:</b> a) Jales de la separación magnética o electrostática b) Jales de la concentración gravimétrica <b>Residuos del beneficio fisicoquímico:</b> a) Jales de flotación b) Reactivos gastados de los procesos de flotación <b>Residuos del beneficio de minerales por procesos químicos o bioquímicos:</b> a) Jales cianurados b) Mineral gastado de sistemas de lixiviación en montones
	<b>Residuos de los procesos pirometalúrgicos:</b> a) Escorias vitrificadas b) Escorias carbonatadas c) Catalizador gastado d) Ladrillo refractario e) Lodos de la limpieza de gases incluyendo lonas filtrantes deterioradas f) Lodos del tratamiento del ácido débil g) Lodos del almacenamiento de ácido sulfúrico h) Lodos de las purgas de las plantas de ácido i) Polvos de hornos j) Otros residuos	
	<b>Residuos de los procesos hidrometalúrgicos:</b> a) Yesos b) Lodos de la precipitación del hierro c) Lodos de la lixiviación en tanques d) Lodos del ánodo electrolítico e) Carbón activado gastado f) Lodos de la extracción por disolventes g) Azufre elemental proveniente de la lixiviación directa de concentrados de zinc h) Otros residuos	

---

## 2.4 Jales mineros

Los jales mineros son residuos sólidos resultantes de las operaciones de separación y extracción de minerales. La palabra jal proviene del náhuatl “Xalli” que significa arenas finas, se emplea para denominar a todos los materiales naturales sin valor como vestigio de minerales, también se denominan colas o relaves (De La Cruz, 2022).

Los jales, que se genera por la extracción de minerales de valor comercial para la recuperación de metales, contienen grandes cantidades de minerales tipo sulfuro (pirita, arsenopirita, calcopirita) sin valor comercial, los cuales al oxidarse tienen el potencial de generar drenaje ácido y liberar elementos como hierro, cobre, plomo, cadmio y zinc, a diferencia de fases minerales como la esfalerita y la galena (Cuadro 2). Por otra parte, existen reacciones que tienden a neutralizar el ácido generado mediante los carbonatos y silicatos (Cuadro 3) presentes en los jales.

**Cuadro 2.** Oxidación de minerales tipo sulfuro

Minerales	Reacción de oxidación	Moles de $H^+$ liberados
Pirita	$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{-2} + 2H^+$	2
Arsenopirita	$4FeAsS + 13O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe^{2+} + 4SO_4^{-2} + 4H_2AsO_4^- + 4H^+$	4
	$FeAsS + \frac{7}{2}O_2 + 6H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + SO_4^{-2} + H_2AsO_4^- + H^+$	1
Calcopirita	$2CuFeS_2 + 4O_2 \rightarrow 2Cu^{2+} + Fe^{2+} + SO_4^{-2}$	-
	$2CuFeS_2 + \frac{17}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2Cu^{2+} + 2Fe(OH)_3 + 4SO_4^{-2} + 4H^+$	4
Galena	$PbS + 2O_2 \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{-2}$	-
Esfalerita	$ZnS + 2O_2 \rightarrow Zn^{2+} + SO_4^{-2}$	-

Recuperado: Dold (2003)

**Cuadro 3.** Neutralización de ácido mediante minerales

Minerales	Reacción de neutralización
Calcita	$CaCO_3 + H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$
Silicatos	$MeAlSiO_4 + H^+ + 3H_2O \rightarrow Me^+ + Al^{3+} + H_4SiO_4 + 3OH^-$
	$2MeAlSiO_4 + 2H^+ + H_2O \rightarrow Me^+ + Al_2Si_2O_5(OH)_4$

Minerales (Me): Ca, Na, K, Mg, Mn o Fe. Recuperado: Dold (2003)

Establecer los minerales presentes en los jales mineros y la concentración de elementos traza además del tamaño de partícula y cristalinidad, son claves para entender las reacciones que

conllevar a impactos ambientales como la generación de DAM y liberación de EPT's en el suelo y agua. En ese sentido, el impacto ambiental de los jales mineros es influenciado por múltiples factores como la mineralogía primaria o condiciones fisicoquímicas prevalecientes. Por otro lado, la generación de revestimientos inertes favorece a los procesos naturales de atenuación debido a que minerales secundarios de hierro logran adsorber elementos traza, este fenómeno puede ser temporal y subsecuentemente liberar EPT's (Alakangas y Öhlander, 2006).

## 2.5 Características de los jales mineros

El comportamiento de los jales mineros se determina de acuerdo con sus propiedades y naturaleza del depósito. A continuación, se mencionan algunas características físicas presentes en jales mineros con relevancia para la investigación.

### 2.5.1 Granulometría

Una de las principales características en los residuos mineros es el tamaño de las partículas sólidas, debido a que es un factor importante al momento considerar su valorización en procesos químicos como la lixiviación. La granulometría (Cuadro 4) está condicionada por procesos mineralógicos utilizados para la concentración o extracción de minerales. En este sentido, el análisis granulométrico determina la calidad de los jales mineros y es punto de partida para destinarlos a un aprovechamiento específico.

**Cuadro 4.** Granulometría en jales mineros

Granulometría	% de paso	Calidad
Gruesos	0-15% menor de 75 $\mu$ m	Bueno
Medios	15-50% menor de 75 $\mu$ m	Generalmente bueno
Finos	50-80% menor de 75 $\mu$ m	Cuestionable
Limos	100% menor de 75 $\mu$ m y 25% menor de 200 $\mu$ m	Almacenado por presas convencionales

Recuperada de: Rojas y Ventura (2017)

### *2.5.2 Mineralogía*

Los minerales son sólidos homogéneos generados por procesos naturales e inorgánicos de formación química determinada y distribución atómica ordenada. No pueden ser divididos en sus componentes individuales por métodos físicos y se excluyen de aquellas sustancias sintetizadas en el laboratorio y minerales desarrollados mediante proceso orgánicos, como las conchas o el carbón y el petróleo ya que son continuamente considerados como combustibles minerales (Chávez, 2022).

Actualmente la mayoría de las actividades económicas primarias y secundarias dependen de recursos como los metales, metaloides y otras sustancias recuperadas en distintos tipos de minerales que son procesados o explotados en operaciones minero-metalúrgica. El Cuadro 5 sugiere algunas de las esenciales fuentes minerales de metales y metaloides.

**Cuadro 5. Fuentes minerales de metales y metaloides**

<b>Elemento químico</b>	<b>Fuente mineral</b>	<b>Uso</b>
Aluminio	Gibbsita, Böhmita, Bauxita	Transporte, empaquetado
Antimonio	Estibinita	Recubrimiento de baterías, químico retardante de fuego
Arsénico	Arsenopirita, Oropimento, Rejalgar	Preservante de madera, pesticidas, farmacéutica
Berilio	Berilo	Aleaciones de Be-Cu (telecomunicaciones)
Bismuto	Bismutinita	Farmacéutica
Cadmio	Esferita	Baterías
Cobalto	Laterita, Linnaeita	Aleaciones con hierro
Cobre	Calcopirita, Bornita	Tuberías, farmacéuticos, pigmentos
Cromo	Cromita	Acero inoxidable
Elementos de tierras raras	Bastnäsita	Catalizadores químicos, catalizadores de automóviles, vidrio, cerámica
Estaño	Casiterita	Recubrimiento de latas y contenedores; soldaduras
Estroncio	Celestina	Televisión, cerámica
Galio	Esfalerita	Aparatos electrónicos
Germanio	Esfalerita	Sistemas de fibra óptica
Niobio	Pirocloro	Aleaciones con acero, superaleaciones
Hierro	Hematita, Goethita, Magnetita	Hierro y acero
Indio	Esfalerita	Electrónicos, pantallas LCD
Itrio	Bastnäsita	Fósforo
Magnesio	Magnesita	Aleaciones de Al, fundiciones
Manganeso	Pirolusita, Braunita	Aleaciones con acero
Mercurio	Cinabrio	Electrólisis, baterías
Molibdeno	Molibdenita	Aleaciones con hierro y acero
Plata	Argentita, Polibasita	Joyería, componentes electrónicos
Plomo	Galena	Baterías, tuberías, soldaduras
Níquel	Laterita, Pentlandita	Acero y aleaciones no ferrosos
Renio	Molibdenita	Catalizadores, superaleaciones
Silicio	Cuarzo	Aditivo de acero
Talio	Productos de depósitos de sulfuros de Zn, Pb, Cu	Materiales semiconductores, electrónicos
Tantalio	Columbita, Tantalita	Componentes electrónicos
Titanio	Ilmenita	Pigmentos
Torio	Monzanita	Aplicaciones refractarias
Tungsteno	Scheelita, Ferberita	Carburos de tungsteno
Vanadio	Magnetita	Aditivo para acero
Zinc	Esferita	Recubrimientos, medicina, tuberías, pinturas
Zircón	Zircon	Revestimientos refractarios y ladrillos

Recuperado de: Salas (2014)

De acuerdo con Jambor (1994) la mineralogía de los jales se describe en minerales primarios que no cambian incluso después de ser finamente molidos y depositados en pilas de jales; minerales secundarios formados por meteorización y minerales terciarios generalmente precipitados de sal debido a la evaporación del agua intersticial o poro, durante la extracción material de los jales para fines diferentes. Los compuestos liberados por la oxidación y dilución de minerales primarios pueden incorporarse a minerales secundarios por precipitación, absorción e intercambio iónico, o pueden trasladarse de los depósitos de jales en forma de solución y afectar aguas superficiales o subterráneas (Salas ,2014).

#### *2.5.4 Drenaje ácido de mina*

El drenaje ácido de mina es el resultado de la actividad minera por la explotación de yacimientos para obtener minerales de interés comercial que modifica composición natural de los minerales en el entorno. Este fenómeno se origina por las reacciones de minerales sulfurados y factores abióticos (esencialmente agua y oxígeno), lo que conllevan a la oxidación de los minerales sulfurados y la subsecuente lixiviación de elementos como metales o sulfatos presentes en las rocas de contacto. Este suceso ocurre naturalmente, sin embargo, en trabajos mineros donde los jales quedan a la intemperie, se aceleran y potencializan los procesos de oxidación.

Así, por ejemplo, cuando las aguas de lluvia que oxidan los minerales tipo sulfuro presentes en los jales son transformadas en el proceso y se enriquecen en azufre y metales, estas se descargan e interactúan en suelos y se movilizan a cuerpos de agua superficiales o subterráneos. No obstante, al reaccionar con altas concentraciones de fases alcalinas como carbonatos y silicatos presentes en jales, incrementan el pH del agua aminorando la disolución de metales.

Sin embargo, en aguas con elevadas concentraciones de pH, elementos como el selenio y arsénico consiguen estar presentes (Blowes et al., 1991; Moncur et al., 2005; Graupner et al., 2007). La generación de drenaje ácido se representa a partir de la oxidación de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) debido a que es uno de los minerales sulfurados con mayor abundancia y genera mayor acidez con la interacción de componentes ambientales. Otros sulfuros que actúan a menor escala son la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y galena ( $\text{PbS}$ ). El proceso de oxidación continua hasta que uno de los reactantes participantes se agote (Lira y Ignacia, 2021).

#### *2.5.5 Elementos potencialmente tóxicos*

Son aquellos elementos esenciales y no esenciales de importancia ambiental y/o toxicológica que provocan consecuencias tóxicas. La generación de drenaje ácido conlleva a la liberación de

elementos como el Zn, Cd, Hg, As, Pb entre otros. La emisión de estos elementos se asocia al aprovechamiento de depósitos minerales sulfurados que genera jales sometidos al intemperismo los cuales al oxidarse provocan la disminución del pH y el incremento de aniones ( $SO_4^{-2}$  y  $CO_3^{-2}$ ). La toxicidad de los EPT's depende de factores como las propiedades químicas del elemento, la química ambiental (composición del suelo y movilidad de las formas disueltas) y susceptibilidad de los organismos expuestos a variables fisicoquímicas específicas como el potencial de óxido-reducción y pH. La contaminación por EPT's depende de las propiedades geoquímicas y el grado de la mineralización de los jales. Cuando estos elementos ingresan al medio ambiente provocan el deterioro del agua y del suelo.

En temporadas de lluvias, aumenta la movilidad de los EPT's, permaneciendo biodisponibles para los microorganismos, por medio de mecanismos metabólicos, favoreciendo su incorporación a las cadenas tróficas. Su efecto sobre los organismos se debe al reemplazo de elementos centrales de una biomolécula, que bloquean su sitio activo, des coordinando o precipitando a los ligantes, lo que modifican el funcionamiento normal (Becerra, 2014; Chávez, 2022).

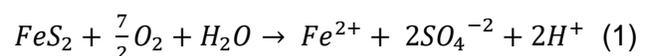
## 2.6 Reacciones en la generación de acidez

La generación de drenaje ácido y su consumo (neutralización) son la consecuencia de reacciones relacionadas (Aduvire, 2006). Donde los principales componentes involucrados son:

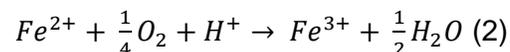
- Minerales tipo sulfuro
- Agua o humedad atmosférica.
- Bacterias
- Temperatura
- Oxígeno

Las reacciones químicas que producen drenaje ácido se representan a partir de la oxidación de minerales constituidos por sulfuros como la pirita ( $FeS_2$ ), uno de los minerales comúnmente encontrado en menas de interés comercial. Nordstrom y Alpers, 1999 y Cevallos, 2012 explican las reacciones involucradas en la generación de drenaje ácido a partir de la oxidación de pirita ( $FeS_2$ ).

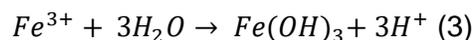
La reacción 1 representa la oxidación de la pirita por la interacción del oxígeno y la humedad, produciendo compuestos disueltos que representan un incremento en el total de sólidos disueltos y acidez del agua asociado con la disminución del pH.



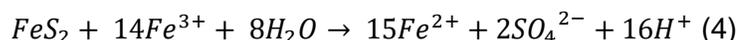
Si el medio circundante es suficientemente oxidante, los iones ferrosos se oxidarán a iones férricos como lo representa la reacción 2.



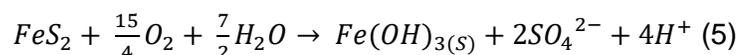
Si el pH establecido en el lugar de depósito se encuentra entre 2.3 a 3.5 el ion férrico producido en la reacción 2, por hidrólisis precipita como hidróxido Fe (OH)<sub>3</sub> (sólidos de color amarillo, naranja o rojo), lo que provoca un descenso del pH como lo sugiere la reacción 3. A valores de pH entre 3.5 a 4.5 el ion férrico es catalizado por la bacteria Metallogenium y a pH por debajo de 3.5 la reacción es catalizada por la bacteria Thiobacillus ferrooxidans.



Los cationes férricos que no precipitan en la solución pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar nuevamente iones ferrosos, sulfato e hidrógeno como se representa en la reacción 4.



Por lo tanto, la generación ácida por la oxidación de la pirita es representada de manera global por la reacción 5



A diferencia de los minerales sulfurosos generadores de acidez también existen minerales consumidores de acidez los cuales neutralizan a través del consumo de protones como se representa en la reacción 6 donde Me\* representa un catión divalente como Ca<sup>2+</sup> o Mg<sup>2+</sup>, siendo los carbonatos importantes atenuadores de acidez.



Entre los principales minerales atenuadores de acidez son la calcita, la dolomita, silicatos y arcillas, cada uno con diferentes capacidades de neutralización (Lira y Ignacia, 2021).

## **2.7 Técnicas predicción de drenaje ácido**

Las técnicas de predicción de DAM se dividen métodos de laboratorio y campo. Para fines de la investigación solo se consideran técnicas de predicción de laboratorio. Las técnicas de laboratorio incluyen las pruebas estáticas y cinéticas, ensayos que pueden utilizarse en conjunto o por separado. Así mismo son responsables de determinar el equilibrio de minerales productores y atenuadores de DAM para estimar su ocurrencia. Sin embargo, al ser una estimación los resultados no son específicos con relación a la producción de DAM, por otra parte, las técnicas de campo son responsables de proporcionar valores precisos.

- a) Ensayos estáticos: son técnicas que evalúan la reactividad y propiedades de los materiales. Determinan la capacidad de generación de acidez y estiman el potencial de lixiviados.
- b) Ensayos cinéticos: simulan las reacciones naturales de oxidación ajustándose a las existentes en terreno como, la inoculación con bacterias, la estimación de la temperatura durante la prueba, el incremento de la alcalinidad adicionando ( $Ca(OH)_2$ ), la presión de oxígeno por medio de la aireación o la humedad de los ciclos de aireación, etc. Sin embargo, para llevar a cabo de dichas pruebas se requiere grandes volúmenes de muestra y tiempos de implementación más prolongados (Lira y Ignacia, 2021).

### *2.7.1 Ensayos estáticos*

Son pruebas generalmente utilizadas para predecir la tasa de generación de drenaje ácido de residuos mineros y la calidad de lixiviados generados. A partir de dicha información, es posible determinar los métodos más adecuados para la gestión ambiental de los residuos mineros o evaluar el efecto de los impactos ambientales que generan. Inicialmente el primer paso es medir el pH, para estimar si anteriormente se ha generado drenaje ácido, también se incluyen análisis elementales y mineralógicos para estimar la probabilidad de liberación de elementos potencialmente tóxicos (Zamora y Benzaazoua, 2003; Carrión y Alexander, 2020).

Las pruebas estáticas generalmente involucran:

- Contenido de elementos traza
- Balance ácido-base
- pH de la muestra
- Mineralogía y otras propiedades geológicas

### 2.7.2 Balance Ácido-Base

La relación ácido-base es un procedimiento para evaluar capacidad de generación de drenaje ácido, no obstante, para obtener resultados precisos en la evaluación, los resultados obtenidos deben correlacionarse con otras variables como: el pH, la mineralogía o los elementos presentes entre otros. Haciendo referencia a la 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 post operación de presas de jales. La capacidad para producir drenaje ácido depende del equilibrio entre los minerales generadores de ácido (sulfuros) y los minerales neutralizadores (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos), existen diversos procedimientos para medir esta relación.

El método más utilizado para estimar la generación de DAM es la “Prueba Modificada de Balance ácido-base” (Lawrence y Wang, 1997). En este sentido, la generación de ácido a través de la oxidación de sulfuros se conoce como potencial ácido (PA), mientras que la cantidad de ácido que puede ser neutralizada por los atenuadores se comprende como potencial de neutralización (PN).

La determinación de PN implica la reacción de neutralización con ácido clorhídrico reacción 7, mientras que la estimación de PA se puede aproximar a partir de la ecuación 1 que considera el azufre total (en forma de ion sulfuro) y el azufre en forma de sulfato, o mediante estequiometría de la reacción 8 donde, 1 ton de jales que contiene 10 kg de S (1%) requiere 31.25 kg de CaCO<sub>3</sub> para no producir acidez conociendo el contenido de pirita.



$$PA = \%S_{Total} - \%S_{Sulfatos} \quad (\text{ecuación 1})$$



La relación entre los valores de PA y PN, ambos expresados en kg de carbonato de calcio por tonelada de jales, permite evaluar si los jales contienen suficientes carbonatos de calcio para neutralizar a los sulfuros:

- Cuando PN/PA < 1.2; los jales son potenciales generadores de drenaje ácido

- Cuando PN/PA > 1.2; los jales no son potenciales generadores de drenaje ácido

## 2.8 Impactos negativos hacia el medio ambiente por parte de los Jales mineros

Los impactos (Cuadro 6) por jales mineros se atribuyen a la mala gestión (confinamiento, recolección, transporte y tratamiento nulos o deficientes) y la toxicidad de sus componentes que agravan su peligrosidad. La mala gestión de los jales mineros induce la presencia de elementos, minerales y metaloides en zonas cercanas a su disposición, originando consecuencias negativas en la calidad de suelos, aguas superficiales, subterráneas y aire, que afectan al ecosistema y a la salud de poblaciones humanas, además de efectos en las actividades económicas y productivas tales como la agricultura o la piscicultura (Rojas y Ventura, 2017; Menéndez y Muñoz, 2021).

**Cuadro 5.** Impactos ambientales derivados de los jales y residuos mineros.

Impactos ambientales derivados de los jales y residuos mineros	
Atmósfera	-Partículas de materia derivadas de la explotación superficial y el transporte.
Cuerpos de agua	-Desagüe de desechos de minas -Filtración a capa freática por lixiviación -Residuos de procesamiento descargados directamente en cuerpos de agua.
Suelos	-Descarga de desechos de minas y residuos de procesamiento -Trastorno de la agricultura, la silvicultura y la recreación por minas a cielo abierto -Inestabilidad física de los depósitos, agravada por riesgo sísmico -Deforestación.

Recuperado de: Rojas y Ventura (2017)

## 2.8 Usos alternativos de los jales mineros

La industria minera genera elevadas cantidades de desechos y su gestión representa un desafío socioeconómico y ambiental. En este sentido, es de importancia la concordancia en el desempeño de las actividades mineras y la gestión de los residuos a favor de minimizar su generación y fomentar su valorización. Entre los usos alternativos que otorgan un valor a los jales mineros se encuentra el aprovechamiento como agregados para la elaboración de morteros en la industria de la construcción. Sin embargo, es necesario un tratamiento previo a su utilización. Los mencionados a continuación resultan ser viables en términos de costo y en ciertos casos son

indispensables para prevenir la disposición de estos desechos mineros con un alto potencial de contaminación.

### *2.8.1 Encapsulamiento:*

La encapsulación es un proceso que inmoviliza e insolubiliza a los metales pesados . Esto resulta mediante reacciones químicas entre los elementos en el interior de los jales mineros. Los procedimientos más usuales en la solidificación comprenden aglomerantes o cemento.

### *2.8.2 Microencapsulación:*

La microencapsulación o pasivación radica en establecer un revestimiento (capa) inertes, este método se definen diferentes tipos para la microencapsulación de los residuos mineros:

#### 1. Microencapsulación con Sílice ( $\text{SiO}_2$ ):

Es un proceso de tratamiento para metales pesados y contaminantes orgánicos, consiste en la reacción de una solución de sílice soluble, un buffer y un oxidante como el  $\text{H}_2\text{O}_2$  en bajas concentraciones con los oxi-hidróxidos de hierro produciendo, una capa de hidróxido de hierro, seguido de una capa de sílice que la absorbe y polimeriza formando la capa externa de este revestimiento. Convirtiendo a los metales pesados presentes en jales mineros una forma inerte particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo

#### 2. Micro cristalización con cemento:

Este tratamiento genera condiciones estables para los metales pesados, utilizando la micro cristalización de cemento, caracterizado por la presencia de silicato di cálcico y tri cálcico, esta composición es capaz de micro cristalizar los metales pesados presentes en los jales mineros. Debido a la presencia de silicio ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) en los jales, el proceso de microcristalización es más eficiente, pues luego de ingresar a esta nueva estructura cristalina, se forman silicatos y carbonatos en forma de arcilla, que con el tiempo favorecen la consistencia de los ladrillos.

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1 Lugar de estudio

El municipio de sombreroete con altitud de 2,351 m.s.n.m. se localiza al noroeste del estado de Zacatecas, en el centro del altiplano mexicano con coordenadas 23°38'00" Longitud Norte 103°38'00" Longitud Oeste. Su clima es templado a seco con una temperatura media anual de 16° C.



**Figura 1.** Localización del municipio de Sombreroete, Zacatecas.

### 3.2 Antecedentes

Medel *et al.*, (2008) realizaron estudios en jales mineros históricos y en operación, de la región minera de Guanajuato con la finalidad de evaluar su peligrosidad en función del potencial de lixiviación, las muestras fueron caracterizadas química y mineralógicamente. Los resultados obtenidos fueron cantidades importantes de metales como Mn, Fe, Zn, Pb y Cr; y minerales como cuarzo, calcita, covelita, magnetita, fierro y zinc. Además, mediante pruebas de lixiviación por celdas húmedas se encontró bajo riesgo de lixiviación 0.4%.

Macías *et al.*, (2016) realizaron pruebas fisicoquímicas, mineralógicas y elementales en jales mineros, originarios del aprovechamiento de minerales polimetálicos y hierro, para la recuperación de elementos de valor comercial, a los que nombraron elementos estratégicos. Los resultados indicaron mayor cantidad de elementos como Fe, Zn, Pb y Cu (concentración >100 mg/kg), aumentando su concentración con la disminución del tamaño de partícula. Además, de elementos estratégicos como Ga, Y, La, Ce, Nd y Sc en concentraciones de 5 a 32 mg/kg y Au 2.1 mg/kg en una de las muestras en partículas menores a 250  $\mu\text{m}$ .

Salas *et al.*, (2020) evaluaron la generación de drenaje ácido y las características de jales mineros provenientes de la presa Boleo Estrella de la mina Cerro de Mercado en Durango México. Los valores obtenidos de pH fueron alcalinos y se encontraron mínimas concentraciones de azufre y sulfatos; además de metales y metaloides considerados potencialmente tóxicos como As y Ba en valores inferiores a los límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-157 SEMARNAT-2009, sin embargo, el 77.8% y 33.3% de Cr y Sb encontrados rebasaron los límites máximos permisibles. Los resultados en relación potencial de neutralización y potencial de acidez fueron mayores a 1.2, lo que indicó la imposibilidad de generar drenaje ácido.

Salas *et al.*, (2020) estudiaron los jales mineros provenientes de la mina La Prieta en Chihuahua México, con el objetivo de predecir la generación de drenaje ácido y conocer las características mineralógicas. Con los resultados obtenidos concluyeron que solo tres muestras fueron potencialmente generadoras de drenaje ácido, los metaloides y metales presentes fueron As, Ca y Pb, dentro de los límites permisibles y; Ba y Sb, rebasaron de los límites permisibles establecidos por la norma mexicana, sin embargo, determinaron poco probable que se lixivien por las condiciones existentes del sitio de estudio y la naturaleza de la roca.

### **3.3 Frontera de conocimiento**

La necesidad de generar materiales sostenibles con bajo costo de producción y que cumplan con las normas de calidad, son temas de relevancia en la industria de la construcción. La incorporación de residuos mineros como agregados de construcción que garantice las propiedades mecánicas que concretos convencionales favorecerá a la mitigación de la contaminación por jales mineros (Yee, 2018).

Romero y Flores, 2014 utilizaron jales mineros como incorporados de construcción para la elaboración de baldosas, la muestra de relave analizada para la investigación reportó tamaños de partículas finas y gruesas que oscilaban entre los 74-100  $\mu\text{m}$ , alto contenido en metales como Cd, Pb, Zn, Fe, Cu, AS y minerales sulfurados como la galena, esfalerita y pirita; además de minerales con alto contenido en sílice y silicatos como muscovita y cuarzo que facilitaban la inmovilización de metales. Para la utilización de los jales mineros como agregados de construcción se estabilizó el contenido polimetálico presente en el relave mediante micro cristalización, a partir de cemento andino con silicatos di y tricálcicos.

Kuranchie et al., 2015 utilizaron relaves mineros con tamaño de partículas que variaban entre finas ( $<75 \mu\text{m}$ ) y gruesas ( $\leq 32\text{mm}$ ) como agregados de concreto en relación 0.5 agua-cemento, los concretos fueron curados 1,2,3,4 y 28 días, obteniendo mejor resistencia mecánica y a la comprensión del 11.56% con respecto a concretos convencionales.

## 4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 4.1 Planteamiento del problema

En México la minería se considera una de las principales actividades económica para el país, sin embargo, está ligada a la producción de grandes volúmenes de residuos, que acrecientan la contaminación ambiental (Salas et al., 2020). Se estima que la industria minera, genera alrededor de 1500 a 2000 millones de toneladas de residuos de los cuales 200000 toneladas se generan en el Estado de Zacatecas (Manzanares et al., 2005). Estos residuos corresponden a procesos de amalgamamiento para la recuperación de oro y plata y se denominan jales mineros los cuales se distinguen por sus concentraciones de metales tóxicos, además de sílice, carbonatos, sulfatos y sulfuros de hierro, cobre, plomo y zinc. Uno de los principales problemas asociados a los jales mineros es la generación de drenaje ácido de mina (DAM) debido a la oxidación de los minerales por el intemperismo y la acción catalizadora de bacterias (Arismendy, 2020).

El problema se incrementa debido a que el ácido que se genera puede dar lugar a la disolución de otras fases mineralógicas que contienen EPT's (Salas.,2014). Provocando impactos ambientales a corto y largo plazo al propiciar alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelo y agua. Además, en la matriz agua, los metales disueltos se convierte en una fuente difusa difícil de controlar, y afecta grandes volúmenes de agua, que se dispersan por infiltración, lluvia o corrientes superficiales y consecutivamente se deposita en los cuerpos de agua cercanos. La presencia del DAM en medios acuáticos conlleva a concentraciones elevadas de hierro y de metales como Pb, Cu, Zn, Fe, Al, Mn, Hg Cd y Ni, además de generar un desequilibrio en el pH (Aduvire,2006; Forigua et al., 2017), lo que promueve el deterioro de la calidad del agua, la destrucción de la vida acuática y el desequilibrio del ecosistema.

En este sentido es de interés evaluar la capacidad de producir drenaje ácido en los jales mineros con el fin de adoptar practicas preventivas, ya que el DAM, provocan impactos ambientales y riesgos a la salud; así mismo proponer alternativas ambientales que permitan valorizar este residuo.

## 4.2 Preguntas de investigación

- ¿Qué potencial de generación de drenaje ácido poseen los jales mineros provenientes de la región noroeste Estado de Zacatecas?
- ¿Qué aplicaciones se le puede otorgar a los jales mineros provenientes de la región noroeste estado de Zacatecas?

## 4.3 Justificación

La actividad minera desarrollada en la región norte del país produce tres cuartas partes de la productividad minera nacional, que a su vez generó millones de toneladas de jales por año (Armendáriz, 2022). Este tipo de residuos provenientes de las actividades minero-metalúrgicas se caracterizan por concentraciones altas de elementos potencialmente tóxicos, los cuales en condiciones de drenaje ácido pueden disolverse y de esta manera incorporarse al medio biótico, provocando contaminación ambiental. Por tal motivo, es necesario determinar el potencial de los jales en la generación de drenaje ácido, para actuar y prevenir la contaminación ambiental, principalmente de los recursos hídricos cercanos a los sitios de depósito de este tipo de materiales.

Por lo antes mencionado, en la presente investigación se estudia el potencial de generación de drenaje ácido a partir del balance ácido-base y las propiedades fisicoquímicas (granulometría, contenido metálico, mineralogía) de una muestra de jal minero proveniente de la región noroeste del estado de Zacatecas. Además, establecer acciones en la prevención de este efluente, así como proponer procesos alternativos que reduzcan el impacto ambiental de los jales mineros y otorguen valor agregado a este tipo de residuos mediante alternativas enfocadas a la industria de la construcción.

## **5. HIPÓTESIS**

### **5.1 General**

Los jales mineros con elementos potencialmente tóxicos provenientes de la región noroeste del estado de Zacatecas poseen un alto potencial para generar drenaje ácido de mina y, por lo tanto, representan un riesgo ambiental en la disolución de elementos potencialmente tóxicos.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 General**

Evaluar el balance ácido-base en los jales mineros provenientes de la región noroeste del estado de Zacatecas para conocer su capacidad en la generación de drenaje ácido y establecer el riesgo de disolución de elementos potencialmente tóxicos

### **6.2 Particulares**

1. Determinar el balance ácido-base mediante el potencial de acidez (PA) y de neutralización (PN)
2. Determinar las propiedades fisicoquímicas en los jales mineros
3. Definir el impacto ambiental de los jales mineros y proponer procesos alternativos para mitigar impactos al medio ambiente

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Preparación de muestra

La muestra de jal minero fue recolectada en la zona noroeste del estado de Zacatecas a través de un muestreo manual cono y cuarteo, obteniéndose de esta manera una muestra representativa de aproximadamente 12 kg

### 7.2 Balance Ácido-Base

Estos análisis se llevaron a cabo mediante la prueba modificada de balance ácido-base que establece la NOM-141-SEMARNAT-2003.

#### 7.2.1 Potencial de neutralización (PN)

Para determinar PN 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 y registrando el grado de efervescencia como nulo, bajo, moderado o fuerte.

Después se coloraron 2 gramos de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml y se agregaron 90 ml de agua desionizada bajo agitación magnética constante de 400 rpm. Posteriormente al matraz se le adicionaron los volúmenes de HCl 1N en los tiempos que se indican el Cuadro 7.

**Cuadro 6.** Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN

Grado de reacción (neutralización carbonatos)	HCl solución 1.0 N (ml)	
	Tiempo 0	Tiempo 2 horas
Nulo	1	1
Bajo	2	1
Moderado	2	2
Fuerte	3	2

Recuperado de: NOM-141-SEMARNAT-2003.

Después de 22 horas el pH se ajustó alrededor 2-2.5 y la agitación se mantuvo durante dos horas más, se adiciona agua destilada al matraz hasta un volumen final aproximado de 125 ml y se titula con una solución de NaOH de 0.1 N, hasta un pH final de 8.3. El valor de PN se determinó a partir de los moles de HCl consumidos en el experimento y la estequiometría correspondiente a la reacción 7.

### *7.2.2 Potencial de acidez (PA)*

Se tomaron 0.4 gramos de jal minero molido con tamaño de partícula menor a 38 $\mu$ m, a 0.2 gramos se les adicionaron agua regia y 0.2 gramos se le adicionaron únicamente HCl concentrado. Los licores de estas digestiones se analizaron por AAS. La diferencia entre las lecturas de concentración para hierro se consideró hierro proveniente de la pirita. Como prueba comparativa se realizó el mismo procedimiento utilizando la misma cantidad de masa para un concentrado mineral con aproximadamente 33% de hierro en forma de pirita y 65% de hierro como calcopirita. El potencial de ácido se determinó a partir del contenido total de calcopirita y la estequiometría de la reacción 8

## **7.3 Propiedades fisicoquímicas**

### *7.3.1 pH y conductividad eléctrica*

En un vaso de precipitado de 500 mL se agregaron 30g de muestra de jal minero con agua desionizada hasta obtener una densidad de pulpa de 100g/L. Posteriormente se mantuvo en agitación a 400 rpm durante 10 min, finalmente se filtró y se tomó lecturas de pH y conductividad eléctrica mediante el equipo Orion ® Star A215 Benchtop pH/conductivity meter previamente calibrado.

### *7.3.2 Granulometría y Contenido metálico*

Para determinar el contenido metálico el total de la muestra se separó por tamaño de partícula usando tamices, de las fracciones obtenidas se tomaron aproximadamente 0.2 gramos y se le adiciono agua regia (75% HCl y 25% HNO<sub>3</sub>). Los licores obtenidos se analizaron mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, Varian SpectrAA220fs). En conjunto con Fluorescencia de rayos x mediante el equipo portátil Olympus Delta XRF Analyzer utilizando el modo Geochem, aproximadamente 100 gramos de muestra de jal minero molida en un mortero ágata hasta obtener un tamaño de partícula menor a 38 $\mu$ m (malla 400).

### *7.3.3 Mineralogía*

Para la determinación de las fases mineralógicas se realizaron análisis por difracción de rayos x (DRX) y por microscopia electrónica de barrido (MEB).

Para el análisis por DRX se utilizó 5 gramos de muestra de jal minero molido previamente en el análisis por FRX, se compactó firmemente en una porta muestra de acrílico. El análisis se llevó a cabo en un difractómetro D8 Advance en el intervalo de 4°-90° para el ángulo 2 $\theta$ , a una velocidad

de 8°/min. La identificación de las fases mineralógicas se llevó a cabo en el software Diffrac. Eva 5.0. El análisis por MEB se llevó a cabo en un Microscopio electrónico XL30 Phillips acoplado a un sistema de microanálisis con Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) haciendo uso de los electrones retro dispersos. Las condiciones del análisis fueron 20kV, SS50 y WD 10mm.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 8.1 Relación Ácido-Base

El cuadro 8 muestra el balance ácido-base para la muestra de jales mineros provenientes del noroeste del Estado de Zacatecas. De acuerdo con dicho balance, la relación de  $PN/PA=0.24$ , sugiere la generación de drenaje ácido y como consecuencia un alto riesgo de disolución de EPT's. No obstante, es importante mencionar que este resultado no puede considerarse absoluto como para evaluar el potencial de generación de DAM. En ese sentido, más adelante se presentarán micrografías de MEB donde se observa la abundancia de pirita, así como la ganga (silicatos y sílice).

**Cuadro 7.** Valores de PN y PA correspondiente a la muestra de jal minero

Parámetro	Valor
PN ( <i>g CaCO<sub>3</sub>/kg</i> )	14.75±0.68
PA ( <i>g CaCO<sub>3</sub>/kg</i> )	61.5
PN/PA	0.24

### 8.2 Propiedades fisicoquímicas

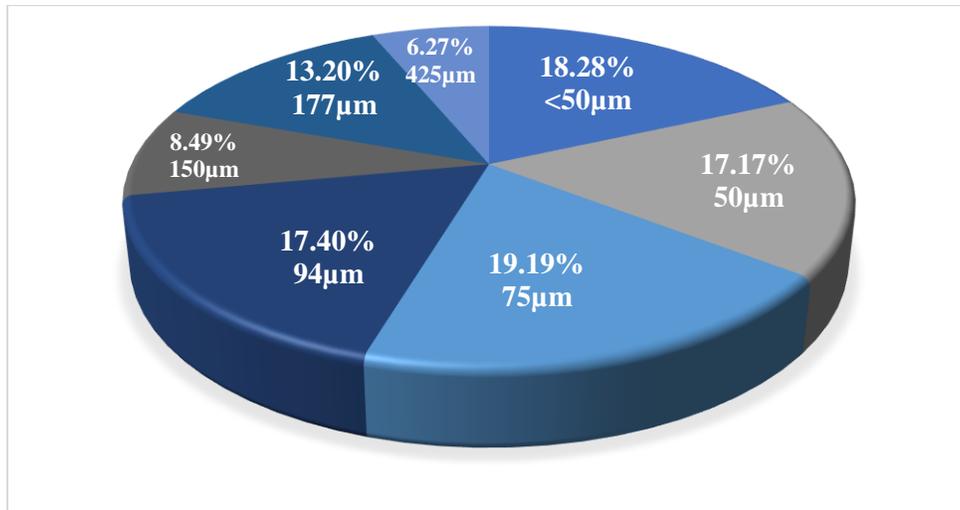
#### 8.2.1 pH y conductividad eléctrica

La muestra de jales mineros tuvo un valor de  $pH=7.26$  (ligeramente alcalino), el cual está de acuerdo con el bajo valor de potencial de neutralización ( $PN = 14.75 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$ ). Además, un valor de conductividad eléctrica ( $463 \mu\text{S/cm}$ ) que sugiere una concentración casi nula de sales solubles. Por lo tanto, de acuerdo con los valores de  $pH$  y la conductividad eléctrica, la muestra de relaves mineros se clasifica como neutra y sin efectos de solución salina (NOM-021-SEMARNAT-2000).

#### 8.2.2 Granulometría

La Figura 2 muestra la granulometría correspondiente a los jales mineros analizados en la presente investigación. Tal y como se puede observar, el 64.55% de la muestra contiene partículas gruesas que varían desde 75 a 425  $\mu\text{m}$ , el 35.53% de la muestra contiene partículas finas con tamaño  $<75 \mu\text{m}$ , mientras que el 18.28% son partículas con tamaño de partículas  $<50 \mu\text{m}$ . Este resultado es interesante porque por un lado sugiere que el jal minero es un problema para la salud de los seres humanos debido alto contenido de partículas finas ( $>50 \mu\text{m}$ ), mismas que se pueden desplazar con facilidad a través del viento e ingresar al sistema respiratorio y torrente sanguíneo. Con base en la granulometría (Figura 2) se estimaron los tamaños promedio

$P_{50} = 90 \mu\text{m}$  y  $P_{80} = 170 \mu\text{m}$ , correspondientes al paso del 50% y 80% de los jales mineros, respectivamente. Por lo antes mencionado, es posible sugerir que este residuo sólido se considere un material de valor agregado, como por ejemplo en la metalurgia extractiva para recuperar algunos metales preciosos (plata, oro) o base (cobre, plomo, zinc) presentes en concentraciones todavía importantes. O por su alto contenido de silicio, usarse como aditivo para la fabricación de morteros, en la industria de la construcción.



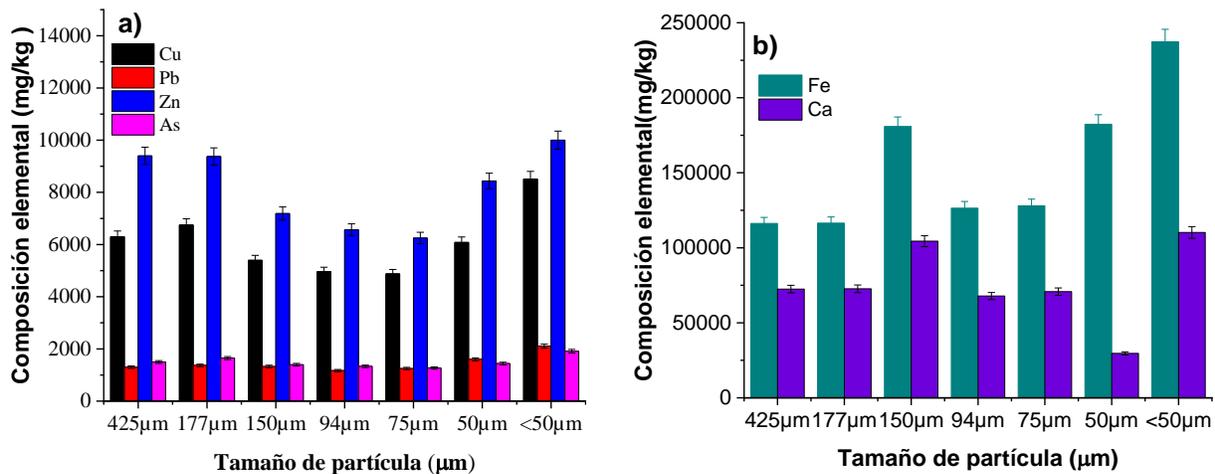
**Figura 2.** Granulometría correspondiente a la muestra de jale minero

### 8.2.3 Contenido metálico

La Figura 3 muestra el contenido de Cobre, Plomo, Zinc, Arsénico, Hierro y Calcio presentes en la muestra de jale mineros. Tal y como se puede observar, en este tipo de residuos es posible encontrar un alto contenido de metales altamente tóxicos como plomo (1400 mg/kg) y arsénico (1500 mg/kg), así como abundante hierro (20000 mg/kg). Es importante mencionar que las concentraciones de Cu, Pb, Zn, As y Fe superan los límites establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-1993, por lo tanto, es necesario que este tipo de residuos reciba una atención especial ya que la disolución de estos metales puede provocar la contaminación de cuerpos de agua y suelo, desde luego, para ello los jales mineros deben estar expuestos a condiciones químicas que faciliten su oxidación y disolución total; aunque, se debe tomar en cuenta que dicho proceso de oxidación únicamente requiere de humedad, oxígeno y microorganismo, los cuales facilitan inicialmente la oxidación de los sulfuros.

Por otro lado, los resultados de las Figuras 3a y 3b muestran que la muestra de jales mineros es altamente heterogénea, por lo que no hay una correlación directa entre el contenido metálico y el

tamaño de partícula. La distribución de la concentración total de metales (Figura 3a) muestra que el aproximadamente el 80% de Cu, Pb y Zn están distribuidos en partículas con tamaño menor a 177 $\mu$ m, lo cual abre un área de oportunidad de bajo costo para la industria minera en la recuperación de alguno de estos metales (Cu, Pb y Zn), debido a que el jale minero ya no necesita de una molienda. Además, los tamaños de partícula (74-100  $\mu$ m y 75  $\mu$ m- 32mm) son similares en tamaño de algunos materiales agregados en la fabricación de baldosas y ladrillos reportados por Romero y Flores, 2010; Kuranchie *et al.*, 2015), lo que abre un área de oportunidad para otorgar valor agregado a este tipo de residuos, en particular para a provechar el contenido de silicio.



**Figura 3.** Composición metálica del jale minero a diferentes tamaños de partícula. (a) Cu, Pb, Zn y As. (b) Fe y Ca.

La composición analítica mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, por sus siglas en inglés) y Fluorescencia de Rayos X (XRF, por sus siglas en inglés) muestra claramente la heterogeneidad en la composición metálica (Cuadro 9) para una muestra aleatoria de jale minero (Cuadro 9), pero al mismo tiempo demuestran el contenido importante de Cu, Pb y Zn, sugiriendo así que este residuo se puede valorar para recuperar uno de estos metales mediante un método hidrometalúrgico tal y como lo establece Ruiz-Sánchez *et al.*, (2023). También se confirma la existencia de aproximadamente 36200 mg/kg de Si, lo que abre la oportunidad a otras industrias tales como la construcción.

**Cuadro 8.** Contenido metálico en muestra aleatoria cuantificada por AAS y FRX.

Elemento	Contenido metálico mg/kg	
	AAS	XRF
Cu	6000	6332
Fe	210000	198500
Pb	1470	1350
Ca	75900	83000
Zn	8960	7415
As	1520	1425
Cd	74.5	---
Si	---	36200
Al	---	4600
Mn	---	1325
P	----	1000

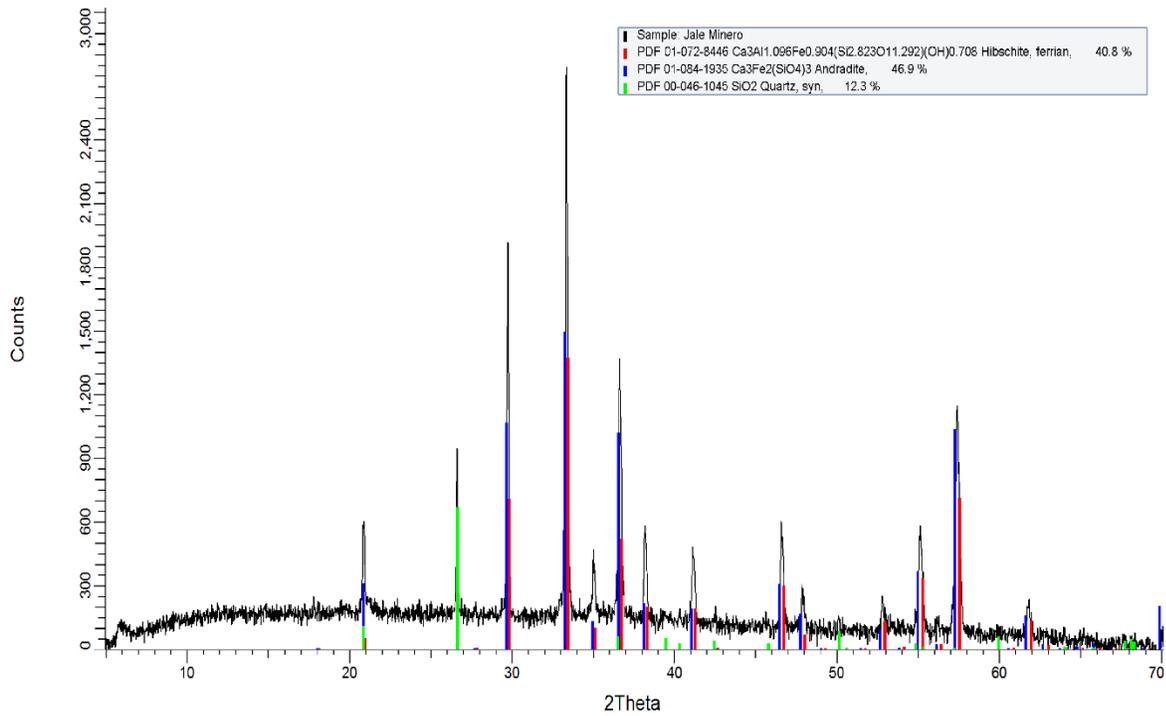
Generalmente en minerales el alto contenido de hierro está relacionado con la presencia de sulfuros como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAs}$ ), no obstante, en los jales mineros la mayoría de hierro está asociado principalmente por silicatos como andradita (ver sección 8.2.4) y únicamente el 1.8% (Cuadro 10) de este hierro en forma de pirita.

**Cuadro 9.** Contenido de pirita en jal minero.

	Contenido de hierro (%) a partir de:			
	Agua regia	HCl	Hierro de pirita	Contenido de pirita (%)
Jal minero	11.2	9.4	1.8	3.7
Muestra conocida (33% de $\text{FeS}_2$ )	24.4	9.2	15.2	32.5

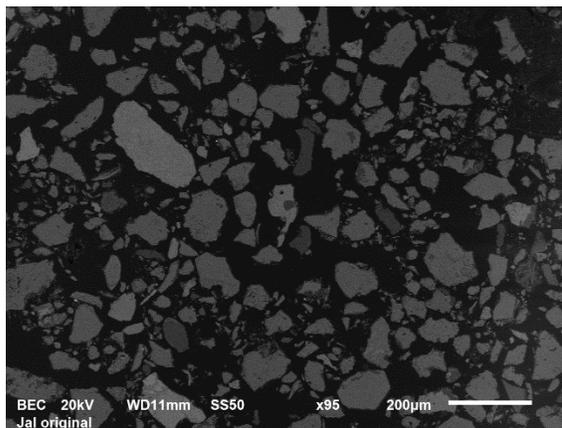
#### 8.2.4 Mineralogía

El análisis de los jales mineros mediante Difracción de Rayos X (Figura 4) muestra un alto contenido de Hierro, Calcio, Silicio, que se atribuyen a la presencia de fases minerales como la hirschildita ferriana, cuarzo y andradita. No se encontraron fases minerales que puedan atribuirse al contenido de Cobre, Plomo, Zinc, Arsénico, y Cadmio, lo que sugiere que se encuentran por debajo del 5%, límite de detección de la Difracción de Rayos X. La presencia de fases minerales con alto contenido de Calcio y Silicio, pudieran ser favorables para la estabilización de metales pesados por encapsulamiento, de acuerdo con lo reportado por Romero y Flores, 2010 quienes hallaron alto contenido de sílice cuyos valores oscilan entre 80-91%, así como presencia de silicatos hidratados, tal como la muscovita, en jales mineros utilizados como agregados de construcción en la elaboración de ladrillos y baldosas.

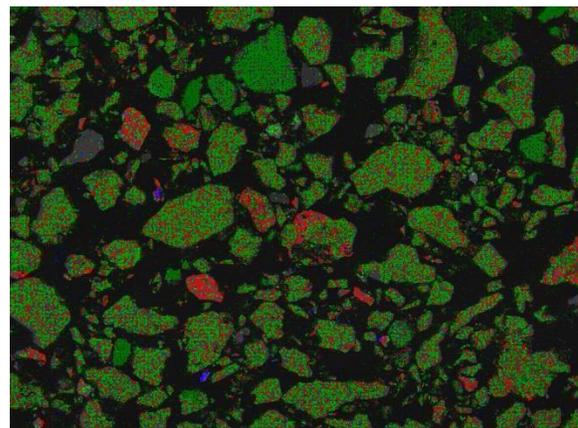


**Figura 4.** Difractograma correspondiente a la muestra de jal minero.

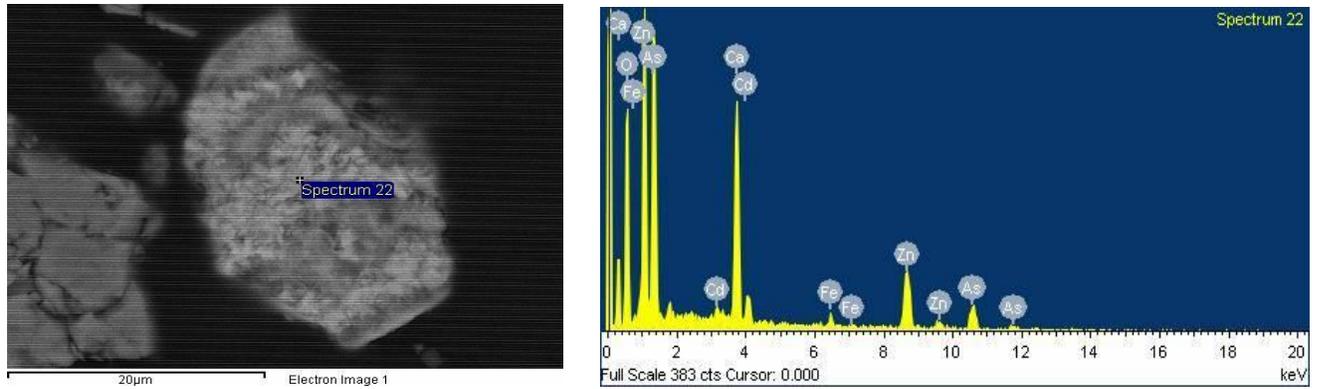
Las micrografías de MEB confirmaron la heterogeneidad en el tamaño de partícula (Figura 5a), y la abundancia de hierro (color rojo), silicio (color verde) y poca abundancia de azufre (color azul) Figura 5 b, lo que confirma el bajo contenido de pirita (3.7%) presentado en el Cuadro 10, así como la presencia de fases tipos silicatos que aportan Zn, Ca, Fe, As (Figura 4c, Spectrum 22). Además, la micrografía de la Figura 5c muestra que la pirita está ocluida en la abundancia de silicatos y sílice en el jal minero.



**(a)**



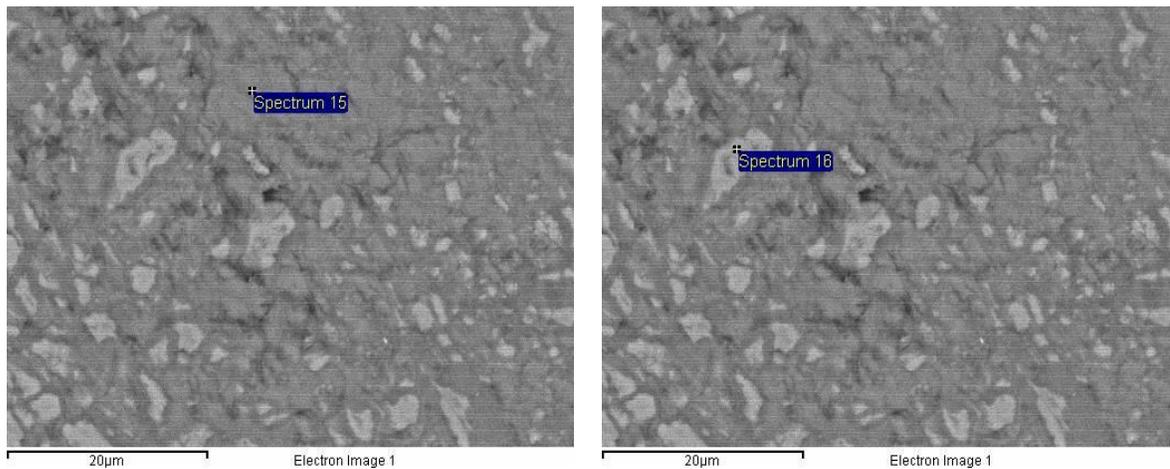
**(b)**

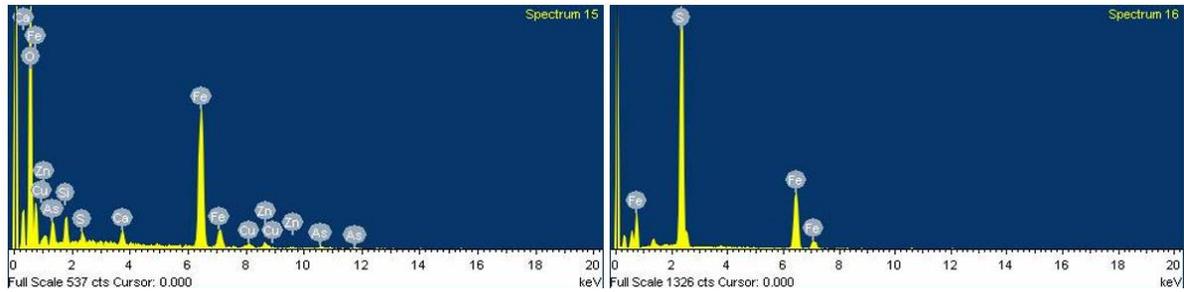


(C)

**Figura 5.** Micrografías de MEB para la muestra de jal minero. (a) Heterogeneidad en el tamaño de partícula. (b) Mapeo para la localización de hierro (color rojo), silicio (color verde) y azufre (color azul), y (c) fases complejas con pirita.

El análisis por MEB para las dos micrografías en la Figura 6 muestran que la pirita (Espectro 16) está ocluido en las abundantes fases de silicatos y cuarzo (Espectro 15), por lo que a pesar de que la relación NP/AP = 0.24 (Cuadro 6) sugiere la generación de drenaje ácido y como consecuencia, un alto riesgo de disolución de EPT's. Sin embargo, la cantidad casi insignificante de pirita libre implica que su oxidación ocurrirá lentamente porque los silicatos son atenuadores de ácidos y debido a la dificultad para que el oxígeno se difunda a través de ellos.





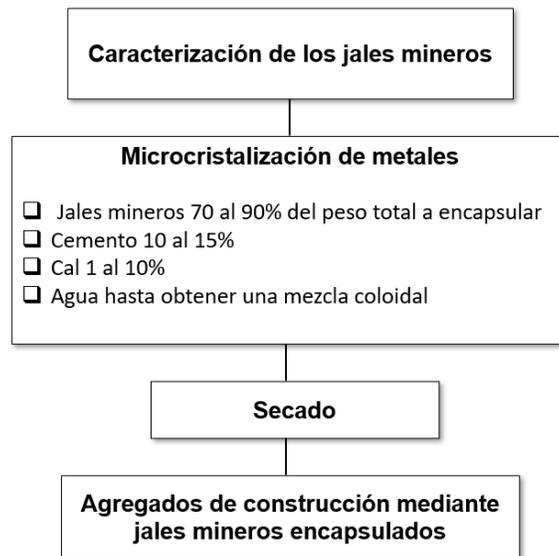
**Figura 6.** Micrografías de MEB correspondientes a la pirita contenida en la muestra de jales mineros. Amplíe el archivo para ver mejor los puntos azules en la imagen.

### 8.3 Propuesta para otorgar valor agregado a los jales mineros

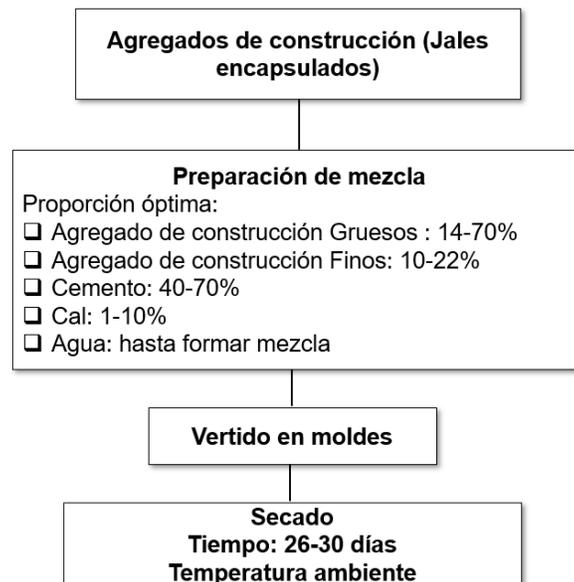
Los resultados obtenidos de granulometría, contenido metálico y mineralogía demostraron que los jales mineros de la zona noroeste del Estado de Zacatecas presentan condiciones óptimas para su valorización como agregados de construcción. Según Romero y Flores, 2010, antes del uso de los jales mineros como agregados de construcción es necesario encapsular el contenido metálico en una matriz para su inmovilización e insolubilidad.

Puesto que, los jales mineros del noroeste del Estado de Zacatecas reportaron la presencia de minerales con alto contenido Calcio y Silicio, además del 64.55% partículas gruesas (75-425  $\mu\text{m}$ ) y el 35.53% de partículas finas (<75  $\mu\text{m}$ ); y altas concentraciones de Cu, Pb, Zn, As y Fe que superaron los límites establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-1993.

Condiciones idóneas para la estabilización de metales través de la micro cristalización con cemento portland con contenido de silicatos di y tri cálcicos. De acuerdo con la metodología propuesta en la (Figura 7). Así mismo, una vez obtenidos los agregados de construcción a partir de jales mineros pudieren utilizarse para la elaboración de material de construcción como ladrillos o baldosas (Figura 8).



**Figura 7.** Proceso de obtención de los agregados de construcción.



**Figura 8.** Esquema para la elaboración de materiales de construcción a partir de agregados.

## 9. CONCLUSIONES

- La relación  $PN/PA=0.24$  indicó alto potencial generación de drenaje ácido, sin embargo, las micrografías de MEB revelaron que la pirita se encuentra ocluida en silicatos, lo que sugiere un bajo riesgo de disolución de EPT's.
- La caracterización del jal minero por MEB, así como la determinación de PN, PA, permiten un análisis más detallado sobre el potencial generador de drenaje ácido.
- Los jales mineros de la zona noroeste del Estado de Zacatecas presentan características granulométricas y mineralógicas favorables para ser aprovechados como agregados de construcción.
- La presencia de las fases minerales cuarzo y andradita que aportan la abundante cantidad Ca y Si, favorecen a la estabilización de metales pesados presentes en la matriz del jal minero, por medio de micro cristalización con cemento.
- Este estudio puede aplicarse hacia otros jales mineros (por ejemplo, jales del Estado de Hidalgo, México) con la finalidad de otorgarles un valor agregado para la industria de la construcción, así como en la metalurgia extractiva para metales base (Pb, Cu y Zn) y preciosos (Au, Ag).

## 10. RECOMENDACIONES

- En el caso de utilizar la metodología descrita para determinar el potencial de generación de drenaje ácido en muestras de jales mineros con valores  $PN/PA < 1.2$  y alto contenido de minerales sulfurados, complementar con pruebas cinéticas debido a que las características abióticas del lugar de depósito, tiene mayor influencia en el potencial generador de drenaje ácido y en el nivel de disolución de EPT's.
- Se propone la utilización del jal minero como agregado de construcción en la fabricación de materiales como ladrillos o baldosas y analizar sus propiedades físicas: densidad y absorción; y sus propiedades mecánicas mediante ensayos de resistencia a la compresión en comparación con materiales de construcción convencionales.
- Determinar las proporciones óptimas para la fabricación de materiales de construcción a partir de jales mineros como agregados de construcción en comparación con materiales de construcción convencionales.

## 11. ANEXO

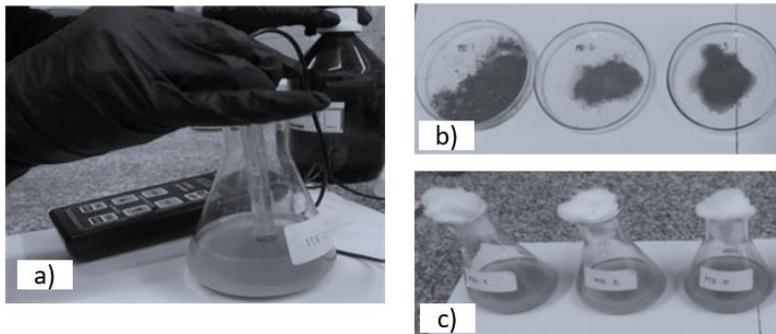
### Memoria fotográfica

#### 1. Muestra de jal minero de la zona noroeste del Estado de Zacatecas



**Figura 9.** Muestra de jal minero.

#### 2. Análisis previos a la determinación del potencial de neutralización



**Figura 10.** Análisis previos a la determinación del potencial de neutralización (a) Medición de propiedades fisicoquímicas pH y conductividad eléctrica, (b) Determinación del grado de efervescencia utilizando HCL. (C) Muestras acondicionadas para posterior agitación

### 3. Digestión de la muestra con agua regia previo al análisis por AAS

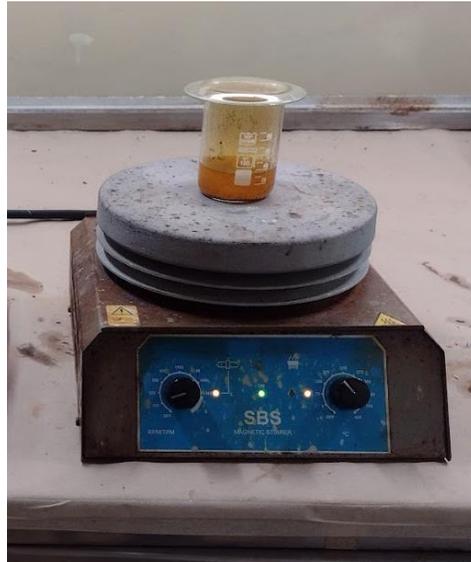


Figura 11. Digestión de la muestra.

### 4. Equipos para la caracterización de los jales mineros

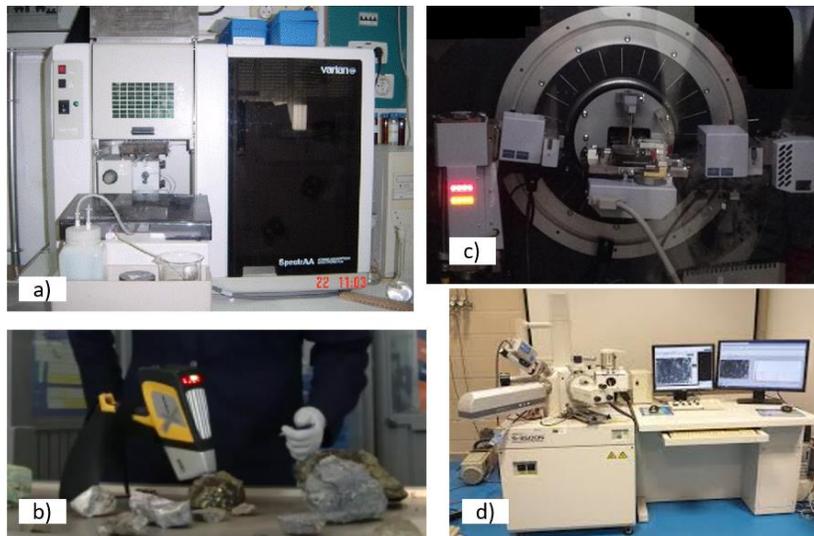


Figura 12. Equipos para la caracterización de los jales mineros. (a-b) Contenido metálicos AAS y FRX. (c-d) Mineralogía DRX y MEB.

## 12. REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España.
- Alakangas, L., & Öhlander, B. (2006). Formation and composition of cemented layers in low-sulphide mine tailings, Laver, northern Sweden. *Environmental Geology*, 50(6), 809–819. doi:10.1007/s00254-006-0253-x
- Armendáriz, A. D. (2022). Propuesta para el tratamiento de residuos derivados de la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados.
- Becerra Rueda, O. F. (2014). Evaluación de la ecotoxicidad por los elementos potencialmente tóxicos generados por la minería de El Triunfo BCS (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Blowes, D. W., Reardon, E. J., Jambor, J. L., & Cherry, J. A. (1991). The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(4), 965–978. doi:10.1016/0016-7037(91)90155-x
- Carrión, S., & Alexander, L. (2020). Estudio del mecanismo de generación de drenaje ácido en materiales de concentración del Proyecto Río Blanco. Recuperado de <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/85052>
- Chavez Cruz, A. (2022). Identificación de elementos potencialmente tóxicos en residuos mineros, provenientes de la minería informal de las provincias de Paucartambo y Quispicanchis de la Región del Cusco. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

De La Cruz Guarneros, N. (2022). Distribución y composición de residuos por minería metálica en la región centro de México: revisión bibliográfica de los últimos 15 años. Recuperado de <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2312>

Escobar León, M. C., Manzanares Acuña, E., & Vega Carrillo, H. R. (2016). Contaminación por plomo en suelo en la comunidad de Vetagrande, Zacatecas. doi:10.48779/SRHM-9413

Flor Cevallos, D. E. (2012). Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a escala laboratorio (Bachelor's thesis, Quito).

Forigua Quicasán, D., Fonseca Forero, N., & Vasquez, O. Y. (2017). Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica. *Revista colombiana de biotecnología*, 19(1), 92–100. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.58904

Graupner, T., Kassahun, A., Rammlmair, D., Meima, J. A., Kock, D., Furche, M., ... Melcher, F. (2007). Formation of sequences of cemented layers and hardpans within sulfide-bearing mine tailings (mine district Freiberg, Germany). *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 22(11), 2486–2508. doi:10.1016/j.apgeochem.2007.07.002

Jambor, J. L. (1994). Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. *The environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, 59, 102.

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. doi:10.1080/23311916.2015.1083137

- Lira, V., & Ignacia, P. (2021). Evaluación de metodologías para el escalamiento de pruebas de laboratorio para la predicción del potencial de generación de drenaje minero ácido en depósitos de estériles. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182036>
- Maldonado Tapia, C. H. (2011). Simposio sobre el impacto ambiental de los residuos en Zacatecas, México. *III Congreso Internacional sobre Cambio Climático y Desarrollo Sustentable (La Plata, 2011)*.
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *Paideia XXI*, 11(1), 141–154. doi:10.31381/paideia.xxi.v11i1.3622
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2005). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 20(3), 639–659. doi:10.1016/j.apgeochem.2004.09.019
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), 3455–3462. doi:10.1073/pnas.96.7.3455
- Ramírez-Crescencio, F., Parra-Véjar, J., Loera-Castañeda, V., Aguilar-Pérez, L. A., & Villanueva-Fierro, I. (2020). Fabricación de paneles prefabricados ligeros utilizando jales mineros. *Revista Internacional de contaminación Ambiental*, 36(4), 1019-1025.
- Rojas Huamaní, L. E., & Ventura Huaman, L. E. (2017). Utilización del relave minero para la elaboración de bloques de concreto tipo ensamblable. Recuperado de <https://repositorio.unh.edu.pe/items/18a27665-9088-4a26-8e37-4ee8047ad629>

Romero, A. A., & Flores, S. L. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial data*, 13(2), 75-82.

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), 107979. doi:10.1016/j.mineng.2022.107979

Salas Urviola, F. B., Guadarrama Guzmán, P., Gutiérrez Bazán, J. J., García Luna, N., Fernández Villagómez, G., & Alarcón Herrera, M. T. (2020). Determinación de posible drenaje ácido de mina y caracterización de jales mineros provenientes de la mina cerro de mercado, durango, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 36(3), 729–744. doi:10.20937/rica.53461

Salas, E.F. (2014). Geoquímica y mineralogía de Jales en mina Aurora, Xichú, Guanajuato. Tesis de Maestría. Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México

Vidales, A., & Katerine, S. (2018). Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia. Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/36759>

Zamora E-chenique, G., & Benzaazoua, M. (2003). Predicciones de drenaje ácido de roca mediante tests geoquímicos estáticos y dinámicos. *Revista Metalúrgica UTO*, 5. Recuperado de [http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?pid=S207855932003000200002&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?pid=S207855932003000200002&script=sci_arttext&tlng=es)

NOMBRE DEL TRABAJO

**Alarcon Elvira Victoria\_2023.docx**

AUTOR

**VICTORIA ALARCON**

RECUENTO DE PALABRAS

**11092 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**62108 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**54 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.9MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 22, 2023 6:24 PM CST**

FECHA DEL INFORME

**Jan 22, 2023 6:25 PM CST****● 38% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 35% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 17% Base de datos de trabajos entregados
- 8% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref