

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**El uso de escoria de fundición como remediador de drenaje ácido de  
minas**

**POR**

**LIZBETH ARGUIJO ESCALERA**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE:**

**INGENIERA EN PROCESOS AMBIENTALES**

**TORREÓN, COAHUILA.**

**DICIEMBRE DE 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

TESIS DEL (LA) C. LIZBETH ARGUIJO ESCALERA, QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACION DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:

PRESIDENTE:

  
\_\_\_\_\_  
ING. JOEL LIMONES AVITIA

VOCAL:

  
\_\_\_\_\_  
M.C. NATALIA BELEN ORTEGA MORALES

VOCAL:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

VOCAL:

  
\_\_\_\_\_  
DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

  
\_\_\_\_\_  
M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2017.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

El uso de escoria de fundición como remediador de drenaje  
ácido de minas

POR:

**LIZBETH ARGUIJO ESCALERA**

TESIS:

QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

REVISADA POR EL COMITÉ ASESOR:

ASESOR PRINCIPAL:

  
\_\_\_\_\_  
ING. JOEL LIMONES AVITIA

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
M.C. NATALIA BELEN ORTEGA MORALES

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

  
\_\_\_\_\_  
M.E. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2017.



## **AGRADECIMIENTOS**

**A mi asesor,** Ing. Joel Limones Avitia por ser un excelente maestro en el sector ambiental, guiarme y apoyarme en mi trabajo de tesis y mi gran variedad de materias que tome a su asignación.

**A mis maestros,** Por impartir el gran conocimiento que tengo el día de hoy.

**A mis compañeros,** por el apoyo que obtuvimos mutuamente unos de otros en nuestra etapa profesional principalmente a Mario Bravo Barrón y Estefanía Moraz Alderete.

## DEDICATORIAS

**A mis padres,** Anastasio Arguijo Adame y Lorena Escalera Calvillo por siempre dejar que me esforzaré, pero no dejar que me hundiera, gracias por la educación y el apoyo que me han dado a lo largo de mi vida.

**A mi novio,** Barik Sada Cervantes por apoyarme en cada decisión que tomaba y quererme como lo quiero.

**A mis hermanos,** Paola Arguijo Escalera y Rogelio Arguijo Escalera por ayudarme en palabras en el idioma inglés que no entendía y por ser unos buenos hermanos en toda la extensión de la palabra.

**A mi abuela,** Martha Calvillo Ceniceros por ser la mejor tita y tener su apoyo incondicional.

**A mi tía,** Martha Escalera Calvillo por ser un apoyo incondicional para mis padres y mi familia en general.

## RESUMEN

La minería es un ingreso alto para cualquier país ya que genera gran cantidad de ingresos económicos en este caso México es un país rico en minerales. Al tener esta riqueza la industria minera entra en vigor explotando, explorando y obteniendo beneficios de dichos minerales. Existen dos tipos de minas llamadas minas a cielo abierto y minas de tiro. Las minas de tiro generan drenaje ácido. El drenaje ácido de mina es formado cuando la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) entra en contacto con agua y oxígeno generando un impacto negativo al medio ambiente como agua acida, suelo infértil, metales pesados lixiviados en aguas subterráneas, entre otros. En este trabajo se realizó un estudio de como las minas extractivas de metalcon formación de drenaje ácido de mina pueden remediarse con escoria siderúrgica para posteriormente no dañar, ni dar impacto negativo al suelo, aire y agua. Las muestras fueron colectadas en la localidad de Cerro de San Pedro, Municipio de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, con la finalidad de observar las líneas de respuesta a la remediación de suelos en un clima semi-árido con sustancias toxicas y dañinas para el medio ambiente y la salud.

**Palabras clave:** drenaje ácido, jales mineros, metales pesados y minería.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

### Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....                    | <b>i</b>  |
| <b>DEDICATORIAS</b> .....                       | <b>ii</b> |
| <b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....                | <b>iv</b> |
| <b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....                  | <b>v</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                  | <b>vi</b> |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....                    | <b>1</b>  |
| <b>II. OBJETIVO</b> .....                       | <b>2</b>  |
| 2.1 General .....                               | 2         |
| 2.2 Específico .....                            | 3         |
| <b>III. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....        | <b>3</b>  |
| 3.1 Historia de la Minería .....                | 3         |
| 3.2 Minas a Cielo Abierto .....                 | 5         |
| 3.3 Minas de Tiro .....                         | 6         |
| 3.4 Contaminación por Actividades Mineras ..... | 7         |
| 3.5 Drenaje Ácido .....                         | 9         |
| 3.6 Jales Mineros y Drenaje Ácido de Mina ..... | 12        |
| 3.7 Escoria .....                               | 12        |
| 3.8 Contaminación Ambiental.....                | 13        |
| 3.9 Desarrollo Sostenible .....                 | 14        |
| 3.10 Procesos de Negocio en la Minería .....    | 16        |
| 3.11 Marco Legal .....                          | 17        |
| <b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....           | <b>19</b> |
| 4.1 Materiales .....                            | 19        |
| 4.2 Métodos .....                               | 20        |
| 4.3 Procedimiento de laboratorio .....          | 21        |
| 4.3.1 Preparación del DAM para toma de pH. .... | 21        |
| 4.3.2 Neutralización del DAM con escoria. ....  | 22        |
| <b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....          | <b>23</b> |
| <b>VI. CONCLUSIONES</b> .....                   | <b>29</b> |
| <b>VII. LITERATURA REVISADA</b> .....           | <b>30</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Cuadro 1.</b> Identificación de Muestras .....   | <b>21</b> |
| <b>Cuadro 2.</b> Identificación de Muestras .....   | <b>22</b> |
| <b>Cuadro 3.</b> Medición de pH sin neutralizar de cada una de las .....  | <b>24</b> |
| muestras de DAM.  |           |
| <b>Cuadro 4.</b> Medición de pH final de la neutralización con escoria .....                                      | <b>25</b> |
| del drenaje ácido de minas.   |           |
| <b>Cuadro 5.</b> Cuadro comparativo de pH inicial y final de las .....  | <b>26</b> |
| muestras de drenaje ácido de minas. Donde se puede observar<br>el incremento de pH para cada una de las muestras. |           |
| <b>Cuadro 5.</b> Cuadro comparativo de resultados estadísticos .....  | <b>28</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 1.</b> Ubicación de la Mina de Cerro de San Pedro, San Luis .....      | <b>20</b> |
| Potosí Fuente: INEGI (2017).   |           |
| <b>Figura 2.</b> Muestras de DAM .....   | <b>24</b> |
| <b>Figura 3.</b> Escoria de fundición gris .....                                 | <b>26</b> |
| <b>Grafica 1.</b> Comparación entre pH inicial de la muestra y pH final de ..... | <b>27</b> |
| la muestra más la escoria de fundición.  |           |

## I. INTRODUCCIÓN

Las industrias mineras, agrícolas, pesqueras y forestales, son las cuatro industrias del recurso básico, en que toda la riqueza se construye, son los procesos extractivos del planeta tierra. Todos ellos tienen y continuaran a tener un impacto en la superficie de la tierra, una modificación de un futuro impacto y un mejoramiento del impacto pasado a causa de técnicas extractivas que dañaron al medio ambiente, en la actualidad es una principal concentración de gobiernos, industrias y ciudadanos en muchas áreas del mundo (*Wiley y Ltd, 1984*).

La sociedad moderna no podría funcionar sin los productos de extracción de industrias mineras, porque son componentes vitales en; aeropuertos, productos de cerámica, computadoras, materiales de construcción, metales y pintura (*Kossoff et al., 2014*).

El Sector minero-metalúrgico en México contribuye como 1er destino en inversión de exploración minera en América Latina y el 4° en el mundo de acuerdo con el reporte publicado por SNL Metals & Mining 2015, También contribuye con el 4 por ciento del Producto Interno Bruto nacional, en el mes de julio de 2015 generó 352 mil 666 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos, de acuerdo con el reporte del Instituto Mexicano del Seguro Social(*SE, 2016*). Al conocer la minería se debe tomar en cuenta los tres puntos claves; exploración, explotación y beneficio para posteriormente gestionar su remediación.

La explotación y el uso de recursos minerales producen grandes cantidades de jales mineros que son comúnmente mezclas con altas concentraciones de presiones de agua (*Hu et al., 2016a*). Cada año la industria minera produce una cantidad significativa de jales mineros principalmente en la forma de material de residuos sólidos. Los jales mineros son las sobras de los procesos de beneficiación de los minerales que son almacenados como mezcla en la confiscación de lagos (*Kiventerä et al., 2016*).

Los jales mineros son una fuente importante para la generación de AMD (*Gong et al., 2016*). Es decir, Drenaje Ácido de Minas y su abreviatura en el idioma inglés (AMD). La generación y descarga de AMD con pH bajo y que contiene altas concentraciones de metales disueltos pueden dañar seriamente la calidad del agua. La clave para entender los efectos de la minería depende directamente sobre entender los procesos que produce el AMD (*Candeias et al., 2014*).

El Drenaje Ácido de Minas (AMD) representa una fuente principal de contaminación del agua en las áreas de actividad minera en el pasado y la actualidad. La fuente de esta contaminación en casos estudiados es considerada a ser la oxidación de piritas ( $\text{FeS}_2$ ), arsenopiritas ( $\text{FeAsS}$ ) pirrotita ( $\text{Fe}(1-x)\text{S}_x$ ) marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) y lanzamiento de  $\text{SO}_4^{2-}$ , As(III),  $\text{Fe}^{2+}$ , y  $\text{H}^+$  a la solución. Debido a este proceso, el agua presenta un bajo pH y un alto contenido total de sólidos disueltos (TDS), particularmente, metales y sulfatos (*Santa Cruz et al., 2013*). Siguiendo esto, el hierro férrico no se precipita por solución, está disponible en oxidación de pirita adicional (*Name y Sheridan, 2014*).

Tratamiento químico es un método comúnmente utilizado para abordar el problema de AMD, que a menudo implica la aplicación de materiales alcalinos para ser utilizado como un neutralizador para disminuir la acidez del agua y eliminar los metales pesados a través de la precipitación (*Gong et al., 2016*) Es necesario evaluar la metodología química para la remediación a partir de escoria en drenaje ácido de minas.

## II. OBJETIVO

### 2.1 General

Mediante la aplicación de escoria de fundición se pretende la remediación de suelos contaminados por actividades mineras en las áreas de los drenajes ácidos.

## **2.2Específico**

Remediar suelos ácidos resultantes de las actividades mineras mediante la aplicación de escoria de fundición a fin de disminuir la contaminación por dichas actividades.

### **III.REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 Historia de la Minería**

La riqueza de los yacimientos minerales de México es uno de los aspectos que más han influido en la historia económica del país. Puesto que lo han colocado en un primer plano en el contexto mundial. Desde su inicio las actividades extractivas mexicanas han estado supeditadas a los intereses y al patrón de desarrollo de otras naciones: en pleno auge del mercantilismo europeo, el oro y la plata mexicanas fueron decisivos para la Corona española; tres siglos más tarde, el gran desarrollo industrial de la Europa atlántica y de los Estados Unidos requería de otro tipo de minerales que fueron encontrados en México y cuya explotación siguió a lo largo del siglo XX (*Coll-Hurtado et al., 2002*).

Cuando se trata de ello, la práctica de siglos de explotación minera puede describirse mejor como extraer materia prima para que pueda ser transformada en algo precioso. No es una sorpresa, entonces que la metáfora de la fiebre del oro ha sido aplicada una y otra vez para caracterizar la era Big Data (*Scarlet y Tarraf, 2015*).

México ocupa el 1er lugar en la producción de plata a nivel mundial y se ubica entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales: plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro y cobre (*SE, 2016*).

México está casi completamente mineralizado, con un estimado del 85% de sus reservas sin explotar y un 70% de su superficie mineralizada con condiciones económicamente viables para la explotación. Se reconoce que en el país hay 23 yacimientos gigantes y seis súper gigantes, en los que se destacan minerales tales como oro, plata, plomo, zinc y molibdeno. Ante tal riqueza natural, denota entonces la creciente transferencia de minerales, en especial hacia EUA y otros países ricos, así como hacia algunos países emergentes como China, cuyas importaciones tanto de petróleo como de minerales han aumentado con creces (*Delgado Ramos, 2013*).

### 3.2 Minas a Cielo Abierto

El proceso de planificación óptima de minas a cielo abierto comienza con el límite máximo de pozos que identifica la extensión o el tamaño de una mina a cielo abierto (*Mohammad y Dimitrakopoulos, 2012*).

La minería a cielo abierto utiliza grandes cantidades de cianuro de manera intensiva, que le permiten recuperar el oro del resto del material removido. Para desarrollar este proceso, se requiere que el yacimiento abarque grandes extensiones y que se encuentre cerca de la superficie. Además, se cavan cráteres grandes en extensión y en profundidad (*Sánchez-Salinas y Ortiz-Hernández, 2014*).

El problema de la programación de la producción en la minería a cielo abierto es determinar las partes de un depósito mineralizado a ser anualmente minado en un orden óptimo de secuencia para maximizar el beneficio total con descuento (*Ramazan y Dimitrakopoulos, 2013*).

La planificación diaria de la mina a cielo abierto es el problema de generar posibles secuencias de bloques para equipos de excavación de una mina, de modo que se cumplan los requisitos de mezcla en las existencias del producto. Una posible secuencia es una serie de acciones para cada excavadora, incluyendo movimientos entre bloques, y la minería de los propios bloques. La tarea para generar una secuencia factible implica asignar equipo de excavación a los bloques. El alcance de este trabajo se limita a excavadoras, en lugar de considerar también el camión / equipo de arrastre (*Lipovetzky et al., 2014*).

El mineral es transportado a la planta concentradora para triturar, pulir y mejorar el contenido de metal, mientras que los residuos se transportan a los vertederos. La planta produce concentrado, que entra en la corriente de refinación para la producción de productos metálicos. Con excepción de las múltiples corrientes de

procesamiento de minerales, existencias y refinado externalizado, una operación de minería a cielo abierto idealizada puede incluir tres etapas: la mina, la planta concentradora y una refinería (*Mohammad y Dimitrakopoulos, 2012*).

### **3.3 Minas de Tiro**

Como los recursos cerca de la superficie están siendo minados, las minas de tiro en todo el mundo están operando en profundidades crecientes. El costo y el tiempo requeridos para el transporte masivo de rocas ha aumentado y esto con el objetivo de aumentar los volúmenes minados y reducir los costos de producción, El transporte masivo desde niveles más profundos hasta la superficie minera presenta desafíos para el subsuelo de las minas a pesar de la existencia y disponibilidad de varias opciones de transporte, la producción en minas de tiro depende del funcionamiento seguro y continuo del sistema de paso de minerales (*Greberg et al., 2016*).

Cuando se utiliza el transporte para el mineral, los trenes operan en el nivel principal transportando el mineral, después pasa el mineral a la trituradora, para su posterior elevación a la superficie a través del sistema de vástago. Esto supone un capital costoso para varias estructuras tales como vías de ferrocarril, extensiones de eje y trituradoras para cada nuevo nivel principal (*Greberg et al., 2016*).

La minería de patrones de contraste es una tarea fundamental de minería de datos que apunta a patrones o modelos de minería que pueden describir diferencias entre varios conjuntos / clases de datos. La minería de contraste es útil en numerosas aplicaciones de la vida real, como la comprensión y el análisis de enfermedades, el diseño de programas de seguros personalizados, la selección de compuestos para el diseño de fármacos, la clasificación, el agrupamiento, la detección de valores atípicos, Análisis de datos médicos (*Duan et al., 2016*).

### 3.4 Contaminación por Actividades Mineras

Para que la gravedad de esta contaminación y la relación lleve a la industria en general se subestiman(*Hoffert, 1947*).

Los residuos de la industria minera-metalúrgica provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales (*PROFEPA, 2015b*).

Los jales son residuos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (*PROFEPA, 2015a*).

Las Presas de jales han sido asociadas con actividades mineras y han constituido un principal impacto negativo. Aparte de un fuerte impacto visual, otros aspectos como geotérmicos, físicos y químicos pueden tener una inestabilidad de eventos con efectos altamente negativos en el medio ambiente (*Grangeia et al., 2011*).

En la práctica de la ingeniería geotécnica, geomateriales, incluyendo suelos naturales, cemento de hormigón, roca triturada y jales por actividades mineras, se utilizan como rellenos de tierras. Por otro lado, los residuos y subproductos de materiales como residuos de neumáticos, cenizade carbón, ceniza de lodo de aguas residuales, ceniza de cascarilla de arroz, a menudo se aplican para mejorar las propiedades físicas y químicas de los materiales de relleno. Estos materiales a menudo están obligados atener propiedades térmicas específicas dependiendo de sus aplicaciones(*Lee y Shang, 2013*).

Los jales siempre contienen metales pesados, sustancias toxicas, y químicas añadidas durante procesos minerales, los cuales pueden dispersarse en el ambiente y amenazan a la salud del público(*Hu et al., 2016b*).Por lo tanto, es vital



que tome medidas para reducir el riesgo de contaminación ambiental por jales mineros(Ahmari y Zhang, 2013).

Los Jales mineros (MT) son un importante material de desecho generado por las operaciones mineras. En la práctica actual, los MT son transportados en forma de lodos y depositado en los depósitos de almacenamiento. Almacenamiento de MT en depósitos conduce a la ocupación de grandes extensiones de tierra, costosa construcción, mantenimiento y riesgos ambientales, y ecológicos (Ahmari y Zhang, 2013).

Instalaciones de almacenamiento de jales actualmente crecen por un estimado 23.750 ha por año, ocupación de lo contrario productiva a la tierra (Santini y Fey, 2016). Por lo tanto, en Asia el cuarto depósito de jales, se ha convertido en el más grande (Guo et al., 2013).

La minería produce cantidades significativas de jales mineros (MT). La mayoría de los MT son eliminados en depósitos de tierra y presas de roca, que conducen a una variedad de preocupaciones de seguridad y medio ambiente. Los MT son susceptibles a la erosión del viento, especialmente en regiones áridas y semiáridas. El polvo fugitivo puede reducir la visibilidad a lo largo de caminos cercanos, degradan la calidad del aire y contaminar el agua superficial. El fracaso presas o depósitos de MT puede causar grandes cantidades de líquidos contaminados y lodos al ser lanzado al medio ambiente, dando por resultado la contaminación y la pérdida de vidas y bienes (Chen et al., 2013).

Además, a causa del pequeño tamaño de grano y el alto contenido de agua, la estabilidad mecánica de la masa de los jales es pobre. Después de esto la disposición y el almacenamiento de información de los jales se convierte una significativa concentración para toda la minería y la operación de fresado asociada con la industria minera (Hu et al., 2016a).

### 3.5 Drenaje Ácido

Drenaje Ácido de minas es el problema más generalizado y frecuente. Muchas minas de roca dura (incluyendo la mayoría de las minas de oro), extraen minerales que están unidos a compuestos de sulfuro. Estas composiciones producen ácido sulfúrico en contacto con el aire y agua, un proceso que ocurre a una tasa muy baja en roca, a una tasa más alta en roca sin protección (que tiene un área de gran superficie y ahora se expone al aire) y a una mayor tasa sin porción en jales mineros que tienen una gran área superficial. El resultado puede ser la producción de aguas muy acidas, que además lixivian metales y otras formas químicas de roca circundante (*Coil et al., 2014a*).

El residuo de roca es colocado en grandes montones para reducir al mínimo el drenaje ácido de mina y ayudar en eventuales sitios clausurados y rehabilitación. Jales de partículas finas, que son el producto de un residuo para los procesos de extracción, salidas de procesos con una concentración baja, mezclas de partículas finas suspendidas (*Boger, 2013*).

Una vez que se han exhumado las rocas de piritas y se ha iniciado el AMD. La limitación de la producción de AMD es costosa y complicada. Es más barato y más fácil elevar el pH mezclándolo con agentes neutralizantes [NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>] en tanques agitados y aireados. Este aumento de pH aumenta la oxidación de Fe<sup>2+</sup> y la precipitación de oxihidróxido de hierro. Los oxihidróxidos de hierro que precipitan incorporan y eliminan la mayoría de las tazas de elementos de la solución los costos de equipo y la eliminación de este tratamiento lo hacen caro (*Rimstidt y Vaughan, 2014*).

El Drenaje Ácido de Minas (AMD) es una de las más consecuencias documentadas ampliamente de la minería, que afecta aguas superficiales en todo

el mundo. AMD es frecuentemente asociado con carbón, pirita de S, Cu, Zn, Ag y Pb en operaciones de minería. AMD escapa de minas activas, sitios mineros abandonados, sistemas de agua superficiales y subterráneas, causadas de contaminación que son exportadas por aguas abajo, los arroyos que reciben drenaje muy ácido (frecuentemente) con concentraciones elevadas de metales disueltos (por ejemplo Al, Cu, Fe, Zn), y, en muchos casos los sustratos están revertidos con metales precipitados de hidróxido (*Hogsden y Harding, 2012*).

Estanques de mineros son, por lo tanto, un importante problema ambiental, especialmente si ellos contienen depósitos abandonados (*Martín-Crespo et al., 2015*). Si los residuos mineros son abandonados sin implementar un sistema de protección, la propagación natural de residuos por viento, agua y lluvia son el resultado en la contaminación en suelos agrícolas adyacentes (*Boussen et al., 2013*).

El Cobre, oro, plomo, plata, zinc, y otros metales deseables ricos en minerales son encontrados frecuentemente como sulfuro de hierro. Normalmente, estos ricos minerales potencialmente tóxicos existen en grandes cantidades métricas y son “encerrados” para no causar daños. Ellos están aislados de la atmósfera y de aguas superficiales por su profundidad, proporciona relativamente poca área superficial para que puedan reaccionar con el agua y el oxígeno (*Coil et al., 2014b*).

La formación de ácido en estos depósitos enterrados se produce a un ritmo lento y generalmente una tasa inofensiva. La extracción de valiosos metales de piedras, sin embargo, implica extracción y trituración del mineral. Esto hace el mineral más “químicamente disponible” para reacciones formadas de ácido (*Coil et al., 2014b*).

La formación de drenaje ácido de minas (AMD) ha estado ampliamente reconocido como uno de los principales problemas ambientales causados por la

minería en todo el mundo, como evidencia por numerosos estudios. Minerales responsables por la generación de AMD son sulfuros de hierro, (pirita,  $\text{FeS}_2$ , and pirrotita,  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) que son estables e insolubles mientras que no entre en contacto con el agua y el oxígeno atmosférico. Gestión eficaz del AMD y la corrección de su impacto puede lograrse solo si se conocen los procesos que influyen en la liberación y transporte de la carga de metales (*Pozo-Antonio et al., 2014*).

El Drenaje Ácido puede tener un impacto espectacular en la calidad del agua. Cuando grandes cantidades reducidas de mineral de S son expuestas al aire y agua, grandes cantidades de  $\text{H}^+$  son liberadas causando muy bajo pH en agua – algunas veces  $> 3$ . Generalmente, las extremas acidificaciones móviles (se producen de forma soluble que son llevadas por drenaje de aguas) metales que son liberados por minerales de sulfuro que oxidan y minerales asociados. Esta movilización ocurre porque un número de metales, incluyendo; Al, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, son más solubles en agua como descensos de pH y se dice que son “ácidos solubles” (*Zipper et al., 2016*).

El drenaje ácido también produce aguas que cuentan con altas concentraciones de sales minerales disueltas (“Sólidos Disueltos Totales” o SDT), incluyendo los sulfatos producidos por la oxidación de minerales, movilizo metales solubles en ácido y otros componentes minerales que se convierten en solubles debido a la disolución de minerales causada por la acidificación extrema. En suma: drenaje ácido es un ácido, rico de sulfuro, con alta concentración SDT, con solución de soporte de metales que daña la ecología fluvial (*Zipper et al., 2016*).

Algunos métodos para la eliminación de metales pesados del agua son la precipitación química, intercambio iónico, extracción por solvente y ósmosis inversa. Estos métodos suelen ser costosos e ineficaces para varias concentraciones (*Seda y Mine, 2016*).

En algunos jales la electromagnética y métodos eléctricos han asignado con éxito mejorando salinidad asociada con la producción de drenaje ácido de minas (*Tycholiz et al., 2016*).

### **3.6 Jales Mineros y Drenaje Ácido de Mina**

Jales mineros son lodos acuosos compuestos de material de grano medio a fino, resultado del pulido y proceso mineral (ej., galena, pirita, calcopirita, arsenopirita). Ellos son llenados por lo menos 5 cm de espesor sedimentado por secuencia y son diferenciados por granulometría leve y/o propiedades de su composición. Implican acumuladores y un posterior potencial de fuente de emisión con una taza de elementos (Cu, Fe, Pb, Zn, etc.) con formación de Drenaje Ácido de Minas (AMD) debido a la oxidación de sulfuros presentes en los jales mineros, ya sea porque no fueron correctamente beneficiados y almacenados o debido a la falta de una apropiada tecnología extractiva durante el tiempo que fueron explotados (*Martín-Crespo et al., 2015*).

Si los residuos de las minas de sulfuro tales como jales son expuestos al oxígeno de la atmósfera u oxígeno disuelto en la zona vadosa, la oxidación de minerales de sulfuro ocurrirá con la combinación de varios procesos tales como ácido producido, reacciones de ácido búfer y formación secundaria del mineral (*Khorasanipour y Eslami, 2014*).

### **3.7 Escoria**

La escoria contribuye un subproducto del alto horno. Consta principalmente de silicato cálcico y se emplea en construcción (balasto o macadán, ladrillos de

escoria, lana de escoria, cemento Portland de escorias) (*Saenz-De Magarola, 2006*).

El hierro dulce, aunque ya no se produzca en cantidades importantes, el hierro dulce fue el metal para construcciones más importante hasta 1885. Se obtenía afinando más el arrabio hasta conseguir un hierro muy puro que, luego, se combinaba con escoria siliciosa para formar una matriz ferrosa con partículas fibrosas de escoria. Con ello resultaba un producto resistente, dúctil y resistente a la corrosión, pero que fue casi completamente reemplazado por el acero y otros materiales (*DeGarmo et al., 2002*).

### **3.8 Contaminación Ambiental**

Los Contaminantes son persistentes en el ambiente poseen un riesgo potencial para la salud humana en todo el mundo. Aunque procesos naturales pueden producir un número de contaminantes ambientales, significativas cantidades de contaminantes son generadas por actividades antropogénicas tales como prácticas de agricultura, industria manufacturera, y operaciones mineras (*Csavina et al., 2012*).

La existencia de metales pesados en sistemas acuáticos puede ser perjudicial para una gran variedad de especies vivas. Entre los metales pesados, níquel es uno de los más utilizados en la fabricación de acero inoxidable, súper aleaciones, aleaciones de metales, tintes, electrochapa, esmaltes de porcelana, monedas y baterías. Directa exposición a níquel causa alergia (*Seda y Mine, 2016*).

El plomo es ampliamente utilizado en los sectores metalúrgico y químicos y en diversas aplicaciones tales como perdigones de escopeta. Por lo tanto, continuamente se libera en el ambiente de diversas fuentes. Por lo tanto, este

metal altamente tóxico supone un riesgo grave para el ecosistema y la salud. A pesar de los varios mecanismos de reacción naturalmente contrarrestar la lixiviación de Pb en las aguas subterráneas, rentable y ambientalmente estas técnicas de remediación son necesarias para garantizar su inmovilización permanente en áreas contaminadas (*Venäläinen, 2012*).

La minería afecta directamente la salud de la gente que trabaja en condiciones peligrosas y se expone a químicos tóxicos. También afecta la salud de la gente a través de los problemas sociales que origina. Los pueblos mineros y campamentos se desarrollan rápidamente con poca planificación y sin cuidado, lo cual generalmente causa muchos problemas(*Conant y Fadem, 2011*).

Incorporar la perspectiva de género al análisis de los riesgos ambientales permite preguntarnos: 1) si hay alguna diferencia entre el riesgo que afrontan hombres y mujeres de las comunidades expuestas a contaminantes ambientales; 2) si los efectos en la salud por la exposición a contaminantes ambientales son iguales para los hombres y para las mujeres; 3) si se incrementa la inequidad de género en contextos de riesgo ambiental, y 4) si los hombres y las mujeres valoran de manera diferente los riesgos que afrontan y si tienen las mismas posibilidades para participar en su gestión (*Catalán-Vázquez y Riojas-Rodríguez, 2015*).

En el futuro, la minería no solo afectará a las familias de las comunidades rurales, esto también afecta a los trabajadores de las minas (*Hossain et al., 2013*).

### **3.9 Desarrollo Sostenible**

La incrementación global en actividades mineras plantea una creciente preocupación sobre efectos en corrientes de ecosistemas, nuestra falta de entendimiento de efectos ecológicos de complejos mineros, y la necesidad para una eficaz mitigación y técnicas de restauración (*Hogsden y Harding, 2012*).

El primer paso en el proceso es el abastecimiento de materias primas por procesos futuros y transformaciones. De hecho, la industria minera podría convertirse en una de las fuerzas principales en la economía global, ocupando una posición vital en la calidad de subministro de materias primas. La minería es uno de los mayores retos que puedan surgir en cualquier actividad industrial. Es la extracción de minerales de la corteza terrestre sin dañar al medio ambiente y sin producir un permanente impacto negativo (*Castilla-Gómez y Herrera-Herbert, 2015*).

Así, encontramos la necesidad de adaptar el concepto de "desarrollo sostenible" que surge por la minería. Hablando estrictamente, del desarrollo sostenible, requiere que las actividades humanas, deben realizarse de una manera que no reduzcan las opciones ambientales para las generaciones futuras (*Castilla-Gómez y Herrera-Herbert, 2015*).

La industria minera requiere una contabilidad de sostenibilidad efectiva y la presentación de informes con el fin de lograr la transición hacia la sostenibilidad. Las operaciones mundiales de los estudios de garantía minera de contextos, investigación sobre la contabilidad y la presentación de la industria minera no sólo debería limitarse a los países desarrollados del mundo (*Lodhia y Hess, 2014*).

El valor de los recursos radica en su potencial para ser metales o minerales para su uso en productos finales que la sociedad desea, los productos más buscados de los recursos más fácilmente accesibles y desarrollados generarán mayores ganancias (*Giurco y Cooper, 2012*).

Explorando esta complejidad para el alcance entre minerales, metales y sostenibilidad. En los cuatro temas que conformarán el paisaje de recursos



minerales, es decir, (i) recursos, (ii) tecnología para la extracción y el tratamiento, (iii) el uso - incluido el valor incorporado y servicio proporcionado por el uso final del metal, (iv) las tasas de producción y consumo (Giurco y Cooper, 2012).

### **3.10 Procesos de Negocio en la Minería**

A pesar del AMD siendo identificado como un problema que se avecina tan temprano como a la década de los 70, Los procesos disponibles de limpieza simples y muchos partidos con poderosos incentivos para actuar, tales como el gobierno a las organizaciones no gubernamentales, a las empresas mineras, ningún partido ha producido la combinación requerida de escala, recursos y credibilidad para afrontar el problema (Simate y Ndlovu, 2014).

Actualmente los procesos de negocio de las organizaciones están soportados por sistemas de información que registran datos valiosos con respecto a ejecutores, actividades, eventos, tiempos y variables asociadas a la ejecución de los procesos. Esta información puede ser aprovechada con técnicas de la minería de datos, más específicamente, de la minería de procesos para descubrir la realidad de cómo se están ejecutando los procesos y de esta forma tomar decisiones para mejorarlos (Van der Aalst et al., 2011).

Los gobiernos de los países mineros son importantes y están tratando de entender el desafío de la productividad, estudiando el tema de cerca con instituciones de investigación con financiamiento público (Lala et al., 2016).

Las posibilidades de localizar desarrollo tecnológico o capacidades industriales a partir de inversiones mineras de empresas privadas o públicas están ligadas a la capacidad del estado para coordinar actores productivos, empresas y sindicatos, en un marco de políticas de industrialización a largo plazo. Una configuración posible para ello es la generación de aglomeraciones mineras (o *clusters*) con

encadenamientos productivos hacia *atrás* y *adelante*. Es decir, con desarrollo de maquinarias, equipamiento e insumos tecnológicos requeridos por la actividad minera, y también procesamiento de minerales y elaboración de semi-manufacturas de origen minero (Buitelaar, 2001).

Por otro lado, el primer Manifiesto de la Minería de Procesos fue publicado por el grupo de trabajo en minería de procesos del IEEE (*task force on process mining*), los autores identificaron once retos para el avance de la disciplina, y uno de ellos consiste en incrementar el entendimiento de la minería de procesos y su utilización por parte de no expertos (Aguirre-Mayorga y Rincón-García, 2015).

### **3.11 Marco Legal**

Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT/SSA1-2003, establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales *NOM (2003)*

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio *NOM (2004)*.

Norma Oficial Mexicana NOM-120-SEMARNAT-2011, Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos *NOM (2011)*.

Artículo 34. Los titulares de concesiones mineras o quienes lleven a cabo obras y trabajos mediante contrato, deberán designar como responsable del

cumplimiento de las normas de seguridad en las minas a un ingeniero legalmente autorizado para ejercer, siempre y cuando las obras y trabajos involucren a más de nueve trabajadores en el caso de las minas de carbón y más de cuarenta y nueve trabajadores en los demás casos *SE (2014)*.

El responsable deberá dedicarse fundamentalmente a verificar el cumplimiento de dichas normas, cerciorarse de que se tomen las medidas necesarias para prevenir accidentes y notificar de inmediato aquéllas que no se hayan adoptado, al titular de la concesión de explotación o a quien lleve a cabo estos trabajos *SE (2014)*.

Artículo 39. En las actividades de exploración, explotación y beneficio de minerales o sustancias, los concesionarios mineros deberán procurar el cuidado del medio ambiente y la protección ecológica, de conformidad con la legislación y la normatividad de la materia *SE (2014)*.

Artículo 17. Los residuos de la industria minera-metalúrgica provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales, que se definirán en forma genérica en el reglamento según lo estipulado en el artículo 7 fracción III de esta Ley, son de regulación y competencia federal. Podrán disponerse finalmente en el sitio de su generación; su peligrosidad y manejo integral, se determinará conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables, y estarán sujetos a los planes de manejo previstos en esta Ley. Se exceptúan de esta clasificación los referidos en el artículo 19, fracción I de este ordenamiento *LGPGIR (2003)*.

Artículo 7 Fracción III. Expedir reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones jurídicas para regular el manejo integral de los residuos de la industria minero-metalúrgica que corresponden a su competencia de conformidad con esta Ley y la Ley Minera *LGPGIR (2003)*.

Artículo 19 Fracción I. Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas, excluidos de la competencia federal conforme a las fracciones IV y V del artículo 5 de la Ley Minera *LGPGIR (2003)*.

Artículo 5. Se exceptúan de la presente Ley. Fracción IV.- Las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen a este fin; Fracción V. Los productos derivados de la descomposición de las rocas, cuando su explotación se realice por medio de trabajos a cielo abierto *SE (2014)*.

## **IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 Materiales**

El presente trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de Suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna ubicada en Torreón Coahuila.

Las muestras analizadas del drenaje ácido de mina, fueron tomadas en la Mina Cerro de San Pedro cercana a la población del mismo nombre, ubicada en el estado de San Luis Potosí, durante el periodo de Enero – Julio del año 2017, con el fin de remediar el suelo con escoria de fundición, llevando como metodología la agregación de escoria de fundición a las muestras.

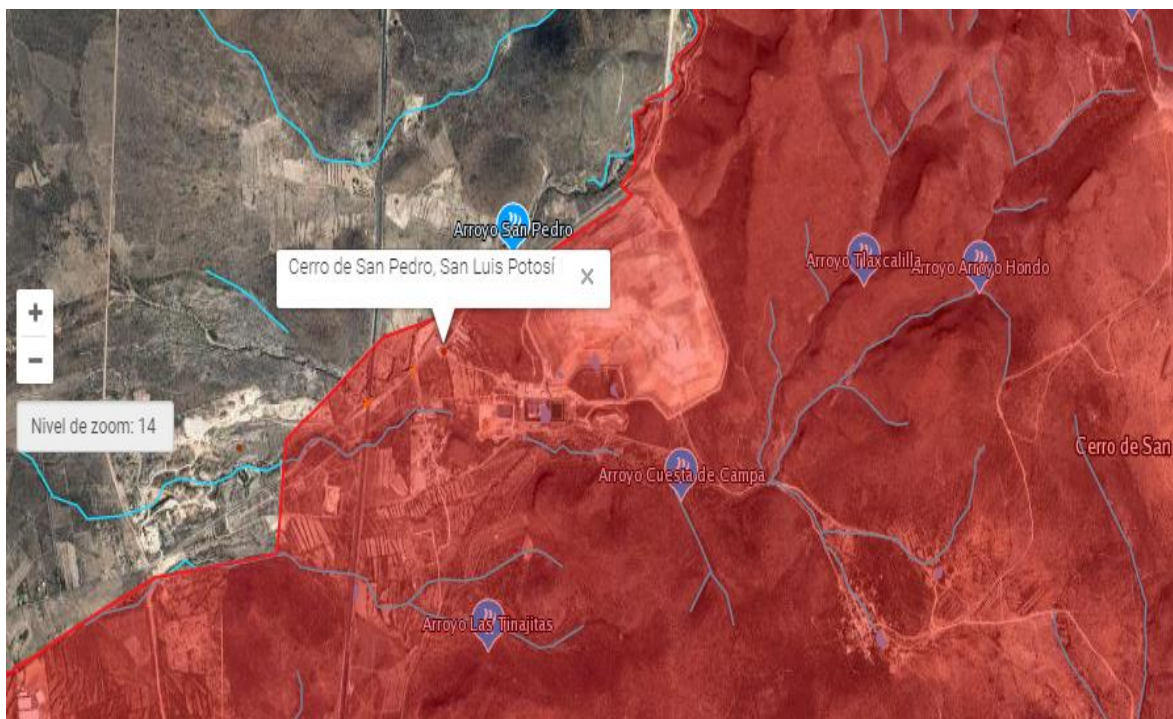


Figura1. Ubicación de la Mina de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí Fuente: INEGI (2017).

Los materiales utilizados para llevar a cabo la neutralización del ADM se mencionan a continuación:

- Potenciómetro o medidor de pH equipado con el electrodo de vidrio,
- Balanza analítica,
- Vasos de precipitado de vidrio de 100 ml,
- Pipeta volumétrica de 20 ml,
- Varilla de vidrio para agitación manual,
- Una piseta y
- Recipientes plásticos.

## 4.2 Métodos

Las muestras se tomaron a una profundidad del suelo de 30 cm identificándose cada una de ellas con la letra P, es decir Punto de Muestreo en un intervalo de puntos de P1 – P9. Dónde: P1 = punto de muestreo ascendente aguas arriba y P9 = al último punto de muestreo.

Además de la literal “P”, las muestras se identificarán como (S) que se refiere a Suelo y/o(SR) Suelo Rizosferico, el total de muestras tomadas fueron de 13, cada una de ellas se colocaron en recipientes de plástico de medio litro, las muestras fueron tomadas de diferentes puntos cercanos al arroyo San Pedro.

| <b>Número de Muestras</b> | <b>Identificación</b> | <b>Nombre</b> |
|---------------------------|-----------------------|---------------|
| 1                         | P1-1                  | S1-S2         |
| 2                         | P2-4                  | S3            |
| 3                         | P3-6                  | S4            |
| 4                         | P4-8                  | S5            |
| 5                         | P5-10                 | S6            |
| 6                         | P6-12                 | S7            |
| 7                         | P7-14                 | S8            |
| 8                         | P8-16                 | S9            |

Cuadro 1. Identificación de Muestras

| <b>Número de Muestras</b> | <b>Identificación</b> | <b>Nombre</b> |
|---------------------------|-----------------------|---------------|
| 9                         | P1-2                  | SRH1          |
| 10                        | P1-3                  | SRH2          |
| 11                        | P3-7                  | SRH4          |
| 12                        | P5-11                 | SRH6          |
| 13                        | P6-13                 | SRH7          |

Cuadro 2. Identificación de Muestras

### **4.3 Procedimiento de laboratorio**

Para llevar a cabo el procedimiento de neutralización del drenaje ácido de minas (DAM), se llevó a cabo el siguiente procedimiento;

#### **4.3.1 Preparación del DAM para toma de pH.**

Primeramente, se pesaron 10 gramos del DAM y se colocaron en un vaso de precipitado de 100 ml. Posteriormente se adicionaron 20 ml de agua destilada al vaso conteniendo la muestra. Con una varilla de vidrio, se agita manualmente la mezcla contenida en el vaso de precipitado, y se deja reposar por un periodo de 30 minutos.

Antes de iniciar la medición del PH de la muestra ya preparada y contenida en el vaso de precipitado, se realiza la calibración del medidor de pH, para lo cual se emplean unas soluciones reguladoras cuyos valores predeterminados son de 4.0 y 7.0 pH, en seguida se enjuagan con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras, se agita nuevamente la suspensión y se introducen los electrodos en el vaso que contenía la suspensión, finalmente se registra el pH al momento en que en la pantalla del aparato aparece la palabra "listo".

#### **4.3.2 Neutralización del DAM con escoria.**

Para la preparación de la muestra de DAM para su neutralización se realizó el siguiente procedimiento: se tomaron 10 gr de la muestra de DAM. Para la neutralización de las muestras se agregó escoria en proporciones de 20 y 60 gr (gramos de escoria) para posteriormente preparar una mezcla homogénea.

Las muestras de escoria se colocaron en vasos de precipitado y se procedió a su mezclado (DAM + Escoria). Se prepararon 2 tipos de muestras a las cuales se les adicionaron proporciones diferentes de escoria y agua destilada. A la primera parte de las muestras se les adicionan 20 ml de agua destilada en muestras que contienen 20 gr de escoria y 10 gr de DAM. En las muestras que contienen 60 gr de escoria + 10 gr de DAM se adicionaron 40 ml de agua destilada, con una varilla de vidrio, se agitaron manualmente las mezclas. Posteriormente se realizó la

agitación de las muestras a intervalos de 5 minutos durante un periodo de 30 minutos, hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se deja reposar por un periodo de 30 a 70 horas.

Posteriormente al periodo de reposo, se toman las lecturas de pH de la mezcla con la finalidad de observar si existe neutralización del DAM. Los resultados se analizan mediante el método estadístico de diseño no experimental determinando las variables estadísticas de media, mediana, moda y varianza.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a las lecturas tomadas del pH inicial de cada una de las muestras del DAM en el siguiente cuadro se muestra el pH inicial de las muestras y su identificación.

| Identificación de la muestra | pH   |
|------------------------------|------|
| S1-S2                        | 0.62 |
| S3                           | 1.25 |
| S4                           | 1.04 |
| S5                           | 1.45 |
| S6                           | 2.58 |
| S7                           | 0.77 |
| S8                           | 1.34 |
| S9                           | 6.16 |
| SRH1                         | 0.69 |
| SRH2                         | 0.85 |
| SRH4                         | 0.80 |



|      |      |
|------|------|
| SRH6 | 0.88 |
| SRH7 | 1.11 |

Cuadro 3. Medición de pH sin neutralizar de cada una de las muestras de DAM.



Figura 2. Muestras de DAM.

La Medición de pH de las muestras neutralizadas con escoria de fundición: Tratamiento 1: 10 gr de DAM + 20gr de Escoria + 20ml de Agua Destilada. Tratamiento 2: 10 gr de DAM + 60gr de Escoria + 40ml de Agua Destilada. En el siguiente cuadro se muestra los resultados de la neutralización de los tratamientos 1 y 2 del Drenaje Ácido de Minas.

| Identificación de la muestra | Escoria | Agua destilada | pH   |
|------------------------------|---------|----------------|------|
| S1-S2                        | 20 gr   | 20 ml          | 1.40 |
| S3                           |         |                | 1.96 |
| S4                           |         |                | 2.15 |
| S5                           |         |                | 2.72 |
| S6                           |         |                | 3.89 |
| S7                           |         |                | 1.18 |
| S8                           |         |                | 3.00 |

|       |              |              |      |
|-------|--------------|--------------|------|
| S9    |              |              | 5.50 |
| SRH1  |              |              | 1.42 |
| SRH2  |              |              | 1.52 |
| SRH4  |              |              | 1.38 |
| SRH6  |              |              | 1.61 |
| SRH7  |              |              | 1.22 |
| S1-S2 | <b>60 gr</b> | <b>40 ml</b> | 1.79 |
| S3    |              |              | 2.92 |
| S4    |              |              | 3.29 |
| S5    |              |              | 2.78 |
| S6    |              |              | 3.66 |
| S7    |              |              | 1.34 |
| S8    |              |              | 3.77 |
| S9    |              |              | 7.48 |
| SRH1  |              |              | 1.83 |
| SRH2  |              |              | 1.75 |
| SRH4  |              |              | 1.62 |
| SRH6  |              |              | 2.04 |
| SRH7  |              |              | 1.72 |

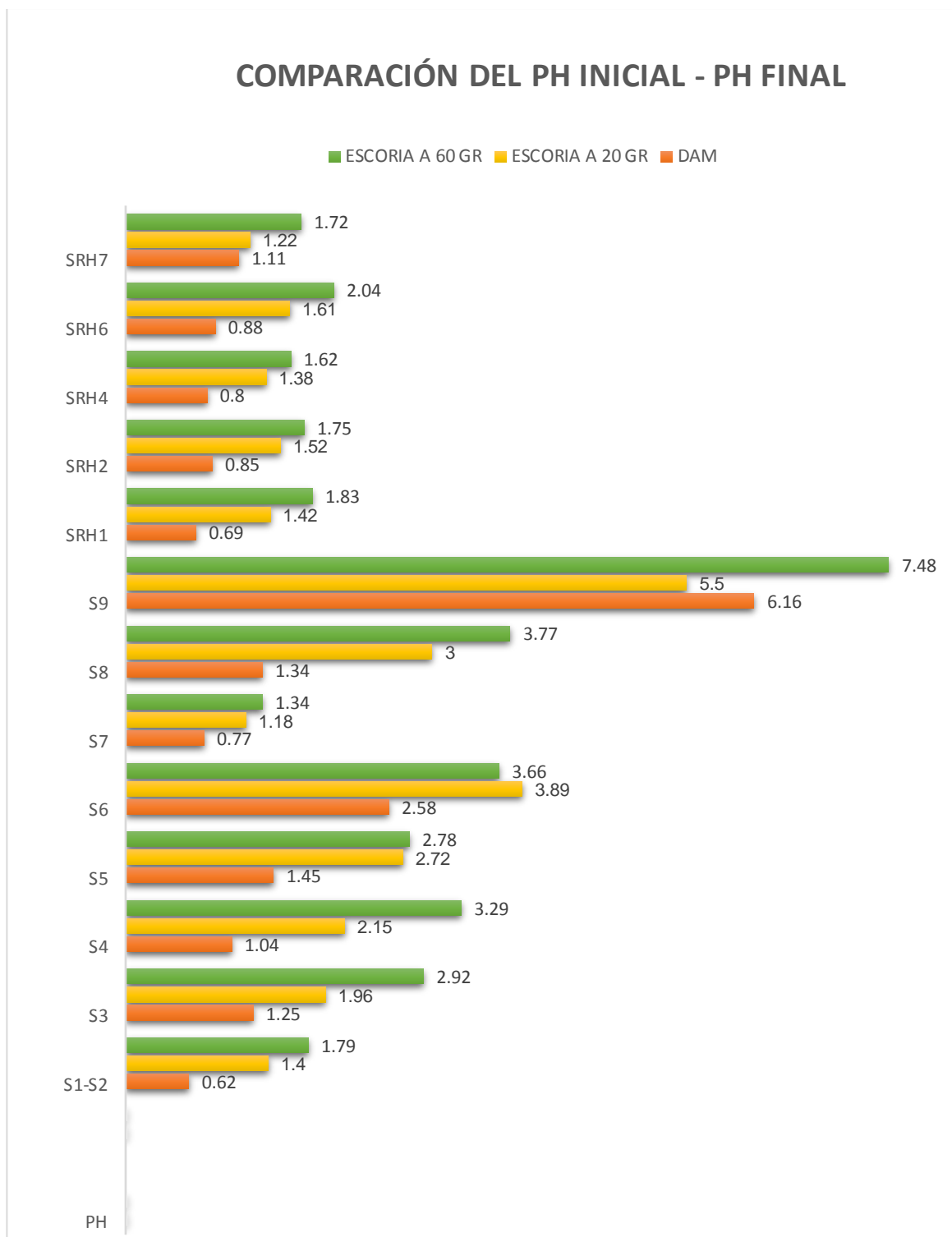
Cuadro 4. Medición de pH final de la neutralización con escoria del drenaje ácido de minas.



Figura 3. Escoria de fundición gris.

| Nombre | pH Inicial | pH Final<br>(DAM + Escoria) |       |
|--------|------------|-----------------------------|-------|
|        |            | 20 gr                       | 60 gr |
| S1-S2  | 0.62       | 1.40                        | 1.79  |
| S3     | 1.25       | 1.96                        | 2.92  |
| S4     | 1.04       | 2.15                        | 3.29  |
| S5     | 1.45       | 2.72                        | 2.78  |
| S6     | 2.58       | 3.89                        | 3.66  |
| S7     | 0.77       | 1.18                        | 1.34  |
| S8     | 1.34       | 3.00                        | 3.77  |
| S9     | 6.16       | 5.50                        | 7.48  |
| SRH1   | 0.69       | 1.42                        | 1.83  |
| SRH2   | 0.85       | 1.52                        | 1.75  |
| SRH4   | 0.80       | 1.38                        | 1.62  |
| SRH6   | 0.88       | 1.61                        | 2.04  |
| SRH7   | 1.11       | 1.22                        | 1.72  |

Cuadro 5. Cuadro comparativo de pH inicial y final de las muestras de drenaje ácido de minas. Donde se puede observar el incremento de pH para cada una de las muestras.



Grafica 1. Comparación entre pH inicial de la muestra y pH final de la muestra mas la escoria de fundición.

Como resultado de los análisis del pH de la muestra de DAM inicial, agregando 20 gr de escoria y 60 gr de escoria, a cada una de las muestras, para su posterior pH final y observar si existe neutralización, a continuación, se presenta el cuadro comparativo de resultados: en el caso de la moda el NA mencionado es decir no aplica ya que ningún pH es repetido.

| <b>Identificación</b> | <b>Media</b> | <b>Mediana</b> | <b>Moda</b> | <b>Varianza</b> |
|-----------------------|--------------|----------------|-------------|-----------------|
| DAM                   | 1.50         | 1.04           | NA          | 2.21            |
| Escoria a 20 gr       | 2.22         | 1.61           | NA          | 1.61            |
| Escoria a 60 gr       | 2.76         | 2.04           | NA          | 2.67            |

Cuadro 6. Cuadro comparativo de resultados estadísticos.

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que la escoria de fundición gris, si ayuda a la neutralización del drenaje ácido. Por lo que se concluye que de acuerdo a la hipótesis presentada la escoria de fundición si puede ser utilizada para neutralizar los suelos ácidos como lo es el DAM.

Se recomienda continuar con este tipo de experimentos agregando más gramos de escoria a suelos ácidos y por un tiempo más prolongado a las 70 horas dadas en este trabajo.

Con lo que respecta a la escoria de fundición de hierro gris, esta no representa un problema para su obtención. Lo anterior en virtud de que existen compañías de fundición que generan este tipo de material en grandes cantidades y que además este material que es considerado como un residuo tiene la ventaja de que no se considera como residuo peligroso ya que no presenta ninguna de las características críticas, que pudiera considerar al residuo como peligroso.

## VII. LITERATURA REVISADA

- Aguirre-Mayorga, H. S. y N. Rincón-García 2015. "Minería de procesos: desarrollo, aplicaciones y factores críticos." Cuadernos de Administración 28: 50.
- Ahmari, S. y L. Zhang 2013. "Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks." Construction and Building Materials 44: 743–750.
- Boger, D. V. 2013. "Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry." Annu. Rev. Chem. Biomol 4: 239-257.
- Boussen, S., M. Soubrand, H. Bril, K. Ouerfelli y S. Abdeljaouad 2013. "Transfer of lead, zinc and cadmium from mine tailings to wheat (*Triticum aestivum*) in carbonated Mediterranean (Northern Tunisia) soils." Geoderma 192: 227–236.
- Buitelaar, R. M. 2001. "Aglomeraciones Mineras y Desarrollo Local en América Latina." Bogotá CEPAL/Alfaomega Grupo Editor: 325 pp.
- Candeias, C., P. Freire Ávila, E. Ferreira da Silva, A. Ferreira, A. R. Salgueiro y J. P. Teixeira 2014. "Acid mine drainage from the Panasqueira mine and its influence on Zêzere river (Central Portugal)." Journal of African Earth Sciences 99: 705–712.
- Castilla-Gómez, J. y J. Herrera-Herbert 2015. "Environmental analysis of mining operations: Dynamic tools for impact assessment." Minerals Engineering 76: 87–96.
- Catalán-Vázquez, M. y H. Riojas-Rodríguez 2015. "Inequidad de género en salud en contextos de riesgos ambientales por actividades mineras e industriales en México." Rev Panam Salud Publica 37: 379–87.
- Coil, D., E. Lester, B. Higman y A. Mattox 2014a. "Mine Tailings." ground truth trekking: 01- 02.
- Coil, D., E. McKittrick, A. Mattox, N. Hoagland, B. Higman y K. Zamzow 2014b. "Acid Mine Drainage." ground truth trekking: 01-04.
- Coll-Hurtado, A., M. T. Sánchez-Salazar y J. Morales 2002. "La Minería en México." geografía, historia, economía y medio ambiente I.5.2 ed: p.119-126.
- Conant, J. y P. Fadem 2011. "Guía Comunitaria para la Salud Ambiental." 21. La minería y la salud 1 ed: p. 471-497.
- Csavina, J., J. Field, M. P. Taylor, S. Gao, A. Landázuri, E. A. Betterton y A. E. Sáez 2012. "A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations." Science of the Total Environment 433: 58–73.
- Chen, R., L. Zhang, M. ASCE y M. Budhu 2013. "Biopolymer Stabilization of Mine Tailings." American Society of Civil Engineers.
- DeGarmo, E. P., J. T. Black y R. A. Kohser 2002. "Materiales y Procesos de Fabricación." Materiales Editorial Reverté: 1241pp.

- Delgado Ramos, G. C. 2013. "Costos ecológicos de la minería aurífera a cielo abierto y resistencia social: una lectura desde el proyecto Caballo Blanco en México." *Intersecciones en Antropología* 14: 279-294.
- Duan, L., G. Dong, X. Wang y C. Tang 2016. "Efficient mining of discriminating relationships among attributes involving arithmetic operations." *Computational Intelligence*. 32: 102-126.
- Giurco, D. y C. Cooper 2012. "Mining and sustainability: asking the right questions." *Minerals Engineering* 29: 3-12.
- Gong, B., P. Wu, Z. Huang, Y. Li, S. Yang, Z. Dang, B. Ruan y C. Kang 2016. "Efficient inhibition of heavy metal release from mine tailings against acid rain exposure by triethylenetetramine intercalated montmorillonite (TETA-Mt)." *Journal of Hazardous Materials*. 318: 396–406.
- Grangeia, C., P. Ávila, M. Matias y E. Ferreira da Silva 2011. "Mine tailings integrated investigations: The case of Rio tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal)." *Engineering Geology* 123: 359-372.
- Greberg, J., A. Salama, A. Gustafson y B. Skawina 2016. "Alternative Process Flow for Underground Mining Operations: Analysis of Conceptual Transport Methods Using Discrete Event Simulation." *Minerals Engineering* 65: 1-14.
- Guo, Y.-g., P. Huang, W.-g. Zhang, X.-w. Yuan, F.-x. Fan, H.-l. Wang, J.-s. Liu y Z.-h. Wang 2013. "Leaching of heavy metals from Dexing copper mine tailings pond." *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 23: 3068–3075.
- Hoffert, J. R. 1947. "Industrial Wastes." Pennsylvania Department of Health, Harrisburg, Pa. 39: 642-646.
- Hogsden, K. L. y J. S. Harding 2012. "Consequences of acid mine drainage for the structure and function of benthic stream communities: a review." *Freshwater Science* 31: 108-120.
- Hossain, D., D. Gorman, B. Chapelle, W. Mann, R. Saal y G. Penton 2013. "Impact of the mining industry on the mental health of landholders and rural communities in southwest Queensland." *Australasian Psychiatry* 21: 32–37.
- Hu, L., Ph.D., A.M.ASCE, H. Wu, L. Zhang, P. Zhang y Q. Wen 2016a. "Geotechnical Properties of Mine Tailings." ASCE.
- Hu, L., Ph.D., A.M.ASCE, H. Wu, L. Zhang, P. Zhang y Q. Wen 2016b. "Geotechnical Properties of Mine Tailings."
- INEGI 2017. "Espacio y Datos de México [en línea]." Instituto Nacional de Estadística y Geografía.: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=24009> [fecha de consulta 04/mayo/2017].
- Khorasanipour, M. y A. Eslami 2014. "Determination of Elements Leachability from Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine Tailings: Application of Toxicity Characteristic Leaching Procedure." *Environ. Process*. 1: 387–403.
- Kiventerä, J., L. Golek, J. Yiniemi, V. Ferreira, J. Deja y M. Illikainen 2016. "Utilization of sulphidic tailings from gold mine as a raw material in geopolymerization." *International Journal of Mineral Processing* 149: 104–110.



- Kossoff, D., W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin y K. A. Hudson-Edwards 2014. "Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation." *Applied Geochemistry* 51: 229-245.
- Lala, A., M. Moyo, S. Rehbach, R. Sellschop y M. Company. 2016. "Productivity in mining operations: reversing the downward trend." *Feature - Productivity BULLETIN MAGAZINE*: 46-49.
- Lee, J. K. y J. Q. Shang 2013. "Thermal properties of mine tailings and tire crumbs mixtures." *Construction and Building Materials* 48: 636–646.
- LGPGIR 2003. "Ley General Para La Prevención y Gestión Integral De Los Residuos [en línea]." Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Última reforma publicada DOF 22-05-2015: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/190117.pdf> [fecha de consulta 11/mayo/2017].
- Lipovetzky, N., C. N. Burt, A. R. Pearce y P. J. Stuckey 2014. "Planning for Mining Operations with Time and Resource Constraints." *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Automated Planning and Scheduling* 1: 404-412.
- Lizarazo, J. M., A. Salas y D. A. Escobar 2016. "Efectos del Curado en las Propiedades de Mezclas de Concreto con Altos Contenidos de Escoria de Hierro." *Información Tecnológica* 27: 163-174.
- Lodhia, S. y N. Hess 2014. "Sustainability accounting and reporting in the mining industry: current literature and directions for future research." *Journal of Cleaner Production*. 84: 43-50.
- Martín-Crespo, T., G.-O. David., S. Martín-Velázquez, J. M. Esbrí, C. De Ignacio-San José, M. J. Sánchez-García, I. Montoya-Montes y F. Martín-González 2015. "Abandoned mine tailings in cultural itineraries: Don Quixote Route (Spain)." *Engineering Geology* 197: 82–93.
- Mohammad , W. A. A. y R. Dimitrakopoulos 2012. "Escala optima de producción de minería a cielo abierto con incierta fuente de metal y reservas a largo plazo." *Resources Policy* 37: 81–89.
- Name, T. y C. Sheridan 2014. "Remediation of acid mine drainage using metallurgical slags." *Minerals Engineering* 64: 15 - 22.
- NOM 2003. "NOM-141-SEMARNAT/SSA1-2003 [en línea]." PROFEPA: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf> [fecha de consulta 15/feb/2017].
- NOM 2004. "NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 [en línea]." PROFEPA: [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat\\_ssa1-2004.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf) [fecha de consulta 15/feb/2017].
- NOM 2011. "NOM-120-SEMARNAT-20011 [en línea]." PROFEPA: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6657/1/nom-120-semarnat-2011.pdf> [fecha de consulta 18/mayo/2017].
- Pozo-Antonio, S., I. Puente-Luna, S. Lagüela-López y M. Veiga-Ríos 2014. "Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review." *DYNA* 81: 73-80.

- PROFEPA 2015a. "Reglamento de la Ley General Para la Prevencion y Gestion Integral de los Residuos." México, DF: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- PROFEPA 2015b. "Estructura de la Ley General Para la Prevencion y Gestion Integral de los Residuos." México, DF: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Ramazan, S. y R. Dimitrakopoulos 2013. "Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem." 14: 361–380.
- Rial-Boubeta, A. y J. Varela-Mallou 2008. "Estadística Práctica Para La Investigación En Ciencias de la Salud." Analisis de Datos para Dos Variables Editor Netbiblo: 31-325.
- Rimstidt, J. D. y D. J. Vaughan 2014. "Acid Mine Drainage." MINERALOGY MATTERS: 153-154.
- Saenz-De Magarola, C. 2006. "Tecnología de los Oficios Metalúrgicos." A.Leyensetter Editorial Reverté, S. A: 01-537.
- Sánchez-Salinas, E. y M. L. Ortiz-Hernández 2014. "Escenarios ambientales y sociales de la minería a cielo abierto." Narraciones de la Ciencia y la Tecnología 20: 27-34.
- Santa Cruz, L., A. Garralón, A. Escribano, P. Gómez, M. J. Turrero, J. Peña, L. Robredo, B. Buil y L. Sánchez 2013. "Chemical characteristics of acid mine drainage from an As-W mineralized zone in western Spain. ." Procedia Earth and Planetary Science 7: 284 – 287.
- Santini, T. C. y M. V. Fey 2016. "Assessment of Technosol formation and in situ remediation in capped alkaline tailings." Catena 136: 17–29.
- Scarlet, S. y S. Tarraf 2015. "Minería por percepciones aprendiendo datos y lecciones de nuestros antepasados." MARKETING INSIGHTS Intelligence Report, Big Data Analytics: 18-19.
- SE 2014. "Ley Minera [en línea]." Secretaria de Economía: <http://www.economia.gob.mx/files/LeyMinera.pdf> [fecha de consulta 16/feb/2017].
- SE 2016. "Minería." Mexico, DF: Secretaria de Economía.
- Seda, E. y Ö. Mine 2016. "Removal of nickel from aqueous solution using magnesite tailing." Desalination and Water Treatment 57: 5810–5820.
- Simate, G. S. y S. Ndlovu 2014. "Acid mine drainage: Challenges and opportunities." Journal of Environmental Chemical Engineering 2: 1785–1803.
- Tycholiz, C., I. J. Ferguson, B. L. Sherriff, M. Cordeiro, R. Sri Ranjan y M. A. Pérez-Flores 2016. "Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada." Journal of Applied Geophysics 131: 29–40.
- Van der Aalst, W. M. P., M. H. Schonenberga y M. Song 2011. "Time prediction based on process mining." Information Systems 36: 450–475.
- Venäläinen, S. H. 2012. "Sorption of lead by phlogopite-rich mine tailings." Applied Geochemistry 27: 1593–1599.
- Volke-Sepúlveda, T. y J. A. Velasco-Trejo 2002. "Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados " Fuentes de Contaminación en México 65: 64 pp.

- Wiley, J. y S. Ltd 1984. "Rehabilitation of Mine Tailings: A Case of Complete Ecosystem Reconstruction and Revegetation of Industrially Stressed Lands in the Sudbury Area, Ontario, Canada." *Effects of Pollutants at the Ecosystem Level*: 403-420.
- Zipper, C., J. Skousen y C. Jage 2016. "Passive Treatment of Acid-Mine Drainage." *Virginia Cooperative Extension* 460-133.