



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“EVALUACIÓN DE LA NEUTRALIZACIÓN  
DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA CON  
ROCAS CARBONATADAS EN  
CELDAS DE TRATAMIENTO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA**

**PRESENTA:**

**LAUREL ALARID ALEJANDRO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M.I. JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH**

**MEXICO, D.F. 2015**

---

---



“No hay problema que no podamos resolver juntos, y muy pocos que podamos resolver por nosotros mismos.”

LYNDON JOHNSON

A mi madre Hilda por sus enseñanzas y gran dedicación que siempre mostró hacia mi persona en cada momento de su existencia, muchas gracias. †

A mi padre Leonardo por el apoyo incondicional y comprensión ante toda situación de mi vida.

A la “Señora Monica” por haber tomado el papel de madre , no hay oro en el mundo que pueda recompensar la manera en que formó parte de mi vida.

A mis hermanos que estuvieron siempre a mi lado y que fueron para mí un ejemplo.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó gracias al apoyo del proyecto PAPIIT IN114113 “Control de Drenaje Ácido en Minas Subterráneas mediante un Sistema de Tratamiento Pasivo In Situ”.

A Minera Tizapa por las facilidades y apoyo que ha brindado para la realización del proyecto.

Al M.I. José Enrique Santos Jallath por ser para mi un profesor, un maestro, un compañero de trabajo e incluso un amigo, y que me ha guiado con sus conocimientos para la culminación del presente trabajo.

Al laboratorio del Intituto de Geología, al laboratorio de la Facultad de Ingeniería y su laboratorista “Don Charly” por haberme apoyado durante las pruebas.

A la M.I. Ana Alejandrina Castro Rodríguez, al Dr. Francisco Martín Romero, al Ing. José de Jesus Huevo Casillas y a la Ing. Guadalupe Contreras Ordaz, mis sinodales que dedicaron parte de su tiempo en la revisión de este trabajo y que me orientaron para mejorarlo.

A mi compañera y amiga Nancy Salvador Romero por el apoyo durante las pruebas en laboratorio.

A Fabiola Verenice Galán Caballero por convertirse en una amiga y apoyarme con el trámite de la tesis.

A mis compañeros de la Facultad de Ingeniería que formaron parte de esta trayectoria académica.

# INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO .....</b>	<b>4</b>
2.1 LOCALIZACIÓN .....	4
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS .....	4
2.2.1 <i>Geología</i> .....	4
2.2.2 <i>Mineralogía</i> .....	5
2.2.3 <i>Hidrología</i> .....	5
2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS MINERAS .....	5
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA Y DEL DRENAJE ÁCIDO (DA) .....	8
3.2 DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE AGUA EN LA MINA .....	8
3.3 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN MEDIANTE AGITACIÓN .....	9
<b>4. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
4.1 DRENAJE ÁCIDO .....	11
4.1.1 <i>Generación de DA</i> .....	11
4.1.2 <i>Neutralización de DA</i> .....	12
4.2 TIPOS DE TRATAMIENTO PARA DA.....	14
4.2.1 <i>Humedales Aerobios</i> .....	15
4.2.2 <i>Humedales de Composta</i> .....	16
4.2.3 <i>Sistemas Sucesivos de Producción de Alcalinidad (SAPS)</i> .....	17
4.2.4 <i>Barreras Reactivas Permeables (PRBs)</i> .....	18
4.2.5 <i>Drenaje Anóxico Calizo (ALD)</i> .....	18
4.2.6 <i>Canales abiertos de caliza (OLC)</i> .....	19
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
5.1 PRUEBA DE ORIENTACIÓN.....	22
5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA.....	23
5.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO .....	24
5.3.1 <i>Velocidades promedio</i> .....	24
5.3.2 <i>Dirección de flujo en celda con trazador</i> .....	26
5.4 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ROCA .....	26
5.5 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN DE DA.....	27
5.5.1 <i>Primera Prueba</i> .....	27
5.5.2 <i>Segunda Prueba</i> .....	29
5.5.3 <i>Tercera Prueba</i> .....	30
5.5.4 <i>Cuarta Prueba</i> .....	31
5.5.5 <i>Quinta Prueba</i> .....	31
5.6 MANEJO DE MUESTRAS PARA ANALIZAR .....	32
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>34</b>
6.1 PRUEBA ORIENTATIVA.....	34
6.2 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO .....	35
6.2.1 <i>Velocidades Promedio</i> .....	35

6.2.2	<i>Dirección de Flujo en Celdas con Trazador</i> .....	35
6.3	PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN DE DA.....	37
6.3.1	<i>Primera Prueba</i> .....	37
6.3.2	<i>Segunda Prueba</i> .....	39
6.3.3	<i>Tercera Prueba</i> .....	39
6.3.4	<i>Cuarta Prueba</i> .....	42
6.3.5	<i>Quinta Prueba</i> .....	42
6.3.6	<i>Composición de sedimentos</i> .....	43
<b>CONCLUSIONES</b> .....		<b>45</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		<b>46</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....		<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las instalaciones de la mina con Google Earth por medio de las coordenadas Latitud 19°3'10.95" N Longitud 100°14'40.02" W .....	4
Figura 2. Lado sur del plano general de la Unidad Minera Tizapa (Fuente: Minera Tizapa, 2013) .....	6
Figura 3. Idea generalizada para la instalación del Sistema de Tratamiento dentro de la mina.....	7
Figura 4. Clasificación de los tratamientos de remediación de DA. (Fuente: Johnson and Halberg, 2005) .....	14
Figura 5. Un SAPS con la dirección de flujo y salida de agua. (Fuente: López, et al., 2002). .....	17
Figura 6. Barrera Reactiva Permeable empleada para neutralizar DA .....	18
Figura 7. Características de diferentes canales abiertos. (Fuente: Ziemkiewicz, 1997) .	20
Figura 8. Canal Abierto de Caliza en la Sierra de Cartagena. (Fuente: Alcolea, 2012) .	21
Figura 9. Vasos de precipitados con roca filita F1 (a) y F2 (b), en (a) se observa DAM en su interior.....	22
Figura 10. Diseño de la celda de tratamiento con sus mamparas, receptáculo y manguera de desagüe .....	23
Figura 11. Celda de tratamiento con sus respectivas mamparas, dimensiones dadas en cm. .....	23
Figura 12. Celda de tratamiento rellena con roca filita.....	24
Figura 13. Aberturas de la válvula establecidas por marcas.....	25
Figura 14. Medición de la velocidad del fluido empleando agua natural, a) Sistema de circulación y recuperación, b) Adición de agua dentro de la celda, c) Abertura de la llave en una de las marcas.....	25
Figura 15. Adición de trazador en la celda de tratamiento.....	26
Figura 16. Preparación de la roca, a) Trituración, b) Clasificación y c) Empaquetamiento de la celda.....	27
Figura 17. Procedimiento general que se realizó para la primera prueba.....	28
Figura 18. A) Inicio de la primera etapa, B) DA eliminado en cada ciclo, C) Medición de valores de la muestra en cada ciclo .....	28
Figura 19. Procedimiento general que se realizó para la segunda prueba .....	29
Figura 20. Circulación del DA a través de la celda empacada con roca caliza.....	30
Figura 21. Recirculación de DA a través de la celda empacada con roca filita y su posterior recuperación .....	30
Figura 22. Procedimiento que se siguió para la adición del DA .....	31

Figura 23. Procedimiento general realizado en la quinta prueba .....	32
Figura 24. Preparación las muestras de las diferentes pruebas continuas, a) Muestras obtenidas en los ciclos, b) Centrifugación, c) Filtrado, d) Inserción de muestras en recipientes .....	33
Figura 25. Comportamiento del rendimiento de la roca F1 para neutralizar DA.....	34
Figura 26. Comportamiento del rendimiento de la roca F2 para neutralizar DA.....	34
Figura 27. Salida del trazador después de fluir a través de la roca.....	35
Figura 28. Término de la prueba con trazador.....	36
Figura 29. Celda de tratamiento empacada con roca filita.....	36
Figura 30. Comportamiento del pH tras cuatro ciclos empleando roca caliza.....	39
Figura 31. Comportamiento lineal del incremento del pH del DA empleando filita y caliza .....	39
Figura 32. Formación del precipitado de oxihidróxidos de hierro durante la prueba...	40
Figura 33. Comportamiento lineal del incremento de pH con uso de filita y caliza ....	41
Figura 34. Precipitados de hidróxidos y oxihidróxidos de hierro dentro de la celda de tratamiento.....	42



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Flujos promedio del garrafón a emplear para el suministro de DA a la celda. 35	35
Tabla 2. Comportamiento del DA con roca filita en la primera prueba..... 37	37
Tabla 3. Comportamiento del DA con roca caliza en la primera prueba ..... 37	37
Tabla 4. Concentraciones de los elementos contenidos en el DA de la primera prueba38	38
Tabla 5. Concentraciones de los elementos contenidos en el DA de la tercera prueba. 40	40
Tabla 6. Incrementos de pH empleando roca filita y caliza en vasos de precipitados... 43	43
Tabla 7. Concentraciones de elementos traza de la roca original y de los sedimentos obtenidos después de la neutralización ..... 44	44

---

## RESUMEN

El Drenaje Ácido (DA) es un problema ambiental importante que se presenta en algunas operaciones mineras, se genera por la reacción química entre el agua el sulfuro del mineral y el oxígeno del medio ambiente y en algunos casos catalizada por la presencia de bacterias. Actualmente dentro de la mina Tizapa se presenta DA. Para controlar este problema, la Cía., instaló un tratamiento activo, neutraliza el DA con la adición de carbonato de sodio para incrementar el pH a un valor cercano a 5.

Para diseñar un tratamiento pasivo para neutralizar el DA de la mina Tizapa se han realizado varios estudios, como la identificación y uso de rocas asociadas al yacimiento con capacidad de neutralización y evaluación del caudal de DA. El objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia de neutralización de las rocas calcáreas asociadas al yacimiento de la mina Tizapa en pruebas realizadas con celdas de acrílico empacadas con la roca caracterizada, a través de la cuales se hace circular el DA.

Continuando con las pruebas para implementar un tratamiento pasivo, se trabajó con un DA con pH de 2.2, las concentraciones de Al, Fe, Cu, Cd, Mn, y Zn que contenía inicialmente fueron de 164 mg/L, 429 mg/L, 18 mg/L, 3 mg/L, 27 mg/L y 438 mg/L respectivamente. Tras aumentar el pH con la filita a valores por arriba de 4, se elimina más del 50 % del Al, Fe y Cu de la solución y una cantidad ínfima para Cd, Mn y Zn. Con la caliza se incrementó el pH a niveles por arriba de 6 y se eliminó el 50 % de Cd, y 14 % de Zn. En el caso del Mn no fue posible su eliminación a los valores de pH alcanzados.

---

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La mina Tizapa explota un yacimiento de sulfuros minerales, en las obras que están fuera de operación, el mineral de sulfuro queda expuesto a la presencia de agua y oxígeno, ocasionando reacciones de oxidación y producción de ácido sulfúrico que disminuye el pH y solubiliza metales pesados, esto se combina con el agua que fluye, generando Drenaje Ácido (DA), (Younger et al., 2002). En la mina se instaló un tratamiento activo para controlar el DA dentro de sus obras mineras, el cual consiste en la canalización del DA hacia la planta de tratamiento, en la que se agrega  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para su neutralización. A futuro el cierre de una mina requiere se instale un tratamiento pasivo que requiera poco mantenimiento y escasa supervisión.

En la UNAM, el proyecto PAPIIT IN114113 con el nombre “Control de Drenaje Ácido en Minas Subterráneas mediante un Sistema de Tratamiento Pasivo In Situ”, considera a la mina Tizapa como la zona de estudio. Dentro del marco de este programa se han realizado varios estudios: Identificaron rocas carbonatadas que pueden ser útiles para neutralizar el DA (Cervantes, 2014), medir los caudales de agua que se presentan en la mina con especial énfasis en el volumen de DA generado y elaborar una propuesta de manejo (Neri, 2014) Se hicieron pruebas de agitación (dinámicas) a nivel laboratorio para determinar la capacidad de neutralización de esas rocas (Goslinga, 2015) obteniendo valores de pH cercanos al neutro con la filita y la caliza, logrando la remoción de gran parte de los metales pesados. Otros estudios se realizaron con el objetivo de evaluar el rendimiento de la roca y la remoción de los metales pesados contenidos en el DA con incrementos de pH (Hernández, 2015). Este trabajo “Evaluación de la neutralización del drenaje ácido de mina con rocas carbonatadas en celdas de tratamiento” también es una contribución a este proyecto PAPIIT.

Diversos autores han reportado trabajos realizados con sistemas de tratamiento pasivos para la neutralización del DA, mencionando los más utilizados como los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de DA y de los requerimientos de tratamiento (Johnson y Halberg et al., 2005).

## INTRODUCCIÓN

---

Este trabajo se enfoca en los sistemas que emplean roca para el tratamiento del DA como son los ALD, las PRB y los Canales Abiertos de Caliza (OLC). Los primeros se someten a condiciones reductoras con el único objetivo de aumentar el pH al DA evitando la precipitación del Fe sobre la roca en forma de hidróxido, manteniendo la eficacia de ésta como fuente generadora de alcalinidad (López et al., 2002).

Las PRB son sistemas para la neutralización del DA aplicables en zonas mineras para la remediación de acuíferos contaminados. Particularmente al sur de España en la zona pirítica de Sevilla, en donde se hizo circular el DA a través de una barrera subterránea formada por roca caliza y materia orgánica colocada de forma transversal al flujo, trayendo consigo el incremento del pH de la solución y reducción de los elementos contenidos en ella en forma de sulfuros (Gibert et al., 2011).

El SAPS es un estanque que cuenta con capas de material orgánico y caliza en su interior arriba hacia abajo respectivamente que, por el exterior, en su parte inferior cuenta con tubos de drenado para recuperar el DA tratado que se emplean para el tratamiento del DA de forma superficial (López, 2002).

Los OLC se han utilizado en diferentes partes del mundo (Cravotta, et al., 1999) en los cuales hacen circular DA a través de un canal con contenido de roca caliza, obteniendo un incremento del pH y precipitación de metales pesados en forma de hidróxidos que en ocasiones, puede formar una costra en la superficie que limita la disolución de la calcita.

Para los canales, Ziemkiewicz, et al., (1997), realizaron estudios en campo y en laboratorio en cuanto al recubrimiento amarillo de hidróxidos de hierro formado en la superficie de la caliza, mostrando que aún con la presencia de éste, el pH del DA tiende en aumento con una eficiencia menor comparado con la roca sin recubrimiento.

En vista de que se puede neutralizar el DA con las rocas asociadas al yacimiento de la mina Tizapa, se tiene pensado la construcción de celdas de tratamiento pasivo que estén empacadas con la roca y se haga circular el drenaje ácido dentro de ellas durante un tiempo tal que se logre la neutralización del mismo.

El objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia de neutralización de las rocas calcáreas asociadas al yacimiento de la mina Tizapa en pruebas realizadas con celdas de acrílico empacadas con la roca caracterizada, a través de la cuales se hace circular el DA.

---

## 2. GENERALIDADES DEL SITIO DE ESTUDIO

### 2.1 LOCALIZACIÓN

La mina Tizapa se encuentra ubicada en el municipio de Zacazonapan, Estado de México, como se observa en la Figura 1 y se puede llegar desde la ciudad de Toluca tomando la carretera federal 134 al SW hacia Tejupilco de Hidalgo, llegando a una “Y” se toma hacia el norte y adelante se encuentra la desviación hacia el municipio.

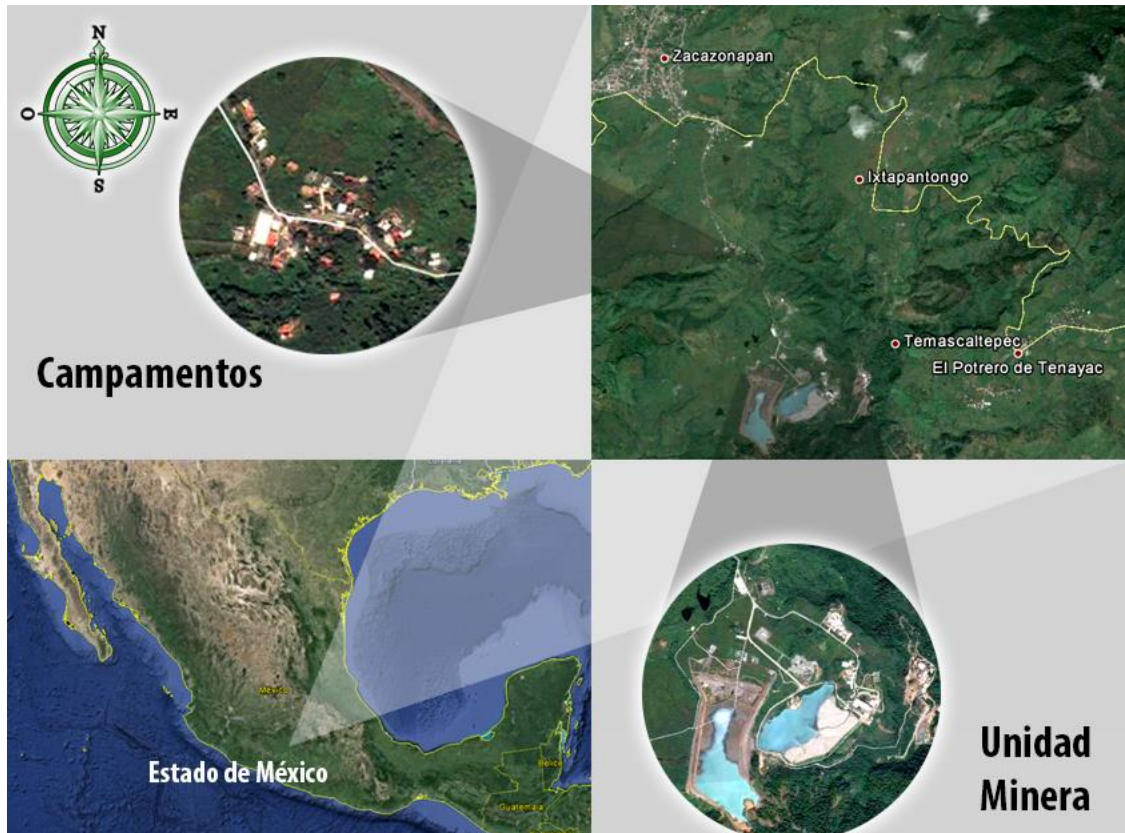


Figura 1. Localización de las instalaciones de la mina con Google Earth por medio de las coordenadas Latitud 19°3'10.95" N Longitud 100°14'40.02" W

### 2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS

#### 2.2.1 Geología

La mina Tizapa se encuentra en la serie metamórfica Tejupilco que se agrupa dentro del subterreno Teloloapan. Es una serie intensamente deformada y metamorfoseada a facies de esquistos verdes. Está formada por una asociación de filitas carbonosas, cuarcitas, esquistos de sericita, esquistos de clorita (principalmente de origen volcanoclástico de

composición andesítica a dacítica) y un augen-gneis milonítico de composición granítica, mejor conocido como metagranito de Tizapa. Las rocas en las que se alberga la mina son filitas carbonosas, meta-andesitas, meta-riolitas y el metagranito (Isidro, 2014).

### 2.2.2 Mineralogía

La pirita que se encuentra en el yacimiento minero representa el 78% de los sulfuros, lo cual indica que las obras mineras pueden ser generadoras de DA. Se encuentran otros minerales como la calcopirita, la galena (mena), arsenopirita, sericita, muscovita, clorita, biotita, grafito, calcita, esfalerita, cuarzo, rutilo y turmalina.

### 2.2.3 Hidrología

Al norte del acuífero Temascaltepec se ubica la mina Tizapa. El acuífero cuenta con una superficie de 1,410 km<sup>2</sup> y se encuentra alojado en rocas metamórficas, en la región hidrológica No. 18 Río Balsas, la cual recibe agua del arroyo Los Sabinos, dicho acuífero presenta recargas naturales de 100.8 hm<sup>3</sup>/año y una extracción de 2.6 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2008).

En Zacazonapan, la elevación del acuífero alcanza los 1350 m.s.n.m. y los accesos principales a la mina se ubican en una elevación de los 1226 m.s.n.m. dando a entender que algunos escurrimientos de agua dentro de la mina son contribución del acuífero (Isidro, 2014; Neri, 2014).

## 2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS MINERAS

Trabajos realizados por Neri (2014), mencionan que la mina cuenta con dos rampas de acceso vistas en la Figura 2, la Rampa Sur y la Rampa Gemela, coladas en esquisto de clorita e intercalaciones de esquisto de sericita, diques riolíticos o andesíticos, con dimensiones de 6 m de alto y 4.3 m de ancho, pendientes de 12% en zonas rectas y 10% en zonas curvas, siendo creados accesos a partir de éstas que cortan de forma perpendicular al cuerpo mineral con dimensiones de 5 m x 4 m, ubicadas generalmente al bajo de la veta. Todas estas obras son recubiertas con concreto lanzado, evitando su intemperización.

Entre las elevaciones 1226 y 1040 m.s.n.m. existen obras que ya han sido explotadas y que ahora son fuente generadora de DA, algunas de estas obras fueron rellenadas con material estéril y se imposibilita el acceso a ellas pero, se observa en los muros de material

estéril la presencia de DA. Arriba de la Rampa Sur (5 m aproximadamente) existen socavones que fueron empleados para la extracción del mineral y que ahora están cerrados, en estas obras se muestran los primeros indicios de generación de DA al tener escurrimientos en el cielo de los primeros niveles de las obras de la Rampa Sur (Neri, 2014).



Figura 2. Lado sur del plano general de la Unidad Minera Tizapa (Fuente: Minera Tizapa, 2013)

Las frentes y cruceros se desarrollan de forma transversal a la veta y de forma longitudinal a cada extremo del cuerpo mineralizado para delimitarlo.

Los cruceros son obras importantes a considerar para la instalación de un sistema de tratamiento ya que se localizan cerca del DA que ha sido canalizado para fluir dentro de la acequia.

Una idea para la instalación del sistema se muestra en la Figura 3 en donde se puede desviar el flujo del DA hacia un crucero para hacerlo pasar a través del sistema de tratamiento en celdas empacadas con roca carbonatada y obtener en la salida del sistema un DA neutralizado que siga su cauce sobre la acequia.

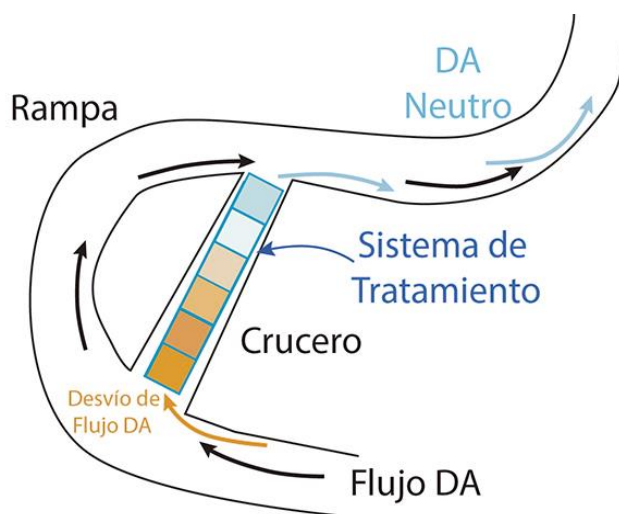


Figura 3. Idea generalizada para la instalación del Sistema de Tratamiento dentro de la mina



---

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA Y DEL DRENAJE ÁCIDO (DA)

En trabajos anteriores (Cervantes, 2014) se caracterizaron diferentes tipos de roca obteniendo los siguientes resultados:

	Minerales	Contenido en general
Filita	Plagioclasa Trazas de hematita Filosilicatos: Mica y Clorita Cuarzo <i>Calcita</i>	26 % Ca 1 % Fe 51 ppm Cu 245 ppm Zn
Esquisto	Plagioclasa Trazas de hematita <i>Filosilicatos: Mica y Clorita</i> Cuarzo	0.5 % Ca 13 % Fe 259 ppm Cu 144 ppm Zn
Caliza	Plagioclasa <i>Filosilicatos: Mica y Clorita</i> Cuarzo <i>Calcita</i>	43 % Ca 1 % Fe 57 ppm Cu 108 ppm Zn

De los tres tipos de roca y sus componentes minerales así como de los elementos presentes en ellas, cabe destacar que la calcita predomina principalmente en las rocas filita y caliza, mientras que el esquisto cuenta con una proporción mayor de clorita y mica. Lo que quiere decir que las primeras dos rocas cuentan con una mayor cantidad de carbonatos con respecto al esquisto quien cuenta con una mayor cantidad de silicatos.

El DA caracterizado en la zona cuenta con un pH entre 2.44 y 3.38 con un contenido promedio de metales como  $\text{SO}_4^{-2}$  (18732 mg/L),  $\text{Ca}^{+2}$  (438 mg/L), Cu (11 mg/L), Fe (563 mg/L), Mn (41 mg/L), Zn (483 mg/L), Al (41 mg/L), Si (35 mg/L) y Cd (6 mg/L) (Cervantes, 2014).

#### 3.2 DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE AGUA EN LA MINA

Se ubicaron los puntos de generación de DA teniendo una producción diaria mínima de 44 l/min y máxima de 104 l/min entre los niveles 1226 y 1040, así como la existencia de una mezcla de agua neutra con DA que escurre por las obras hacia la planta de tratamiento (Neri, 2014).

Se cuenta con la presencia de un flujo permanente dentro de la mina asociado a las cercanías de un acuífero somero, debido a que la infiltración por precipitación pluvial es

baja a causa de la baja permeabilidad de la roca, pero su gran fracturamiento, por evidencias que se tienen de la geología del lugar, indican que el acuífero es el responsable del mayor suministro de agua en las obras mineras (Isidro, 2014).

### 3.3 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN MEDIANTE AGITACIÓN

Goslinga (2015) realizó pruebas de agitación a nivel laboratorio en dos pasos con matraces para evaluar el potencial de neutralización del DA de la roca filita y caliza. En el primer paso empleando filita se elevó el pH de la solución a valores entre 6.14 y 6.18 en un tiempo de agitación de 10 horas, contando con el 100% de remoción de Fe, Al y Cu de esta misma. Otros elementos presentaron valores máximos y mínimos de remoción, como el Cd que mostró un máximo del 19% y un mínimo del 7%, el Zn tuvo una remoción del 4%, el Mn no mostró cambios.

En el segundo paso con caliza se llegó a valores de pH entre 6.85 y 7.44 en un tiempo de 24 horas de agitación, con la remoción total de Fe, Cu, Al y Cd. El Zn presentó una remoción del 98% y 99%, para el Mn fue del 73% y 75% respectivamente a los pH mencionados.

Otra prueba realizada por Goslinga fue similar a la anterior, la diferencia de ésta radica en que se empleó una mezcla de agua neutra con  $\text{HCO}_3^-$  y drenaje ácido. Los tiempos de agitación fueron distintos, 3 horas con filita y 24 horas con caliza. Alcanzando valores de pH entre 5 y 6.67 para filita, se removió el 100% de Fe, Cu y Al, el Cd contó con un porcentaje de remoción del 100% y el 41%, el Mn se removió un 33%, el Zn con un 19% y un 3% de remoción para los valores de pH mencionados respectivamente.

El uso de la caliza logró valores de pH entre 7.26 y 7.64 y con ello una remoción total de Fe, Cu y Al, el Cd se removió un 97% y 100%, la remoción del Mn fue del 89% para los dos valores de pH y con el Zn se contó con una remoción del 96% al 99% para los pH obtenidos respectivamente.

Lo siguiente que se hizo fue evaluar el rendimiento de la roca y determinar el volumen que se puede tratar de DA por cada unidad de peso de la misma a nivel laboratorio mediante pruebas de agitación. Realizando dos etapas de agitación, los resultados obtenidos para el rendimiento de la roca indican que en la primera etapa se elevó el pH de 29 lotes, llegando a un pH entre 5 y 6, estimando que con 1 kg de filita se pueden neutralizar 29 L de DA. En la segunda etapa de agitación se logró aumentar el pH de 13 L de la solución obtenida en la primera etapa con 1 kg de roca caliza alcanzando un pH

entre 6.6 y 7.5. La siguiente prueba se realizó en dos pasos continuos de agitación, primero con filita y después con caliza; se trataron 19 lotes con los que se obtuvo una remoción total de elementos como el Fe, Al y Cu en el primer paso con roca filita elevando el pH de 1.7 hasta 5.9, siendo precipitados seguramente en forma de hidróxidos.

Otros elementos como el Cd y Zn fueron removidos de la solución después del segundo paso de agitación con el empleo de roca caliza elevando el pH de 4.87 hasta 6.76 y con estas etapas, se confirmó la remoción de la mayoría de elementos que se encontraban en el DA al ser incrementado el pH (Hernández, 2015).

Las pruebas hechas anteriormente se favorecen en cuanto al proceso de neutralización porque se trabaja con granulometría de roca pequeña y la velocidad de reacción se incrementa con la agitación. Por lo tanto ahora se deben de hacer pruebas manteniendo la roca en un lecho fijo y circular el DA a través de ella. También se debe evaluar la eficiencia utilizando roca de mayor tamaño, estas son las condiciones que se tomaron en cuenta para el presente trabajo que busca evaluar el comportamiento de la roca en la neutralización del DA dentro de celdas haciendo circular la solución en su interior.

---

## 4. MARCO TEÓRICO

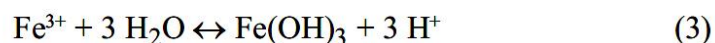
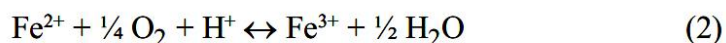
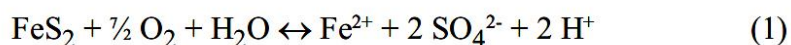
### 4.1 DRENAJE ÁCIDO

La pirita que se encuentra en las obras mineras se oxida por estar en contacto con el agua y el oxígeno produciendo ácido sulfúrico, el cual disuelve metales que se pueden encontrar en las rocas circundantes al mineral como el hierro, aluminio, manganeso, magnesio, sodio y posiblemente algunos minerales traza como arsénico, selenio, berilio, níquel, zinc y otros (EPA, 2002; Younger, 2002) El agua acidificada por el contenido de protones es lo que se conoce como Drenaje Ácido (DA).

El DA se caracteriza por tener valores bajos de pH (entre 5 y 2, raramente menores a 1), alta acidez y alto contenido de metales disueltos (Macías, 2012; Lottermoser, 2010), por lo que ha sido reconocido como uno de los principales problemas ambientales derivados de las actividades mineras (Dold y Fontbote, 2001; Holmstrom, 2001).

#### 4.1.1 Generación de DA

El principal mineral generador de DA es la pirita o marcasita ( $\text{FeS}_2$ ). Los sulfuros que entran en contacto con el agua y oxígeno se oxidan como se ve en la Ec. (1), liberando al ion ferroso, el cual tiende a oxidarse a  $\text{Fe}^{3+}$  (Ec. 2). Este proceso de oxidación de la pirita y liberación de protones  $\text{H}^+$  tiene energía libre negativa. La Ec. (3) muestra la precipitación del ion férrico en forma de hidróxido y la Ec. (4) ocurre cuando se encuentra el ion férrico (fuerte oxidante) en contacto con la pirita. Las dos últimas ecuaciones son netamente productoras de protones  $\text{H}^+$  las cuales provocan una disminución rápida de pH (Wolkersdorfer, 2008; Younger, 2002, Macías 2012)



El intervalo de oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  es controlado por el pH, la cantidad de oxígeno disuelto y la presencia de bacterias oxidantes del hierro. Sin la presencia de oxígeno disuelto en el DA, las reacciones antes mencionadas no podrían ocurrir pero, si se cuenta

con  $\text{Fe}^{3+}$  en solución, la superficie de su molécula de oxígeno podría interactuar con el  $\text{Fe}^{2+}$  provocando su oxidación.

Por otra parte, la oxidación abiótica es relativamente lenta y se inhabilita a pH cercanos a 4.5; sin embargo, por la presencia de bacterias oxidantes tales como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* principalmente, las cuales trabajan mejor en un ambiente ácido ( $\text{pH} < 4$ ) y aerobio, el Fe se oxida de 5 a 6 veces más rápido que en la oxidación abiótica (Lottermoser, 2010).

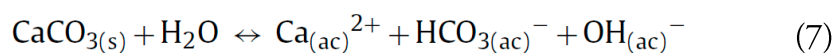
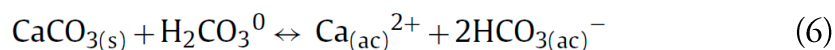
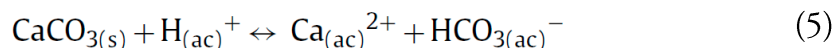
La hidrólisis y solubilidad del Fe (reacción 3) indica que este metal actúa como ácido débil, desarrollando protones cuando se hidroliza y precipita, teniendo el mismo comportamiento el ion Al, que se encuentra en forma soluble en su fase  $\text{Al}^{3+}$ . Los protones se liberan cuando se tiene un pH alrededor de 3 para  $\text{Fe}^{3+}$  y alrededor de 5 para  $\text{Al}^{3+}$ . Si el pH de la solución es bajo, las concentraciones de  $\text{Fe}^{3+}$  son altas, incrementando el valor del pH se obtiene la precipitación de este metal hasta alcanzar el equilibrio de solubilidad ( $10^{-6}$  mol/L,  $\text{pH} = 3$ ). Los iones disueltos representan una contribución a la acidez de la solución, siendo precipitados al incrementar el pH a valores neutros (Younger, 2002).

Si el DA cuenta con un  $\text{pH} < 3$ , la solubilidad del hierro se incrementa y disminuye la precipitación del  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , dando como resultado un incremento en la actividad del  $\text{Fe}^{3+}$  que actúa como oxidante de la pirita y la oxidación bacteriana en un ciclo que resulta de la combinación de las reacciones (2) y (4) (Sengupta, 1993).

#### 4.1.2 Neutralización de DA

Se han realizado estudios para la neutralización del DA durante años, trayendo consigo la identificación de dos materiales que pueden incrementar los valores de pH, la atenuación de la solución y la retención de metales en suspensión que son la roca caliza y los silicatos.

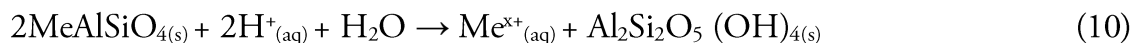
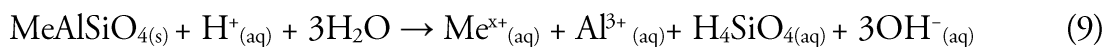
La caliza, por su gran contenido de  $\text{CaCO}_3$ , al estar en contacto con el DA, reacciona provocando la liberación del catión  $\text{Ca}^{2+}$  y la formación del ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), siendo el bicarbonato quien proporciona la alcalinidad como se muestra en las ecuaciones (5), (6) y (7). En la ecuación (6) se produce el ácido carbónico (ácido débil) que a su vez es consumido por el carbonato. Estas reacciones pueden ser reversibles cuando exista un cambio de temperatura, una pérdida de agua o de  $\text{CO}_2$  (Wolkersdorfer, 2008; Younger, 2002; Labastida, 2012; Lottermoser, 2010).



Los ácidos débiles no se disocian completamente como se observa en la ecuación del ácido carbónico (Ec. 8), debido al equilibrio de la reacción del  $\text{CO}_2$  con el agua. La liberación de protones del ácido carbónico influye en la hidratación del  $\text{CO}_2$  y la formación de bicarbonato la cual es su base conjugada. El bicarbonato también puede ceder el protón  $\text{H}^+$  para formar su base conjugada  $\text{CaCO}_3$ .



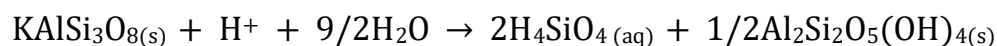
Las otras especies minerales capaces de consumir protones  $\text{H}^+$  son los silicatos, quienes pueden producir solamente compuestos solubles (Ec. 9), o más comúnmente, pasar a otra fase mineral (Ec. 10), que dependerá de la cantidad de elementos presentes en el DA (Lottermoser, 2010).



(Me = Ca, Na, K, Mg, Mn o Fe)

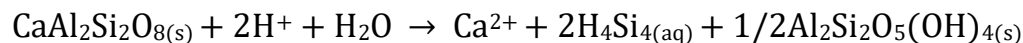
Teniendo como ejemplo los feldespatos, plagioclasas y micas que consumen acidez al igual que la calcita pero de una manera más lenta. Las reacciones que se producen al contacto con el DA según Younger (2002) son las siguientes:

#### Feldespato potásico:

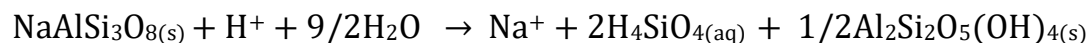


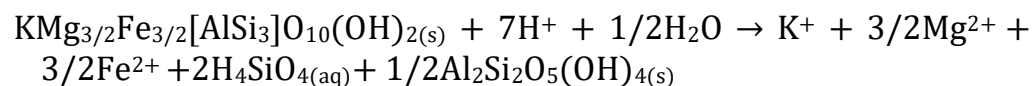
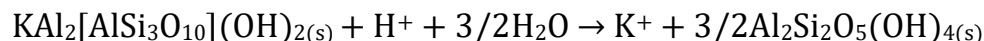
#### Plagioclasas:

##### Anortita



##### Albita



**Micas:****Biotita****Moscovita****4.2 TIPOS DE TRATAMIENTO PARA DA**

Existen en la actualidad estudios sobre tratamientos de DA clasificados como biológicos y abióticos, ambos subdividido en pasivos y activos como se ilustra en la Figura 4.

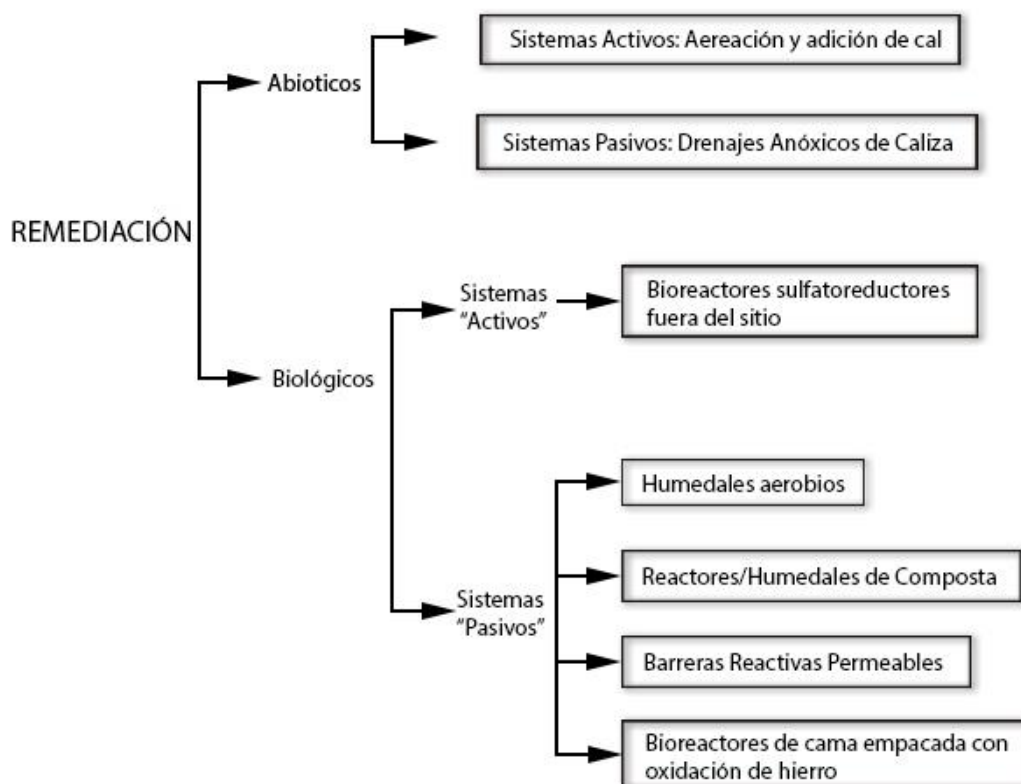


Figura 4. Clasificación de los tratamientos de remediación de DA. (Fuente: Johnson y Halberg, 2005)

Los activos son aquellos a los cuales se les suministra de forma continua energía artificial (Energía para bombeo, mezclado, aireación, calor para cambios de rango de presión, etc.) o agentes químicos (líquidos o sólidos alcalinos, polímeros orgánicos, gases presurizados,

etc.). Se utilizan generalmente en minas en operación en las que pueden ocurrir abruptos cambios en la cantidad y calidad del agua. Los tratamientos pasivos son los que se basan en los mismos principios físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del agua ácida, dicho de otro modo, se emplean fuentes de energía naturalmente disponibles. Estos sistemas requieren de poco mantenimiento para operar efectivamente en toda su vida útil y por medio de procesos químicos y biológicos naturales, se obtiene una mejor calidad del agua (López, 2002; Younger, 2002).

No hay límites en cuanto a las técnicas para obtener la calidad deseada del agua empleando la tecnología existente, pero puede significar elevados costos; por consiguiente, para la selección de un tratamiento se tiene que hacer un análisis para proponer el tratamiento con el menor costo y obtener un beneficio ambiental, que en todo caso es mucho más barato, que las multas por contaminación de áreas.

Los tratamientos pasivos son propuestos como la opción más factible y sustentable para la remediación del DA desde el punto de vista ambiental y económico, ya que pueden ser instalados en minas que se encuentran tanto en operación como en abandono, teniendo por objetivo la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de los sólidos en suspensión. Su función consiste en la precipitación de compuestos insolubles que retengan la carga contaminante (Macías, 2012).

Estos tratamientos cuentan con las ventajas de tener bajo costo de construcción, fácil operación y mantenimiento, no se usan materiales peligrosos, si se diseña adecuadamente, pueden trabajar por periodos largos de tiempo sin mantenimiento, buena eficiencia en el tratamiento de aguas ácidas y se basa en el empleo de dos principales tipos de materiales para el tratamiento del DA, material con contenido de  $\text{CaCO}_3$  y materia orgánica (López, 2002; Younger, 2002).

#### **4.2.1 Humedales Aerobios**

Los humedales aerobios son empleados generalmente para el tratamiento de aguas netamente alcalinas, debido a que las principales reacciones que se llevan a cabo dentro de ellos es la oxidación del ion hierro y la hidrólisis del ion férrico producido.

Son sistemas que operan bajo condiciones oxidantes con un flujo superficial. Los macrófitos son plantados para regular el flujo de agua y para filtrar y estabilizar la



acumulación del precipitado de hierro. También proveen área superficial adicional para precipitación de componentes de la fase sólida del hierro (Johnson y Halberg, 2005).

Dentro de un humedal aerobio se hace circular un flujo horizontal de forma que avance lentamente por gravedad, llevándose a cabo procesos de filtración de la materia en suspensión, adsorción de metales e intercambio iónico, la acumulación de los metales en las raíces de las plantas y las reacciones de oxidación e hidrólisis (López, 2002).

Un factor común en el desarrollo de los humedales es la dominación de los procesos de oxidación hidrolítica, acoplado con una formación de los mecanismos de sedimentación. Debido a que los resultados de las reacciones de oxidación e hidrólisis es la liberación de protones, solo son recomendados los humedales para remover metales de aguas las cuales son netamente alcalinas.

Procesos de sedimentación que ocurren en los humedales:

1. Asentamiento de sólidos precipitados de una suspensión acuosa
2. Filtración física o precipitación coloidal por tallos de plantas.
3. Formación de óxido/hidróxido en raíces de plantas y rizomas
4. Sorción y oxidación in situ

Los humedales pueden ser usados en aguas de mina que han tenido procesos de neutralización anteriormente (Younger et al., 2002).

#### 4.2.2 Humedales de Composta

Se diferencian de los humedales aerobios por contener una gruesa capa de sustrato anóxico de material orgánico saturado (composta) que produce reducción bacteriana de sulfatos (removiendo algunas cantidades de Fe y Zn como sulfuros) y consume acidez o genera bicarbonatos alcalinos.

El grueso de la composta se recomienda que no sea más de 0.5 metros por 2 principales razones:

1. Es más caro hacer la excavación y construcción y más cara la composta.
2. Dado a que gran parte del transporte vertical de los metales y sulfuros es mediante el lento proceso de una difusión molecular, la capa de composta es poco

probable que contribuya grandemente en los procesos geoquímicos de la zona de interface.

El incremento del pH contribuye a la remoción del Al en forma de hidróxido y al Mn en forma de óxido o carbonato.

Si se encuentra en ausencia de oxígeno, el  $\text{SO}_4$  puede ser reducido a HS o ser oxidado a  $\text{S}^0$  incluso a sulfato una vez más.

El hierro puede ser precipitado como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y este compuesto puede reaccionar con el  $\text{HS}^-$  formando el ion sulfuro o con el  $\text{HCO}_3^-$  para formar siderita (Younger, 2002).

#### 4.2.3 Sistemas Sucesivos de Producción de Alcalinidad (SAPS)

Es un sistema el cual consiste de un estanque (Figura 5) en donde se depositan dos sustratos, uno de material alcalino y otro orgánico, sumergidos a una profundidad de 1 y 3 m y drenados por la parte inferior mediante tubería. Tiene como objetivo la reducción del sulfato y retención de metales e incremento de la alcalinidad de la solución.

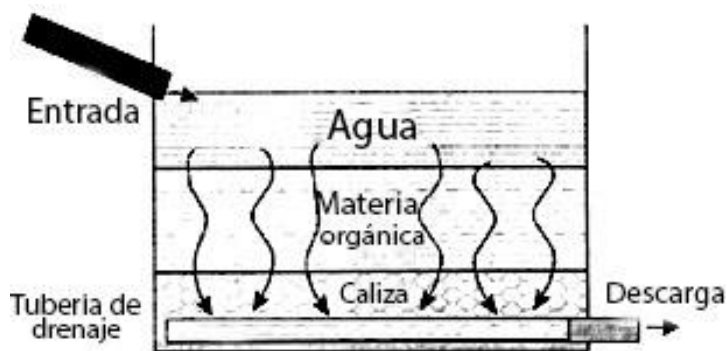


Figura 5. Un SAPS con la dirección de flujo y salida de agua. (Fuente: López, et al., 2002).

Es aplicable a aguas con una concentración de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  menor a 1 mg/l siendo este sistema una combinación de un ALD (Drenaje Anóxico de Caliza) con una capa de composta, el cual sirve para despojar oxígeno disuelto y reducir el  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ . La capa de composta también puede remover Fe en forma de sulfuro y Al en forma de hidróxido.

En su dimensionamiento se tienen dos criterios principales: el primero basado en la capacidad de neutralizar el DA por metro cuadrado y día, y el otro hace referencia al tiempo mínimo de contacto entre el sistema y la solución a tratar (López, et al., 2002, Younger, 2002).

#### 4.2.4 Barreras Reactivas Permeables (PRBs)

Las PRBs se emplean para darle tratamiento a acuíferos que han sido contaminados por el DA, instaladas de forma transversal al flujo como se observa en la Figura 6, en donde se lleva a cabo la reducción bacteriana de los sulfatos, retención de metales precipitando como sulfuros y un incremento del pH por disolución de la caliza (López, 2002; Johnson y Halberg, 2002, Younger, 2002).

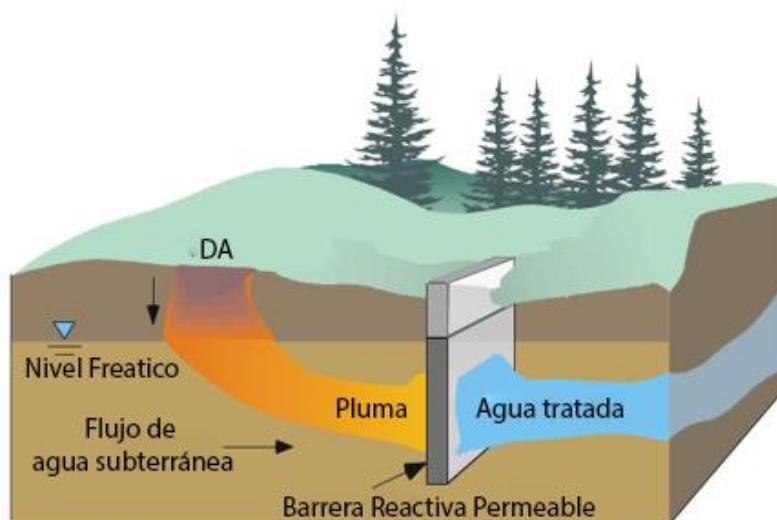


Figura 6. Barrera Reactiva Permeable empleada para neutralizar DA

En la mina de Aznalcóllar se diseñó una barrera de 120 m de longitud y no más de 7 m de profundidad compuesta por 3 módulos de 30 m de longitud por 14 m de ancho separados por tramos inertes de baja permeabilidad. El relleno de cada módulo fue el siguiente: módulo margen derecho (50% caliza y 50% compost vegetal), módulo central (46% caliza, 46% compost vegetal y lodos, 8% hierro) y, módulo margen izquierda (66% caliza, 34% compost vegetal y lodos). El sistema tuvo efectividad en la neutralización del DA y remoción de metales pesados del agua subterránea (Al >96%, Zn >95% y Cu >98%) (Gibert, 2011).

#### 4.2.5 Drenaje Anóxico Calizo (ALD)

Un Drenaje Anóxico Calizo (ALD) consiste en una zanja rellena con gravas de caliza u otro material calcáreo sellada a techo con una capa de tierra arcillosa y una geomembrana impermeable. La zanja se instala a cierta profundidad (1 ó 2 m) para mantener condiciones anóxicas. El DA se hace circular por el interior de la zanja provocando la

disolución de la caliza, lo que genera alcalinidad ( $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$ ) y eleva el pH del agua (López, 2002).

Los ALDs están contruidos para proporcionarle alcalinidad al DA sin precipitar el  $\text{Fe}^{+3}$  en forma de hidróxido sobre la roca caliza, produciendo la disolución del carbonato y formación de  $\text{CO}_2$ . Se incrementa la  $\text{pCO}_2$  debido a su aislamiento con el exterior, trayendo consigo una disminución de pH, aceleración de la disolución de la caliza y como consecuencia, un incremento en la concentración de alcalinidad. Se requiere de poco mantenimiento una vez contruidos, generando alcalinidad a bajo costo comparado con un Humedal de composta.

Cuando el DA contiene grandes cantidades de Fe y Al y oxígeno disuelto, se pierde permeabilidad de forma gradual, causado por la formación de sedimentos precipitados que obstruyen el flujo de agua.

La alcalinidad adquirida en el ALD debe ser suficiente para contrarrestar la acidificación asociada a la hidrólisis en esta etapa del tratamiento y en su diseño hay que considerar la cantidad de caliza a emplear en el lecho anóxico y el tiempo de retención del agua en el mismo (Younger, 2002).

Se han visto buenos resultados empleando un tamaño de roca caliza de 4 cm a 10 cm con tiempos de tratamiento basados en experiencias que va desde las 15 a 23 hrs (López, 2002).

Para el caso de este estudio, se hará un enfoque en los sistemas de tratamiento pasivos que empleen material calcáreo para la neutralización del DA como vienen siendo los Drenajes Anóxicos de Caliza (ALDs), Barreras Reactivas Permeables (PRBs) y los Canales Abiertos de Caliza (OLCs) en los que se observa un incremento del pH, eliminación de elementos en suspensión y atenuación del drenaje, siendo estudiados y aplicados en diferentes unidades mineras.

Los ALDs son generalmente usados como un componente en un sistema de tratamiento pasivo (Johnson y Halberg, 2005; López, 2002).

#### **4.2.6 Canales abiertos de caliza (OLC)**

Los Canales Abiertos de Caliza (Open Limestone Chanel, OLC) emplean roca caliza en el interior de un canal a través del cual fluye el DA. Al entrar en contacto el DA con la

roca, se llevan a cabo reacciones de neutralización que producen la formación de un precipitado de hidróxidos de Fe-Al que recubren la roca y limitan la disolución de la caliza. Dependiendo de la velocidad de flujo que lleva el drenaje ácido, es posible que los precipitados se arrastren por el agua hasta el final del canal y se evite el recubrimiento de la roca dando a la caliza mayor capacidad de neutralización, además de que se evita el taponamiento de los poros formados entre las rocas. Si el precipitado cubre a la caliza, la capacidad de neutralización disminuye pero sigue haciendo efecto el incremento del pH con un tiempo mayor de tratamiento como lo reporta Ziemkiewicz (1997) en su estudio donde empleó caliza con y sin recubrimiento para elevar el pH del agua ácida a un valor de 5, siendo un 21% mejor la disolución de la caliza sin recubrimiento que con éste. Entre un pH de 3 y 4, el rango de disolución de la caliza con recubrimiento disminuye cerca del 40% comparado con la caliza sin recubrimiento del precipitado de hidróxidos.

Al inicio de un OLC, existen altos rangos de disolución de  $\text{CaCO}_3$  y precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  que fueron asociados a un pH bajo y a altas concentraciones de  $\text{Fe}^{3+}$  respectivamente, y si se incrementa el pH, disminuye la disolución de  $\text{CaCO}_3$  (Santomartino, 2007).

Los OLC seguidos de un tanque de asentamiento requieren de menos espacio a ocupar que sistemas como un ALD, tanques de oxidación y asentamiento o un humedal. Facilita la remoción de los lodos de oxihidróxidos y se pueden instalar desagües dentro del sistema (Cravotta, 1999).

Ziemkiewicz (1997) hizo estudios sobre diferentes canales abiertos y sus características se pueden observar en la Figura 7, la cual muestra la velocidad de flujo que varía en cada canal, una reducción del nivel de acidez del DA que ha sido circulado a través de los canales durante un tiempo corto de contacto, una pendiente dada a cada uno y los tipos de roca empleados.

Canal	Flujo L/min	Largo m	Tipo de roca	Pendiente %	Tiempo de contacto min	Acidez		Pérdida de acidez	
						Inicial mg/L	Final mg/L	%	mg/L
Coral/Graceton	1323	220	SS	10	37	550	540	2	10
Morg Airport W	113	46	LS	14	21	410	360	12	50
Morg Airport E	76	27	LS	20	6	355	330	7	25
Eichleberger no. 2	378	49	LS	20	29	510	325	36	185
PADER\$	95	11	LS	60	4	2600	2500	4	100
PA Game Com.	484	11	LS	45	1	330	125	62	205
Cottage Town	302	137	LS	9	19	32	28	13	4
Opawsky	907	46	LS	9	86	30	15	50	15

† SS = Arenisca, LS = Caliza

Figura 7. Características de diferentes canales abiertos. (Fuente: Ziemkiewicz, 1997)

Como conclusiones del estudio de los siete canales se tiene que redujeron la concentración de la acidez del DA entre el 4 y 62% con el empleo de roca caliza. Los canales abiertos trabajan mejor cuando están contruidos con una pendiente mayor al 20% y donde la velocidad de flujo mantenga en suspensión a los hidróxidos, evitando su precipitación y taponamiento de los poros de la roca en el canal.

Alcolea (2012) usó canales abiertos para la remediación de DA en la Sierra de Cartagena – La Unión (Sureste de España) visto en la Figura 8, en donde se ubicaron minas subterráneas y a cielo abierto abandonadas desde 1991. Al cabo de unos años, las reacciones de oxidación e hidrólisis de los residuos mineros trajeron consigo la contaminación de un área de 9 km<sup>2</sup> con la generación de DA.



**Figura 8.** Canal Abierto de Caliza en la Sierra de Cartagena. (Fuente: Alcolea, 2012)

El canal abierto fue de aproximadamente 2 km de longitud lo cual produjo largos tiempos de contacto entre el DA y la roca. Debido a la velocidad de flujo, los análisis mostraron que las reacciones con la roca carbonatada no inactivaron la generación de alcalinidad, sin embargo, se tuvieron actividades de mantenimiento en las zonas de acumulación de sedimentos para evitar acumulación en las camas de roca.

El OLC fue una solución a bajo costo para el tratamiento del DA pero para eliminar Pb, el canal fue ineficiente, debido a la posible presencia de una fuente adicional de este metal en el área no relacionado con el DA.

El presente trabajo se basa en el sistema de canales abiertos, en el cual las celdas que se emplearon para las pruebas son semejantes a un canal abierto ya que cuentan con las mismas condiciones. La intención de este diseño es que el sistema pueda ser escalado para instalarse dentro de la mina.

---

## 5. METODOLOGÍA

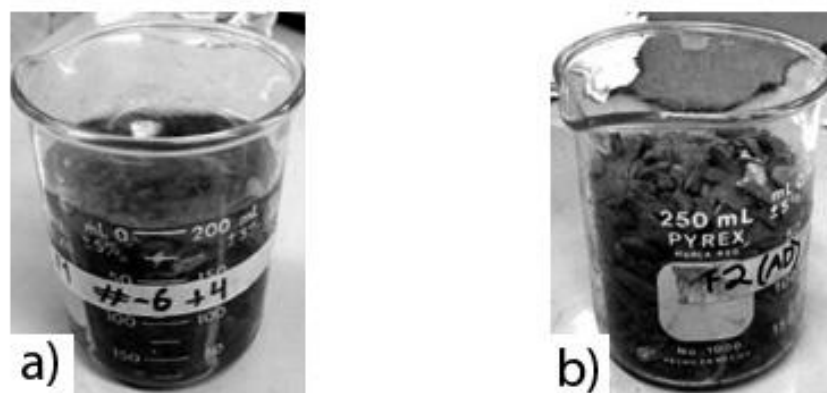
### 5.1 PRUEBA DE ORIENTACIÓN

Se pretende neutralizar el DA estando en contacto con rocas carbonatadas confinadas en una celda de tratamiento, pero no se cuenta con parámetros iniciales como la velocidad del flujo, el volumen de DA que podrá neutralizar la roca carbonatada ni el tiempo de residencia del DA dentro de la celda.

Para tener valores orientativos, se hizo una prueba preliminar colocando un vaso de precipitado con roca carbonatada y agregando un volumen del DA, dando un tiempo de residencia determinado para que se lleve a cabo la reacción de neutralización.

En un vaso de precipitado de 250 mL se colocaron 200 g de roca filita (F1) a un tamaño entre los 3.25 a los 4.75 mm y 100 mL de DA con un pH de 2.45. La relación roca/DA fue de 1:0.5 y se dejó reaccionar un tiempo de 24 horas.

Se hizo la misma prueba con la roca filita (F2) en otro vaso de precipitados y con las mismas cantidades de F1, DA y tiempo de residencia (Figura 9).



**Figura 9.** Vasos de precipitados con roca filita F1 (a) y F2 (b), en (a) se observa DAM en su interior.

Transcurrido el tiempo establecido, se separó la solución de los vasos y se midieron los valores de pH y conductividad eléctrica (C.E.) de esa misma solución. Se procedió a la colocación de un nuevo volumen de DA (100 mL) a la misma roca filita que se conservó en los vasos y nuevamente se dejó 24 horas, para después tomar las mediciones de pH y C.E. El procedimiento se repitió con la misma muestra de roca hasta que los valores de pH medidos estuvieron por debajo de 5.

## 5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA

La celda de tratamiento se diseñó para contener un volumen de 3.5 litros de agua. Se le colocó una mampara divisora en la parte central con una separación de 1 cm de la base para que el DA tenga una dirección de flujo descendente y ascendente y se logre el contacto de éste con toda la roca confinada. La segunda mampara se colocó para que sobre ella se derrame la solución después de realizar el trayecto deseado y por medio de una manguera recuperar el DA tratado (Figura 10 y 11).

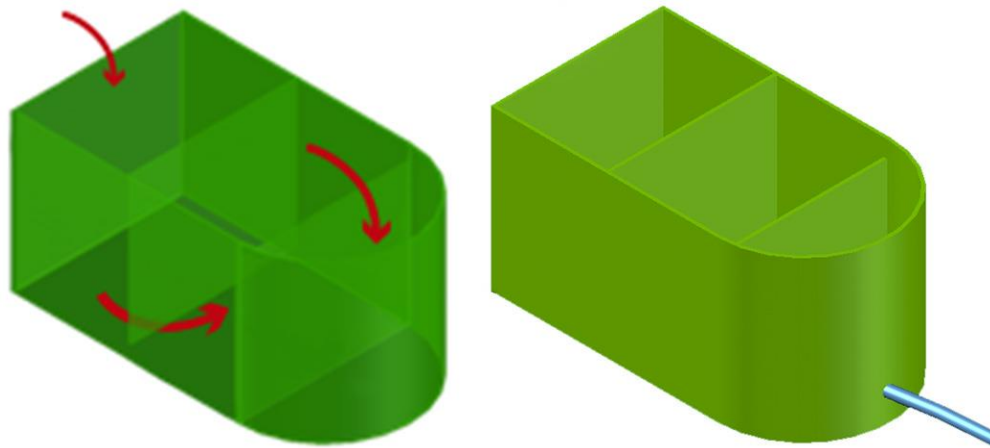


Figura 10. Diseño de la celda de tratamiento con sus mamparas, receptáculo y manguera de desagüe

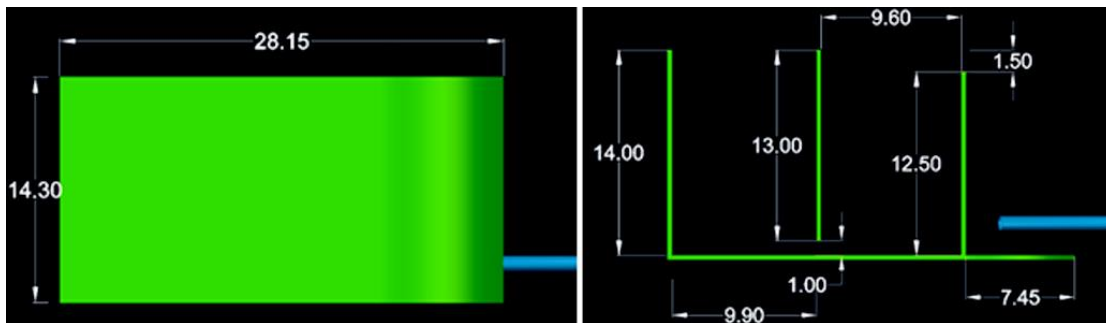


Figura 11. Celda de tratamiento con sus respectivas mamparas (dimensiones dadas en cm).

Teniendo el diseño de la celda de tratamiento con sus correspondientes medidas, su construcción fue con acrílico. La celda construida y ya empacada con la roca se muestra en la Figura 12.





Figura 12. Celda de tratamiento rellena con roca filita

### 5.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

#### 5.3.1 Velocidades promedio

El diseño de la celda está hecho para que el DA circule a través de la roca confinada con un flujo descendente y luego ascendente y derrame por el extremo final. Este fluido debe de tener un tiempo de contacto con la roca suficiente para que pueda lograrse la neutralización y, para conseguir este objetivo, es necesario mantener un flujo controlado. El control del flujo se hizo por medio de una válvula manual.

Se empleó un garrafón de 4 litros con válvula en la parte inferior y se estuvieron haciendo aforos en diferentes aberturas de la válvula y por consiguiente diferentes velocidades de flujo.

Las aberturas de la válvula para la obtención de un determinado flujo se controló realizando aforos y una vez obtenido el flujo deseado, se colocó una marca en la válvula para hacerla coincidir con la llave.

Se hicieron tres marcas a la válvula y con cada una de ellas se obtuvo un flujo diferente (Figura 13).

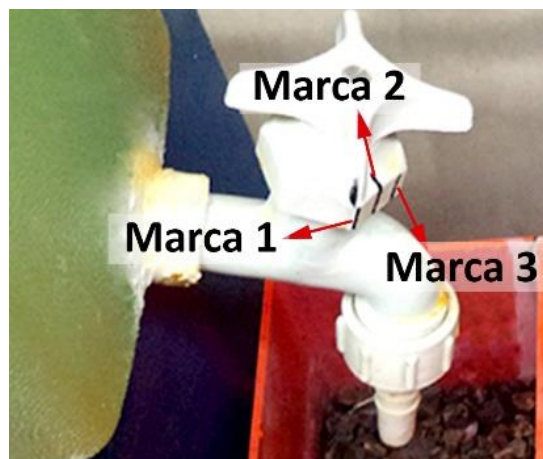


Figura 13. Aberturas de la válvula establecidas por marcas.

Las mediciones de flujo se hicieron con agua natural, derramando el agua dentro de la celda y recuperándola en una cubeta por medio de la manguera conectada a la celda (Figura 14).

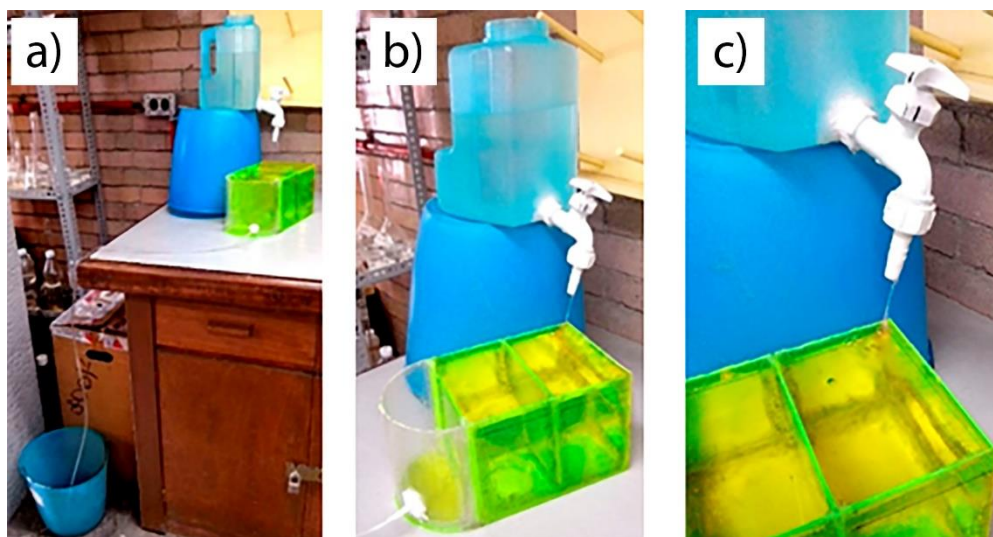


Figura 14. Medición de la velocidad del fluido empleando agua natural, a) Sistema de circulación y recuperación, b) Adición de agua dentro de la celda, c) Abertura de la llave en una de las marcas

### 5.3.2 Dirección de flujo en celda con trazador

El flujo del agua en la celda hace un recorrido con una trayectoria descendente, ascendente y derrama en el depósito final para recuperarla en una cubeta por medio de la manguera ubicada en la parte inferior del mismo.

Para verificar el recorrido del agua se empleó una celda empacada con esquisto a un tamaño de malla de  $\#-1/2 + 4$ .

Se empleó un trazador conocido comercialmente como azul de metileno que indicó, por medio de la observación, la trayectoria de recorrido del fluido durante el llenado de la celda con agua.

Al iniciar la prueba, se abrió la llave del garrafón para tener un flujo continuo y se hizo la adición del trazador, éste se agregó en el costado izquierdo de la celda y se observó su recorrido (Figura 15).



Figura 15. Adición de trazador en la celda de tratamiento

## 5.4 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ROCA

Se hizo la preparación de la roca a emplear en cada una de las pruebas, roca que fue traída de la mina en grandes dimensiones y reducida de tamaño para ser ocupada a nivel laboratorio. Dicha preparación que se observa en la Figura 16 comenzó con la etapa de trituración, seguida de una clasificación empleando tamices a diferentes tamaños de malla (tamaños que se mencionan en cada una de las pruebas) y su posterior colocación dentro de la celda de tratamiento.

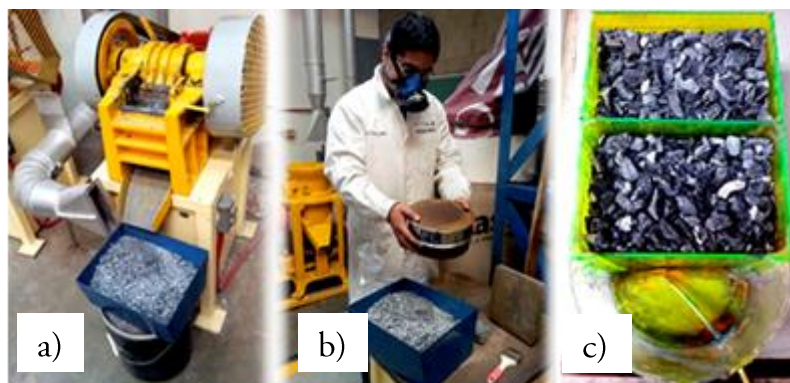


Figura 16. Preparación de la roca, a) Trituración, b) Clasificación y c) Empaquetamiento de la celda

## 5.5 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN DE DA

Las pruebas tuvieron como finalidad incrementar el pH del drenaje ácido haciéndolo circular a través de la celda, manteniendo un flujo constante y midiendo el tiempo de contacto entre la roca y el DA.

Cada prueba se realizó en dos etapas, en la primera empleando roca filita, buscando precipitar el hierro y aluminio elevando el pH a valores entre 4 y 5. En la segunda etapa incrementar el pH a niveles superiores a 7 utilizando caliza y con ello remover Cd, Zn y Mn.

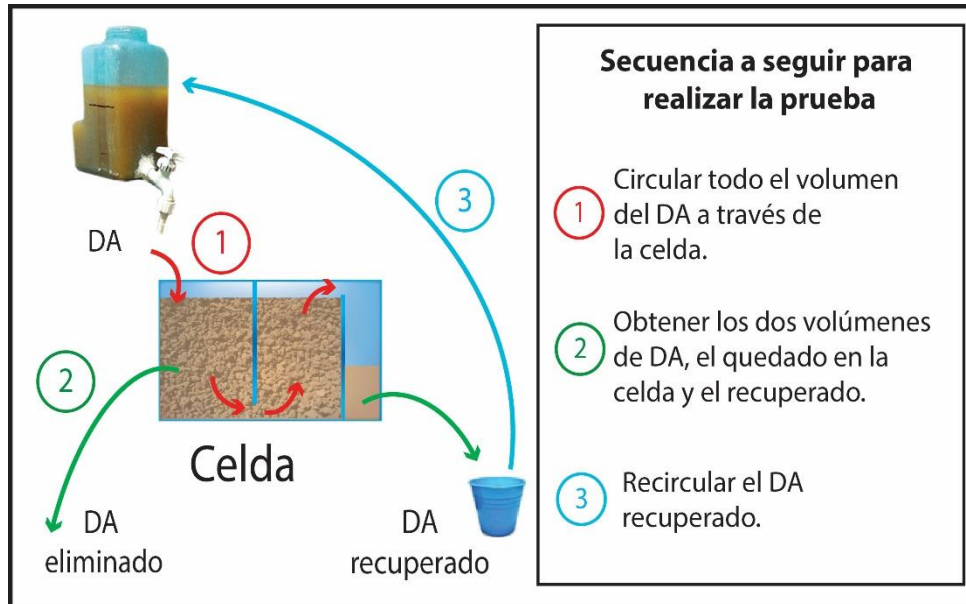
Se hicieron cinco pruebas en celdas de acrílico empacadas con filita y caliza a un tamaño entre 4.75 y 12.7 mm para las primeras tres pruebas y de 13 mm a 25.4 mm para las dos últimas, las cuales consistieron en la adición y recirculación de DA a través de las rocas y su posterior recuperación para análisis.

Los valores que se evaluaron en cada una de las pruebas fueron el pH, la C.E. y el tiempo que tardó en circular el DA a través de la celda empacada con roca. Se tuvo variaciones de parámetros de una prueba con respecto a otra como viene siendo la velocidad de flujo, tiempos de residencia y la forma de adición del DA sobre la celda como se describe más adelante.

### 5.5.1 Primera Prueba

La primera prueba, que se ilustra en la Figura 16, consistió en circular 13.3 L de DA, con un pH de 2.5, a través de una celda con 5.1 kg de filita a un flujo promedio de 175 mL/min. El volumen de DA que cabe en la celda empacada con filita es de 1.6 L, por lo

que el tiempo de residencia considerando el flujo establecido fue de 9 minutos. Se realizaron 5 ciclos y al término de cada ciclo se eliminó el volumen retenido en la celda (por no alcanzar el tiempo de residencia necesario). En cada ciclo se hizo la medición de pH, C.E. y se tomaron 100 mL de solución para analizar elementos traza mediante Espectrometría de Plasma Acoplada por Inducción (ICP).



**Figura 17.** Procedimiento general que se realizó para la primera prueba

La solución recuperada de la filita se hizo pasar a través de una celda empacada con 2.1 kg de caliza a un flujo de 74 mL/min. Se hicieron 4 ciclos, en cada uno se eliminó 0.7 L (que no alcanzaron el tiempo de residencia). En cada ciclo se midió pH, C.E. y se tomaron 100 mL de la solución para análisis (Figura 17).



**Figura 18.** A) Inicio de la primera etapa, B) DA eliminado en cada ciclo, C) Medición de valores de la muestra en cada ciclo

Los sedimentos formados al final de la prueba, tanto en la celda con filita y en la celda con caliza, fueron separados y puestos a secar a temperatura ambiente durante una semana para mandarse a analizar.

### 5.5.2 Segunda Prueba

La segunda prueba consistió en la recirculación de 5 L de DA, con un pH inicial de 2.27, a través de 4.7 kg de filita en la celda a un flujo de 400 mL/min. Se hicieron 9 ciclos midiendo el tiempo en que tarda en circular todo el DA a través de la celda en cada uno de ellos. La Figura 18 ilustra el procedimiento que se llevó a cabo, con la diferencia de que no se eliminó el DA retenido en cada ciclo. En los ciclos 4, 6 y 9 se midió pH y C.E.

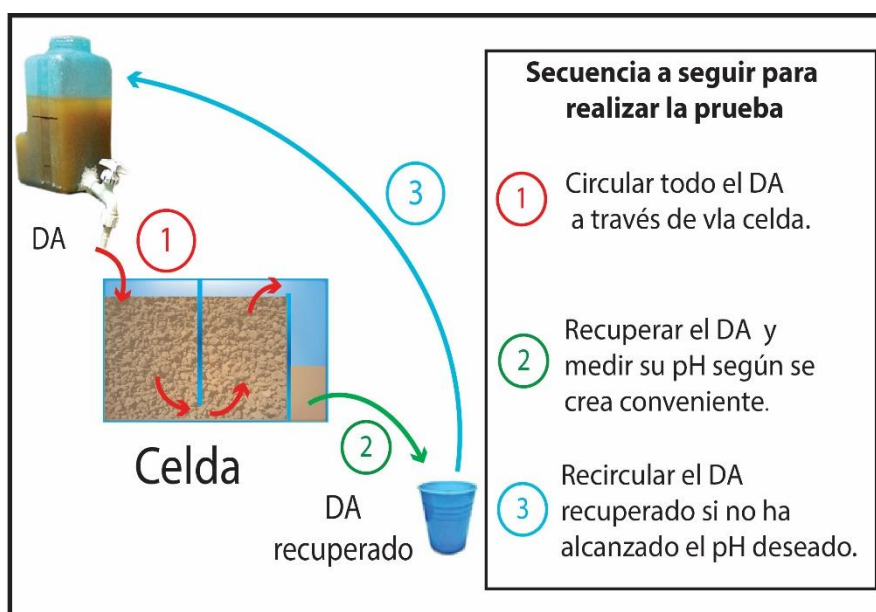


Figura 19. Procedimiento general que se realizó para la segunda prueba

La solución tratada con filita (2.9 L) se recirculó a través de una celda con 1.9 kg de caliza a un flujo promedio de 400 mL/min (Figura 19). Se realizaron 15 ciclos midiendo su tiempo de residencia, de los cuales en los ciclos 9, 11 y 15 se midieron pH y C.E.



Figura 20. Circulación del DA a través de la celda empacada con roca caliza

### 5.5.3 Tercera Prueba

Se recircularon 5 L de DA, con un pH inicial de 2.13, a través de una celda empacada con 4.73 kg de filita a una velocidad de flujo promedio de 434 mL/min sin eliminar DA alguno como se realizó en la segunda prueba. Se hicieron 24 ciclos midiendo el tiempo que tardó cada uno de ellos. En los ciclos 4, 8, 13, 16 y 24 se tomaron 100 mL de la solución para medir valores de pH, C.E. y mandarse a analizar.



Figura 21. Recirculación de DA a través de la celda empacada con roca filita y su posterior recuperación

La solución tratada con filita (4.23 L), con un pH inicial de 3.7, se recirculó a través de una celda empacada con 4.56 kg de caliza a un flujo promedio de 510 mL/min. Se realizaron 80 ciclos midiendo el tiempo en que tardó cada uno de ellos. En los ciclos 8, 16, 32, 64 y 80 se tomaron 100 mL de la solución para medir valores de pH, C.E. y mandarse a analizar.

Los sedimentos que se formaron dentro de las celdas de filita y caliza, fueron separados y puestos a secar durante una semana para mandarse a analizar.

#### 5.5.4 Cuarta Prueba

Se estableció la abertura de la válvula buscando obtener flujos lentos (8 mL/min aproximadamente) para adicionar el DA a la celda y procurar obtener el tiempo de residencia estimado en las pruebas anteriores.

En la celda empacada con 4.89 kg de filita se adicionaron 4.2 L de DA (con un pH inicial de 2.19) a una velocidad de flujo promedio de 8 mL/min. El procedimiento realizado se ilustra en la Figura 22. Se tomó el tiempo que tardó en circular el DA a través de la celda. Una vez terminado el único ciclo, se tomaron 100 mL de solución para medir valores de pH y C.E.

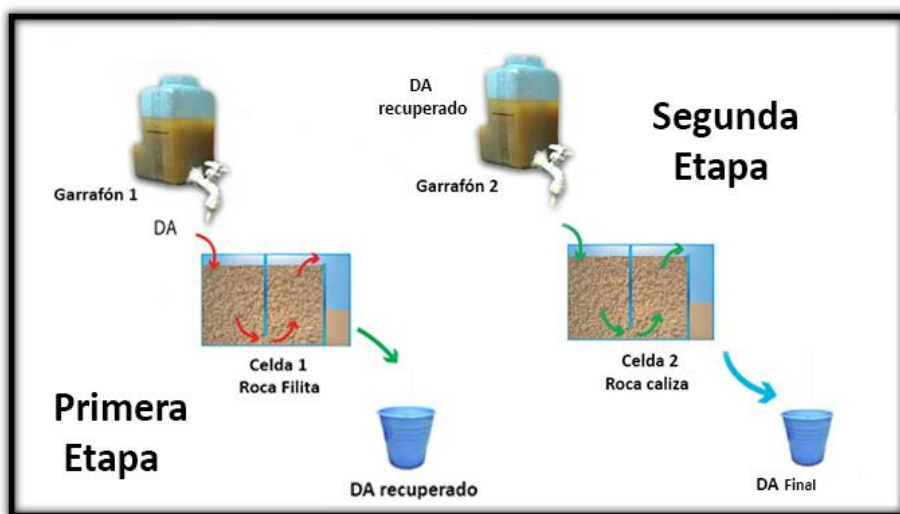


Figura 22. Procedimiento que se siguió para la adición del DA

No se continuó con la adición del DA a través de la celda empacada con roca caliza debido a que se presentó un problema de disminución de pH en la solución tratada con filita que fue reportado en los resultados.

#### 5.5.5 Quinta Prueba

Se circuló 5.5 L de DA (con un pH inicial de 2.08) a través de una celda empacada con 4.71 kg de roca filita a una velocidad de flujo promedio de 5 mL/min. Durante la prueba se tomó el tiempo que tardó en completarse el ciclo. Una vez transitado los 5.5 L, se separó una muestra de 100 mL para medir valores de pH y C.E.



La solución tratada con filita se hizo pasar a través de una celda empacada con 4.44 kg de caliza a una velocidad de flujo promedio de 1.5 mL/min, midiendo el tiempo de recorrido de todo el volumen (Figura 23). Al final de la prueba, se tomaron 100 mL de la solución tratada para medir valores de pH y C.E.

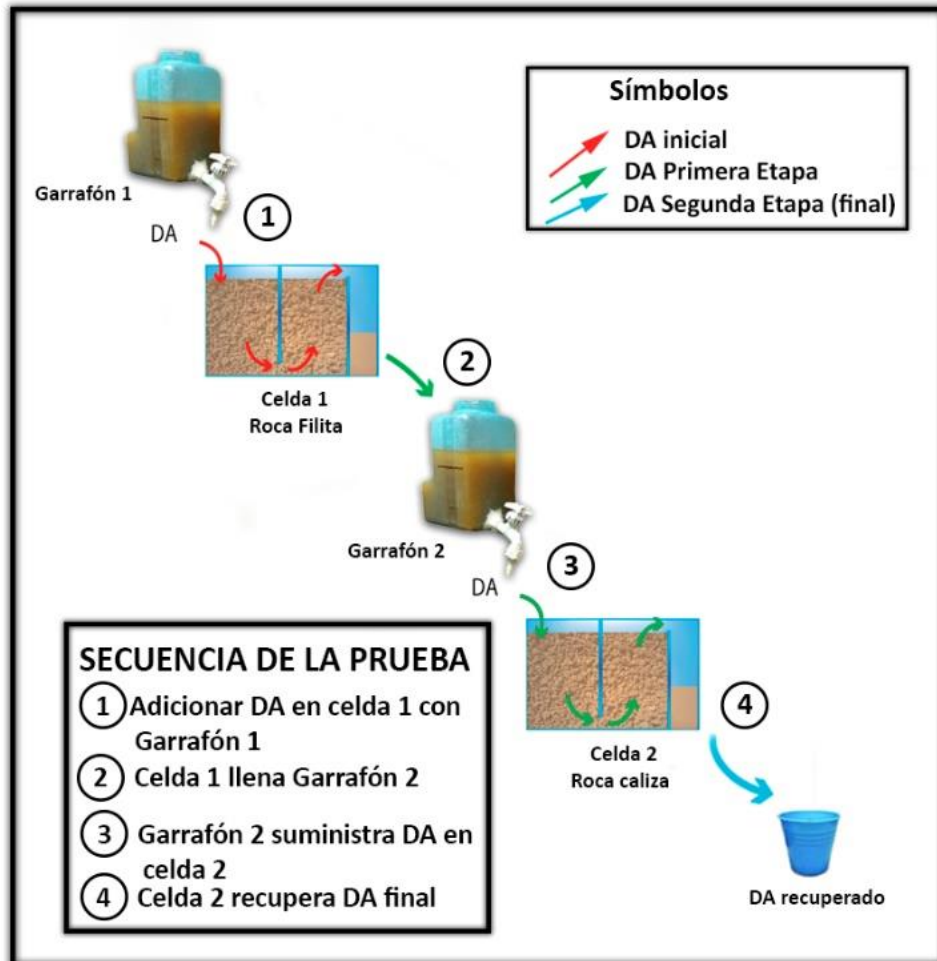


Figura 23. Procedimiento general realizado en la quinta prueba

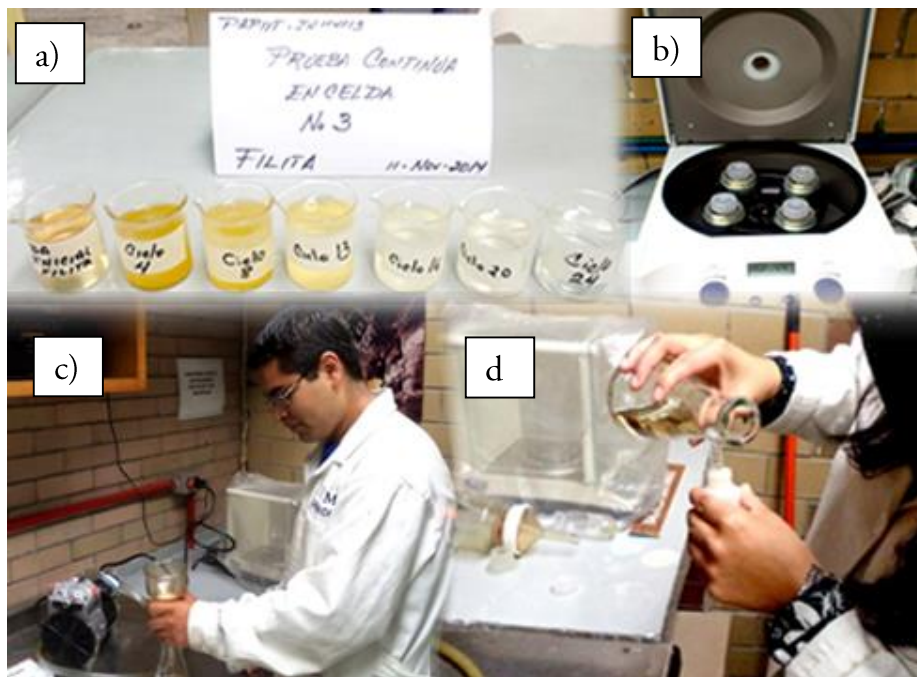
## 5.6 MANEJO DE MUESTRAS PARA ANALIZAR

La preparación de las muestras para ser analizadas se centró en dos procesos, la centrifugación y filtrado.

Para centrifugar se usó el equipo Eppendorf Centrifuge 5702 a una velocidad de 4,000 rpm durante 15 minutos por cada 4 muestras, colocadas dentro unos recipientes en forma de capsula (viales).

Este proceso tuvo como finalidad la deposición de la mayoría de las partículas en suspensión de cada muestra. Terminado esto se continúa con la filtración.

Para la filtración de las muestras se emplearon membranas de nailon con un diámetro de 47 mm y un tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ , insertadas en un embudo filtrador conectado a un matraz Kitazato y, por medio de una bomba conectada al matraz, generarle un vacío para obtener la solución filtrada y así almacenarlo en envases que se entregaron al laboratorio de geoquímica ambiental.



**Figura 24.** Preparación las muestras de las diferentes pruebas continuas, a) Muestras obtenidas en los ciclos, b) Centrifugación, c) Filtrado, d) Inserción de muestras en recipientes

---

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 PRUEBA ORIENTATIVA

Los resultados obtenidos de la prueba orientativa se registraron en tablas (Tablas A1 y A2 del Anexo) y mostraron el siguiente comportamiento:

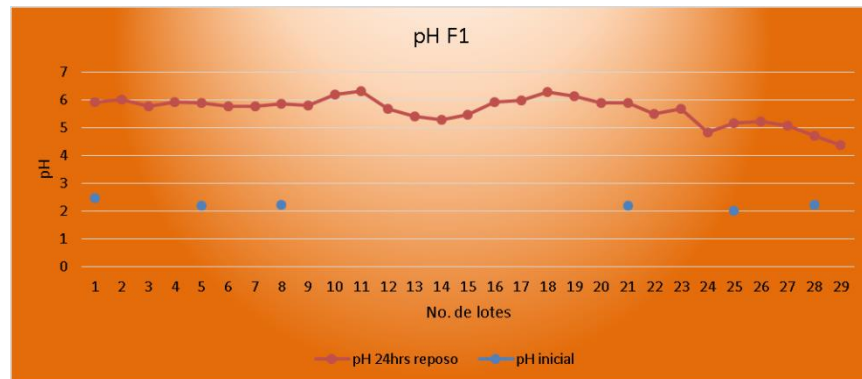


Figura 25. Comportamiento del rendimiento de la roca F1 para neutralizar DA

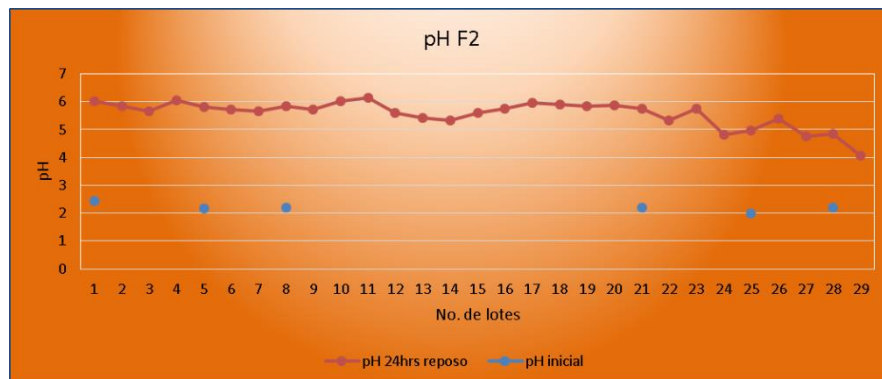


Figura 26. Comportamiento del rendimiento de la roca F2 para neutralizar DA

En las figuras anteriores se observa un incremento del pH conforme se fueron realizando las adiciones de DA en los vasos. El primer lote incrementó su pH de 2.45 a 5.9 para F1 y de 2.45 a 6.02 para F2 en un tiempo de 24 horas; el mayor incremento de pH fue de 6.3 en el lote 11 de F1 y se terminaron los cambios de DA en el lote 29 ya que arrojaron valores de pH de 4.38 y 4.07 en F1 y F2 respectivamente.

Precipitaron hidróxidos de hierro de manera paulatina sobre la superficie de la roca, también se observó que cuando esto sucedió se presentó una disminución de la eficiencia de neutralización de la roca.

Se obtuvieron un total de 29 lotes en los vasos, haciendo la estimación de que por cada 200 g de filita se puede incrementar el pH de la solución a valores entre 4.07 y 6.3 de 2.9 L de DA con un tiempo de residencia de 24 horas.

## 6.2 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

### 6.2.1 Velocidades Promedio

Los resultados obtenidos durante las pruebas de medición de la velocidad de flujo en cada una de las diferentes marcas establecidas fueron registrados y ordenados (ver Tablas A3, A4 y A5 del Anexo) y se obtuvieron flujos promedio en cada una de las marcas como se muestra en la Tabla 1. Estos flujos se tomarán en cuenta para la circulación del DA dentro de las celdas de tratamiento.

Tabla 1. Flujos promedio del garrafón a emplear para el suministro de DA a la celda

Flujo promedio (ml/min)		
Marca 1	Marca 2	Marca 3
152	402	747

### 6.2.2 Dirección de Flujo en Celdas con Trazador

Durante la prueba se dejó correr el agua a través de la celda con el trazador en la porción izquierda para observar el flujo por un costado de la celda; se pudo apreciar el recorrido esperado, primero en forma descendente en el primer módulo y posteriormente ascendente en el segundo. También se observó que el recorrido del trazador solo fue por el costado izquierdo como se puede ver en la Figura 27.

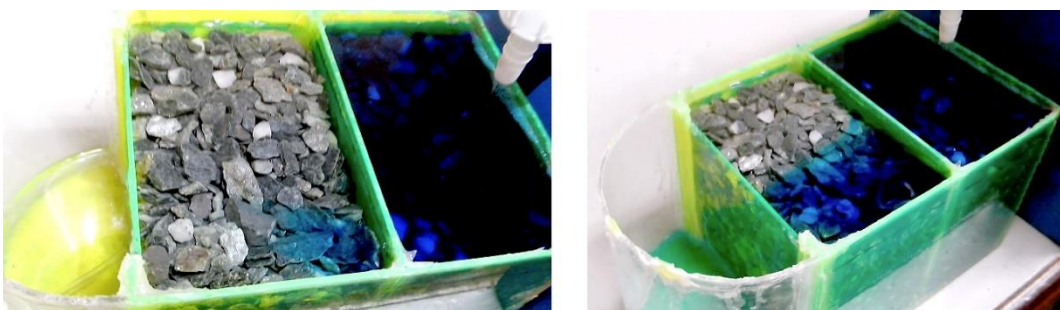


Figura 27. Salida del trazador después de fluir a través de la roca

Se le adicionó más trazador en el costado derecho de la celda. El agua suministrada por el garrafón a la celda siguió su trayectoria como se había planeado, de forma descendente, ascendente y depositada en el receptáculo, siendo extraída por la manguera hacia la cubeta (Figura 28).

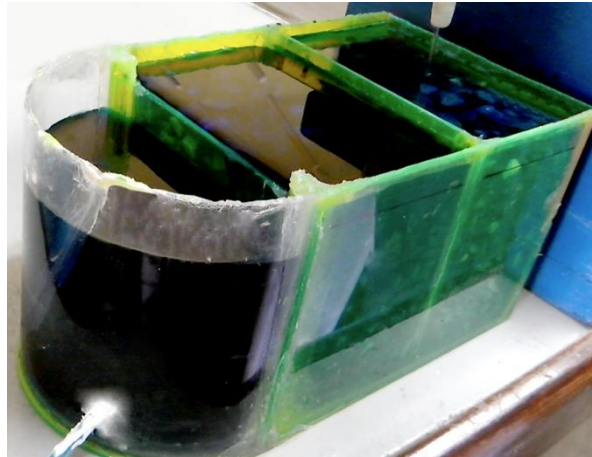


Figura 28. Término de la prueba con trazador

La mejor área para adicionarle agua es por la parte central de la primera división de la celda (Figura 29) ya que así se obtendrá una distribución más homogénea a través de toda la roca.



Figura 29. Celda de tratamiento empacada con roca filita

### 6.3 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN DE DA

#### 6.3.1 Primera Prueba

Con la filita se hicieron 5 ciclos y se obtuvo al final del quinto ciclo un incremento del pH a 4.34 en un tiempo de residencia de 4.6 horas como se puede ver en la Tabla 2. Se muestra además el volumen de DA que se fue eliminando en cada ciclo, el volumen inicial y final de cada ciclo, y el valor de pH y CE alcanzados en cada uno de ellos.

Tabla 2. Comportamiento del DA con roca filita en la primera prueba

Ciclo	Tiempo de Ciclo (min)	Vol. Eliminado	DA	Vol (ml)	pH	C.E.
1	70.43	1,840	Inicial	13,300	2.54	10.2
			Final	11,300	2.76	10.16
2	40.88	1,730	Inicial	11,300	2.76	10.16
			Final	9,240	2.86	10.12
3	71.38	1,640	Inicial	9,240	2.86	10.12
			Final	7,580	3.1	9.57
4	58.07	1,660	Inicial	7,520	3	9.7
			Final	5,620	3.64	8.97
5	37.4	1,680	Inicial	5,620	3.64	8.97
			Final	3,880	4.34	8.73

Con la roca caliza se hicieron cuatro ciclos para alcanzar un valor de pH de 6.65 en un tiempo de residencia de 2.3 horas como se puede ver en la Tabla 3, mostrando el tiempo por ciclo, el volumen eliminado en cada uno de ellos, el DA inicial y final así como los valores de pH y C.E.

Tabla 3. Comportamiento del DA con roca caliza en la primera prueba

Ciclo	Tiempo de Ciclo (min)	Vol. Eliminado	DA	Vol (ml)	pH	C.E.
1	54.06	675	Inicial	3,880	5.07	8.69
			Final	2,980	5.1	8.62
2	38.42	740	Inicial	2,980	5.1	8.62
			Final	2,120	5.86	8.62
3	28.9	610	Inicial	2,120	5.86	8.62
			Final	1,350	6.53	8.51
4	18.62	780	Inicial	1,350	6.55	7.75
			Final	490	6.65	7.16

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones de Al, Fe, Cu, Cd, Mn y Zn obtenidas de la solución de cada ciclo. Los porcentajes de remoción que se obtuvieron en esta prueba con el uso de roca filita fueron del 50% para Al, 98% para Fe y 38% para Cu. El Cd, Zn

y Mn presentaron un ligero incremento de su concentración inicial del 8%, 7% y 18% respectivamente (muestras 1AF-1 a 1AF-5).

**Tabla 4.** Concentraciones de los elementos contenidos en el DA de la primera prueba

Muestra	pH	Al mg/l	Fe mg/l	Cu mg/l	Cd mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
<b>INICIAL F</b>	<b>2.54</b>	<b>164.52</b>	<b>429.41</b>	<b>18.12</b>	<b>3.39</b>	<b>27.52</b>	<b>438.00</b>
<b>1 AF 1</b>	<b>2.76</b>	<b>156.62</b>	<b>255.31</b>	<b>16.59</b>	<b>3.36</b>	<b>28.11</b>	<b>440.41</b>
<b>1 AF 2</b>	<b>2.86</b>	<b>158.54</b>	<b>167.62</b>	<b>16.64</b>	<b>3.43</b>	<b>28.07</b>	<b>431.80</b>
<b>1 AF 3</b>	<b>3.10</b>	<b>152.10</b>	<b>60.65</b>	<b>16.48</b>	<b>3.63</b>	<b>30.92</b>	<b>461.95</b>
<b>1 AF 4</b>	<b>3.64</b>	<b>111.99</b>	<b>7.69</b>	<b>12.73</b>	<b>3.53</b>	<b>31.52</b>	<b>465.05</b>
<b>1 AF 5</b>	<b>4.34</b>	<b>82.05</b>	<b>6.46</b>	<b>11.18</b>	<b>3.67</b>	<b>32.48</b>	<b>470.42</b>
<b>1 AC 1</b>	<b>5.10</b>	<b>8.34</b>	<b>3.80</b>	<b>7.16</b>	<b>3.47</b>	<b>33.01</b>	<b>471.09</b>
<b>1 AC 2</b>	<b>5.86</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>2.91</b>	<b>2.96</b>	<b>30.88</b>	<b>450.27</b>
<b>1 AC 3</b>	<b>6.53</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>0.67</b>	<b>2.65</b>	<b>28.62</b>	<b>420.47</b>
<b>1 AC 4</b>	<b>6.65</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>&lt;LD</b>	<b>1.99</b>	<b>24.01</b>	<b>375.86</b>

*AF (Muestras de Filita), AC (Muestras de caliza)*

*LD (Límite de Detección mg/l), Al = 0.08, Fe = 0.01, Cu = 0.122, Cd = 0.02, Mn = 0.007, Zn = 0.007*

Con el empleo de caliza (muestras 1AC-1 a 1AC-4) se tuvo la remoción total de Fe, Cu y Al. El Cd, Zn y Mn contaron con un porcentaje de remoción del 43%, 20% y 27% respectivamente cuando se llegó a un valor de pH de 6.65. La remoción de estos metales divalentes pueden darse por precipitación en forma de hidróxidos (Younger, 2002), sin embargo otros autores como Cravotta y Trahan (1999) y Romero et al. (2007) señalan que la remoción de estos elementos puede ocurrir por fenómenos de adsorción o coprecipitación en los hidróxidos de hierro; o bien también pueden quedar adsorbidos en la superficie de la calcita como lo reporta Zachara, et al. (1991). Por otro lado, Younger (2002) señala que la precipitación del Zn y Mn como hidróxidos ocurren a  $\text{pH} > 8$  por lo que es posible que la remoción de estos elementos sea por adsorción sobre la calcita.

Haciendo una comparativa con los resultados obtenidos por Goslinga (2015) en sus pruebas de agitación se observa que se logró un menor porcentaje de remoción de los elementos debido a que Goslinga (2015) manejó mayor tiempo de reacción entre el DA y la roca, una menor granulometría y al estar en agitación, esto produce la aceleración de la cinética de reacción.

Con la ecuación de la Figura 30, obtenida a partir de los resultados de la caliza, se puede proyectar la cantidad de ciclos requeridos para obtener un pH de 7.5, dando un total de 10 ciclos. Si 4 ciclos se tardaron 2.3 horas en recorrer la celda, 10 ciclos tardará alrededor

de 6 horas, datos tomados de la relación lineal que presenta el comportamiento del incremento del pH con la roca caliza.

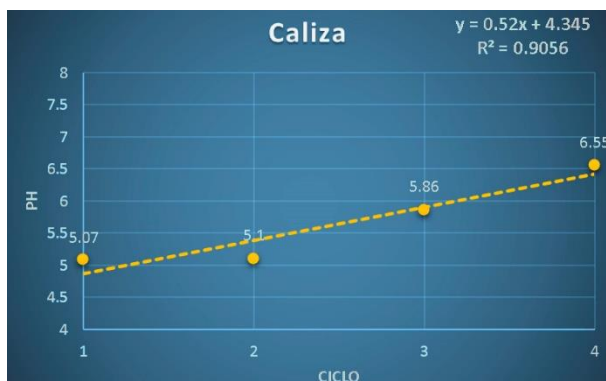


Figura 30. Comportamiento del pH tras cuatro ciclos empleando roca caliza

### 6.3.2 Segunda Prueba

Se llegó a un pH de 4.16 en un tiempo de residencia de 1.8 horas con el uso de la filita. Después con caliza se obtuvo un tiempo de residencia de 1.8 horas para lograr un pH de 5.17. El comportamiento del incremento de pH fue graficado en la Figura 31, siendo de forma lineal.

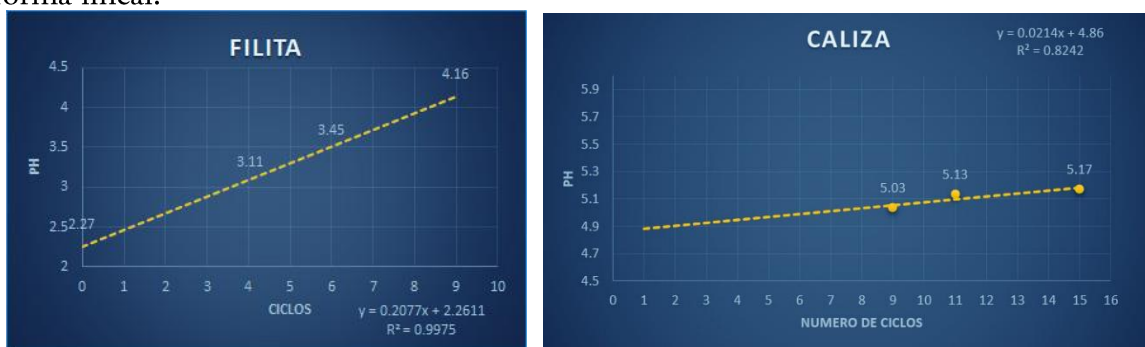


Figura 31. Comportamiento lineal del incremento del pH del DA empleando filita y caliza

Con la ecuación de la recta se logró determinar la cantidad de ciclos requeridos para elevar el pH a 7.5 usando la caliza, dando un valor de 125 ciclos con un tiempo de residencia 14.6 horas.

### 6.3.3 Tercera Prueba

Se hicieron 24 ciclos en un tiempo total de residencia de 4.6 horas, se incrementó el pH a 4.5 empleando filita y después a 6.5 con la caliza haciendo 80 ciclos en un tiempo total



de 11 horas. Se observó el mismo comportamiento en el incremento del pH de forma gradual (Tabla 5) y sobre la formación de precipitados en la superficie de las rocas conforme se incrementó el pH (Figura 32).



**Figura 32.** Formación del precipitado de oxihidróxidos de hierro durante la prueba

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los análisis de las muestras de solución, comprobando que al incrementarse el pH hay remoción de metales disueltos en el DA (tomando como valores iniciales la muestra 3AF-0), observando los resultados con la filita, se tuvo una remoción del 80% de Al (de 158.15 mg/l a 31.39 mg/l), 3% de Fe (de 584.56 mg/l a 565.19 mg/l) y 52% de Cu (de 19.04 mg/l a 9.16 mg/l)

**Tabla 5.** Concentraciones de los elementos contenidos en el DA de la tercera prueba

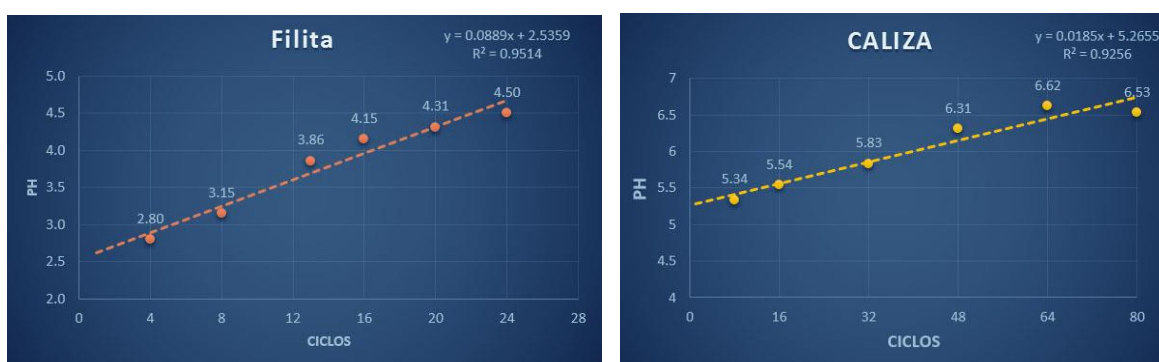
Muestra	pH	Al mg/l	Fe mg/l	Cu mg/l	Cd mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
3AF-00	2.13	158.15	584.56	19.04	9.36	66.18	392.05
3AF-04	2.73	138.36	646.69	17.2	8.84	64.77	387.21
3AF-08	3.02	127.35	576.54	16.45	8.88	66.34	392.15
3AF-13	3.68	98.68	589.4	14.71	8.93	66.44	395.35
3AF-16	3.98	71.15	546.38	12.3	8.14	61.86	378.04
3AF-20	4.2	22	559.66	10.76	9.12	68.72	391.75
3AF-24	4.4	31.39	562.19	9.16	8.5	65.24	388.63
3AC-08	5.33	0.88	415.6	2.57	7.34	70.95	378.44
3AC-16	5.45	0.22	315.49	1.07	7.07	72.9	374.12
3AC-32	5.63	0.1	169.08	0.38	7.12	81.35	382.84
3AC-48	6.21	<LD	<LD	<LD	6.01	80.77	360.36
3AC-64	6.45	<LD	<LD	<LD	5.35	77.35	344.5
3AC-80	6.62	<LD	<LD	<LD	5	76.52	335.82

AF (Muestras de Filita), AC (Muestras de caliza)

LD (Límite de Detección mg/l), Al = 0.08, Fe = 0.01, Cu = 0.122, Cd = 0.02, Mn = 0.007, Zn = 0.007

En las concentraciones de Cd, Mn, Zn no hay cambio a  $\text{pH} < 5$ , pero conforme éste se incrementa con la caliza, hay una disminución en la concentración de estos elementos y al  $\text{pH}$  6.62 alcanzado en esta prueba se obtuvo 47% de remoción de Cd, 14% de Zn y un ligero incremento del 16% de Mn, posiblemente por la disolución del Mn que contenía la caliza, ya que se presentó un incremento en los resultados obtenidos en las pruebas de agitación de Goslinga (2015), incrementos que después fueron reduciéndose conforme se incrementó el  $\text{pH}$  de la solución por arriba de 7.

Se mostró el mismo comportamiento lineal en el incremento del  $\text{pH}$  que ha tenido en las dos pruebas anteriores empleando filita y caliza como se ilustra en la Figura 33.



**Figura 33.** Comportamiento lineal del incremento de  $\text{pH}$  con uso de filita y caliza

Calculando la ecuación de la recta para la caliza, se puede hacer una estimación del tiempo de residencia necesario para elevar el  $\text{pH}$  a un valor deseado. Considerando un valor final de 7.5, al sustituirlo en la ecuación dio como resultado un total de 121 ciclos a lo que sería un tiempo de residencia estimado de 17 horas.

Teniendo tres pruebas continuas realizadas, se hizo un análisis de los resultados obtenidos en cada una de ellas (Tabla A11 del Anexo), particularmente tiempos de residencia, velocidad de flujos y valores de  $\text{pH}$  iniciales y finales. El análisis permitió establecer los parámetros a emplear en las siguientes pruebas.

### 6.3.4 Cuarta Prueba

A través de las paredes de la celda se vio la formación paulatina del precipitado que recubre a las rocas en su superficie (Figura 34).



**Figura 34.** Precipitados de hidróxidos y oxihidróxidos de hierro dentro de la celda de tratamiento. Durante las primeras 4 horas de tratamiento con filita, se midió el pH de la solución dando un valor de 3.98 y se dejó terminar la circulación de todo el DA a través de la celda. La medición del pH de la solución final se realizó al día siguiente de haber realizado la prueba, dejando reposar la solución tratada con el sedimento precipitado.

El pH medido arrojó un valor de 2.27. Una posible causa de lo ocurrido lo menciona Younger (2002) quien dice que los oxihidróxidos de hierro, al estar en contacto con agua se hidrolizan, produciendo la liberación de iones  $H^+$  quienes son los responsables de la disminución del pH de la solución.

Para evitar la hidrólisis de los oxihidróxidos de hierro se pensó en hacer las siguientes pruebas de manera continua, es decir, una vez que el DA sea tratado con filita, enseguida se circulará dicha solución a través de caliza.

### 6.3.5 Quinta Prueba

Se buscó tener flujos más lentos para obtener el tiempo de residencia estimado en las pruebas anteriores (1 a 3) con cada tipo de roca, sin embargo se tuvieron problemas para controlar la velocidad de flujo requerida con la válvula de los garrafones e inclusive los sólidos suspendidos bloquearon la salida del DA a través de la válvula y por tanto no se pudo tener los tiempos de residencia estimados.

Se dejó continuar la prueba hasta el final, obteniendo tiempos de residencia muy largos (39 horas) que no fueron consistentes con las estimaciones determinadas en las pruebas

anteriores, así que se decidió hacer pruebas en vasos de precipitados con filita y caliza, dejando en reposo el DA el tiempo estimado, filita 6 horas y caliza 24 horas. Transcurridas las 6 horas, se separó la solución de la filita, se midieron los valores de pH y CE, y se agregó la solución a un vaso con caliza dejándolo 24 horas, al final se miden los mismos parámetros, dando los resultados esperados (Tabla 6), se observa un incremento del pH con filita de 2.19 a 5.66 y con caliza de 5.66 a 6.49 comprobando que los tiempos de residencia son suficiente para neutralizar la solución.

**Tabla 6.** Incrementos de pH empleando roca filita y caliza en vasos de precipitados

Valores	DA inicial	DA con Filita	DA con Caliza
pH	2.19	5.66	6.49
C.E.	12.93	9.88	7.35
Tiempo de residencia	0	6 horas	24 horas

La prueba 4 y esta última de los vasos permitieron determinar que es necesario que el tratamiento con las dos rocas sea continuo, porque al no alcanzarse con la filita valores de pH mayores a 5, se produce la hidrólisis de los hidróxidos de hierro y disminuye nuevamente el pH de la solución.

Con el tamaño de la celda y con la regulación del flujo por medio de la válvula del garrafón, no fue posible controlar el flujo para tener los tiempos de residencia deseados. Se trató de hacer una sexta prueba pero nuevamente no se logró controlar el flujo por medio de la válvula. Es necesario que en pruebas posteriores se utilice una bomba que permita regular el flujo y se construya una celda de mayor capacidad para alcanzar los tiempos de residencia estimados.

### 6.3.6 Composición de sedimentos

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las concentraciones de Cu, Mn, Fe y Zn en los sedimentos de las pruebas 1 y 3. Se muestran primero las concentraciones iniciales de la roca filita y de la caliza para que se tomen como referencia. Las muestras 1AF sed y 1AC sed son los sedimentos obtenidos en la primera prueba con la filita y la caliza respectivamente. Se observa que en la filita hay un enriquecimiento significativo de hierro principalmente, y en la caliza es donde se concentra una mayor proporción de Cu, Mn y Zn. Las muestras 3AF sed y 3AC sed corresponden a los sedimentos de la filita y caliza de la tercera prueba respectivamente; también se observa el enriquecimiento de hierro en

el sedimento de la filita y una mayor retención de Cu, Mn y Zn en el sedimento de la caliza.

Lo ocurrido con la filita se puede explicar debido a la formación de hidróxidos de hierro que tienen la tendencia de retener algunos metales pesados por medio de fenómenos de adsorción o coprecipitación (Holmtrön y Öhlander, 2001).

En el caso de la caliza, Comans y Middelburg (1987) realizaron experimentos para comprobar la adsorción de metales traza en la superficie del mineral calcita, obteniendo resultados de la adsorción de metales tales como Cd, Mn, Zn y Co, todos en su forma divalente. Éste fenómeno puede ser la explicación de la retención de metales que se observaron en los sedimentos de la caliza.

**Tabla 7.** Concentraciones de elementos traza de la roca original y de los sedimentos obtenidos después de la neutralización

Muestra	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Fe %	Zn %
Filita	57.54	235.44	1.38	0.02
Caliza	51.50	835.68	1.01	0.01
1AF sed	96.36	381.70	23.20	1.00
1AC sed	1,096.01	836.44	2.36	10.48
3AF sed	448.36	247.49	14.31	1.23
3AC sed	600.18	996.56	8.15	9.05

---

## CONCLUSIONES

Las pruebas demostraron que se puede neutralizar el DA al pasar a través de las rocas, siempre que se procure un tiempo de residencia suficiente para que se lleve a cabo la reacción de neutralización. Con la filita es posible elevar el pH a valores entre 4.16 y 4.34 logrando remover concentraciones entre el 50% al 80% de Al, entre el 3% al 98% de Fe y entre el 38% al 52% de Cu; la precipitación total de estos elementos se da a valores mayores a 5. Con la caliza se incrementó el pH entre 6.65 y 6.62, removiendo del 47% al 50 % de Cd y entre el 14% y 15% de Zn. En el caso del Mn no fue posible su eliminación a los valores de pH alcanzados.

El sistema dinámico (agitación) que empleó Goslinga (2015), a pesar de que cuenta con mejores resultados de remoción e incrementos de pH, no es posible llevarlo a su aplicación en la mina, por lo que se decidió optar por un sistemas de tratamiento pasivo, con el empleo de roca calcárea haciendo circular el DA a través de dicho sistema, logrando la remoción de metales en suspensión e incremento del pH de la solución.

Con los resultados obtenidos en cada prueba se estimó el tiempo de residencia para cada tipo de roca y lograr alcanzar valores de pH deseados, se determinó un tiempo de 6 horas con la filita para alcanzar un pH de 5 y un tiempo de 24 horas con la caliza para tener valores de pH > 7.

La formación del recubrimiento de oxihidróxidos de hierro sobre la superficie de la roca limitó la disolución de la calcita y provocó un incremento en el tiempo de residencia del DA en la celda. Los sedimentos formados no provocaron obstrucción alguna en los poros de la roca ya que se observó su traspotación con el flujo a través de la celda.

Los análisis de los sedimentos mostraron una acumulación de metales divalentes (Cu, Zn y Mn) que de acuerdo con la literatura pueden estar adsorbidos en la superficie de la calcita. Por otro lado, la mayor acumulación de Fe y Al se presentó en los sedimentos que se obtuvieron de la filita. Elementos tales como el Cd y Zn se encontraron en los sedimentos de la caliza.

Al contar con la formación de los sedimentos sobre la superficie de la roca, se presenta la necesidad de remover del sistema los sedimentos, ya que limitan la vida útil de las rocas y obstruyen el flujo del DA a través de ellas, lo que ocasiona un incremento en los tiempos de residencia.

---

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas a mayor escala con los tiempos de residencia estimados para cada tipo de roca y buscar el mecanismo para remover los sedimentos de la celda y lograr alargar la vida útil de la roca.

Para diseñar un tratamiento pasivo empleando las rocas con poder de neutralización ya evaluadas se requiere tomar en cuenta las velocidades de flujo que se presentan en la mina, las áreas en las cuales se hará la instalación así como los espacios disponibles para alcanzar los tiempos de residencia que se requieren en cuanto a la neutralización del DA con cada tipo de roca.

---

## REFERENCIAS

- Alcolea A., Vázquez M., Caparrós A., Ibarra I., García C., Linares R., Rodríguez R. 2012. Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel. Mineral Engineering 26 (2012) 86 – 98.
- Cervantes, A.H., 2014, Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo: Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 64.
- Comans, R. N. J., and Middelburg, J. J., 1987, Sorption of trace metals on calcite: Applicability of the surface precipitation model: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 51, p. 2587 – 2591.
- Conagua, 2008, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 1509 Temascaltepec, Estado de México: Comisión Nacional del Agua. Diciembre 2014. ([http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR\\_1501.pdf](http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_1501.pdf))
- Cravotta, A., and Trahan, M.K., 1998, Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage: Applied Geochemistry, v. 14, p. 581 – 606.
- EPA, 1983, Neutralization of Acid Mine Drainage. Industrial Environmental Research Laboratory: Environmental Protection Agency, p. 7 – 11, 13 – 57, 71 – 93.
- Gibert, O., Rötting T., Cortina J. L., Pablo J., Ayora C, Carrerac J. and Bolzicob J., 2011, In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain): Journal of Hazardous Materials, v. 191, p. 287 – 295.
- Goslinga J.A., 2015, Evaluación de la capacidad de tres tipos de rocas para neutralizar el drenaje ácido generado en una mina: Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 73.
- Hernández J.A., 2015, Evaluación de la eficiencia de neutralización de drenaje ácido y remoción de metales pesados, mediante pruebas de agitación con rocas carbonatadas: Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 83.
- Holström, H., y Öhlander B., 2001, Layers rich in Fe – and Mn – oxyhydroxides formed at the tailings – pond water interface, a possible trap for trace metals in flooded mine tailings: Journal of Geochemical Exploration, v. 74, p. 189 – 203.



- Isidro, M.G., 2014, *Determinación de la infiltración en suelo y permeabilidad y fracturamiento en roca para conocer patrones de escurrimiento en la mina Tizapa*: Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 73.
- Johnson, B. D., y Halberg, B. K., 2005, *Acid mine drainage remediation options: a review*: Science of the Total Environment, v. 338, p. 3 – 14.
- Jung Ch.M., 2001, *Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au–Ag mine, Korea*: Applied Geochemistry, v. 16, p. 1369 – 1375.
- Jurjovec J., Ptacek J. Carol, Blowes W. David., 2002, *Acid neutralization mechanisms and metal release in mine tailings: A laboratory column experiment*: Geochimica et Cosmochimica Acta. v. 66, p. 1511 – 1523.
- Labastida, I., Armienta, M.A., Lara – Castro, R.H., Aguayo, A., Cruz, O., Cenicerros, N., 2013, *Treatment of mining acidic leachates with indigenous limestone, Zimapan Mexico*: Journal of Hazardous Materials, v. 262, p. 1187 - 1195.
- López, E., Aduvire O., y Baretino, D., 2002. *Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro*: Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21 ISSN: 0366-0176.
- Lorens, R., 1891, *Sr, Cd, Mn and Co distribution coefficients in calcite as a function of calcite precipitation rate*: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 45, p. 553 – 561.
- Lottermoser, B.G., 2010, *Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*. Springer 3th ed. Berlin Heidelberg, New York., Pp. 46-53, 70-77, 130-132.
- Macías F., Caraballo, A. M., Pérez – López R., Nieto, J. M., Rötting T., Ayora, C., 2012, *From highly polluted Zn-rich acid mine drainage to non-metallic waters: Implementation of a multi-step alkaline passive treatment system to remediate metal pollution*: Science of the Total Environment, v. 433, p. 323 – 330.
- Macías F., Caraballo, A. M., Nieto, J. M., Rötting T., Ayora, C., 2012, *Natural pretreatment and passive remediation of highly polluted acid mine drainage*: Journal of Environmental Management v. 104, p. 93 – 100.
- Minera Tizapa, Plano General Mina, 2013, Dibujó: M. Rodríguez, Responsable: M. Rodríguez.

Neri, A., 2014, *Medición del volumen de drenaje ácido generado en la mina Tizapa y propuesta de manejo para su posterior tratamiento*: Tesis profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 65.

Robinson - Lora M. A., Brennan A. Rachel., 2009, *Efficient metal removal and neutralization of acid mine drainage by crab-shell chitin under batch and continuous-flow conditions*: Bioresource Technology, V. 100, p. 5063 – 5071.

Romero F. M., Núñez L., Gutiérrez E. M., Armienta A. M., Cenicerros – Gómez E. A. 2011, *Evaluation of the Potential of Indigenous Calcareous Shale for Neutralization and Removal of Arsenic and Heavy Metals From Acid Mine Drainage in the Taxco Mining Area, Mexico*: Arch Environ Toxicol, v. 60, p. 191 -203.

Romero M. F., Armienta A. M. González – Hernández G., 2007, *Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico*: Applied Geochemistry, v. 22, p. 109 – 127.

Santomartino S., y Webb, J., 2007, *Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron*: Applied Geochemistry, v. 22, p. 2344 -2361.

Younger, P.L., Banwart, S.A., & Hedin, R.S., 2002, *Mine water; Hidrology, Pollution, Remediation*: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 311-396.

Zachara, J. M., 1988, *The mechanism of Zn<sup>2+</sup> adsorption on calcite*: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 52, p. 2281 – 2291.

Ziemkiewicz, P.D., Skousen J.G., Brant D.L., Sterner P.L., Lovett R. J., 1997, *Acid Mine Drainage Treatment with Armored Limestone in Open Limestone Channels*: J. Environ. Qual. v. 26, p. 1017 – 1024 (1997).

Imágen de PRB, Página web: Powellassociates

<http://www.powellassociates.com/PAServices/PAservices/PRBillustration/files/prbcolor3dremediation.png>

<http://es.scribd.com/doc/29461552/Tratamiento-de-Aguas-Acidas-de-Mina#scribd,13-10-2015/10:32>

---

## ANEXO

### Prueba Orientativa

Muestra DA6 F1			
No. Lote	pH inicial	pH	C.E.
1	2.45	5.9	8.24
2		6.01	8.73
3		5.77	9.38
4		5.91	8.72
5	2.17	5.89	9.22
6		5.77	9.15
7		5.75	9.14
8	2.21	5.85	9.38
9		5.78	10.24
10		6.17	-
11		6.3	10.2
12		5.66	10.29
13		5.4	-
14		5.28	9.79
15		5.47	9.31
16		5.91	9.04
17		5.98	9.4
18		6.28	9.79
19		6.13	9.78
20		5.88	9.78
21	2.19	5.89	9.4
22		5.5	9.75
23		5.66	9.67
24		4.82	9.75
25	1.99	5.15	8.9
26		5.22	9.54
27		5.06	9.52
28	2.2	4.7	8.82
29		4.38	9.25

Muestra DA 6 F2			
No. Lote	pH inicial	pH	C.E.
1	2.45	6.02	8.02
2		5.85	8.74
3		5.66	9.24
4		6.04	8.44
5	2.17	5.82	9.11
6		5.73	9.05
7		5.67	9.04
8	2.21	5.83	9.2
9		5.73	9.84
10		6.03	-
11		6.15	9.94
12		5.61	10.1
13		5.41	-
14		5.34	9.74
15		5.61	8.76
16		5.74	8.96
17		5.96	9.37
18		5.9	9.7
19		5.83	9.74
20		5.87	9.62
21	2.19	5.75	9.28
22		5.33	9.83
23		5.74	9.63
24		4.83	9.73
25	1.99	4.96	9.04
26		5.39	9.48
27		4.75	10.75
28	2.2	4.84	8.79
29		4.07	9.49

Tabla A 1 y A 2. Mediciones de pH y C.E. del DA tratado con los dos tipos de roca durante 24 h.

---

## Aforos

## Primera Marca

Fecha	Prueba	Vol. Agua (mL)	tiempo (min)	Flujo (mL/min)
21-abr	Aforo 1	3000	29.55	102
21-abr	Aforo 2	105	1	105
23-abr	Aforo 1	150	1	150
23-abr	Aforo 2	140	1	140
23-abr	Aforo 3	162	1	162
23-abr	Aforo 4	125	1	125
23-abr	Aforo 5	129	1	129
17-jun	Aforo 1a	505	4.53	111
17-jun	Aforo 2a	510	3.55	144
17-jun	Aforo 1	500	2.57	195
17-jun	Aforo 2	500	2.33	215
17-jun	Aforo 3	490	2.32	211
17-jun	Aforo 4	490	3.07	160
17-jun	Aforo 5	500	2.72	184
Valor mínimo				102
Valor máximo				215
<b>Promedio</b>				<b>152</b>
<b>Mediana</b>				<b>147</b>

Tabla A 2. Medición de las diferentes velocidades de flujo en la primera marca

### Segunda Marca

Fecha	Prueba	Vol. Agua (mL)	tiempo (min)	Flujo (mL/min)
21-abr	Aforo 1	3000	7.65	392
21-abr	Aforo 2	3000	9.283	323
21-abr	Aforo 3	3000	8.9	337
21-abr	Aforo 4	3000	8.63	348
21-abr	Aforo 5	3000	9.383	320
23-abr	Aforo 1	300	1	300
23-abr	Aforo 2	530	1	530
23-abr	Aforo 3	465	1	465
23-abr	Aforo 4	410	1	410
23-abr	Aforo 5	430	1	430
17-jun	Aforo 1a	500	0.98	510
17-jun	Aforo 2a	510	1.1	464
17-jun	Aforo 1	490	1.18	415
17-jun	Aforo 2	480	1.22	393
17-jun	Aforo 3	490	1.25	392
17-jun	Aforo 4	490	1.12	438
17-jun	Aforo 5	490	0.97	505
20-jun	Aforo 1	1617	3.85	420
20-jun	Aforo 2	1595	3.57	447
20-jun	Aforo 3	1620	4.17	388
20-jun	Aforo 4	1620	4	405
20-jun	Aforo 5	1620	5.88	276
20-jun	Aforo 6	1630	4.45	366
20-jun	Aforo 7	1625	3.85	422
20-jun	Aforo 8	1625	4.22	385
20-jun	Aforo 9	1620	4.12	393
20-jun	Aforo 10	1615	4.33	373
Valor mínimo				276
Valor máximo				530
<b>Promedio</b>				<b>402</b>
<b>Mediana</b>				<b>393</b>

Tabla A 3. Medición de las diferentes velocidades de flujo en la segunda marca

### Tercera Marca

Fecha	Prueba	Vol. Agua (mL)	tiempo (min)	Flujo (mL/min)
17-jun	Aforo 1	510	0.65	785
17-jun	Aforo 2	500	0.63	794
17-jun	Aforo 3	500	0.58	862
17-jun	Aforo 4	490	0.65	754
17-jun	Aforo 5	500	0.63	794
19-jun	Aforo 1	1610	2.6333	611
19-jun	Aforo 2	1610	1.9833	812
19-jun	Aforo 3	1630	2.35	694
19-jun	Aforo 4	1620	2.08333	778
19-jun	Aforo 5	1625	2.52	645
19-jun	Aforo 1	1590	2.2	723
19-jun	Aforo 2	1580	2.28	693
19-jun	Aforo 3	1620	2.22	730
19-jun	Aforo 4	1590	2	795
19-jun	Aforo 5	1610	2.17	742
Valor mínimo				611
Valor máximo				862
<b>Promedio</b>				<b>747</b>
<b>Mediana</b>				<b>754</b>

Tabla A 4. Medición de las diferentes velocidades de flujo en la tercera marca

## Primera Prueba Continua

### Primera Etapa

Volumen de DA (mL)			
Ciclo	Inicial	Eliminado	Recuperado
1	11400	1600	9800
2	9800	1600	8200
3	8200	1600	6600
4	6600	1600	5000
5	5000	1600	3400

Tabla A 6. Obtención teórica de los volúmenes a emplear en cada ciclo

### Segunda Etapa

Volumen de DA (mL)			
Ciclo	Inicial	Eliminado	Recuperado
1	3160	740	2420
2	2420	740	1680
3	1680	740	940
4	940	740	200

Tabla A 5. Valores de DA empleados para cuatro ciclos, obtenidos de forma teórica

## Segunda Prueba Continua

### PRIMERA ETAPA

Ciclo	pH	Tiempo de flujo (min)
0	2.27	0
1		18.7
2		9.6
3		10.9
4	3.11	10.6
5		13.7
6	3.45	12.1
7		12.6
8		13.3
9	4.16	11.4
<b>Total</b>		<b>112.8</b>

Tabla A 7. Resultados del número de ciclos para elevar el pH arriba de 4

### SEGUNDA ETAPA

Ciclo	pH	Tiempo de flujo (min)
1		10.68
2		7.0
3		6.1
4		6.5
5		6.5
6		6.5
7		7.2
8		7.3
9	5.03	6.1
10		7.2
11	5.13	6.9
12		8.7
13		6.9
14		7.3
15	5.17	7.4
<b>Total</b>		<b>108.2</b>

Tabla A 8. Total de ciclos llevados a cabo con roca caliza

## Tercera Prueba Continua

### *Primera Etapa*

Ciclo	Tiempo de residencia (min)	pH		C.E.
		Azul	Blanco	
1	17.32			
2	11.52			
3	11.32			
<b>4</b>	<b>10.97</b>	<b>2.80</b>	<b>2.73</b>	<b>11.77</b>
5	11.60			
6	10.88			
7	11.63			
<b>8</b>	<b>10.87</b>	<b>3.15</b>	<b>3.02</b>	<b>11.71</b>
9	11.28			
10	10.55			
11	10.95			
12	11.40			
<b>13</b>	<b>10.43</b>	<b>3.86</b>	<b>3.68</b>	<b>10.93</b>
14	10.77			
15	11.82			
<b>16</b>	<b>11.12</b>	<b>4.15</b>	<b>3.98</b>	<b>10.69</b>
17	11.42			
18	11.53			
19	11.05			
<b>20</b>	<b>11.45</b>	<b>4.31</b>	<b>4.2</b>	<b>10.45</b>
21	11.70			
22	11.00			
23	12.57			
<b>24</b>	<b>11.13</b>	<b>4.50</b>	<b>4.4</b>	<b>10.18</b>

Tabla A 9. Resultados de la Primera Etapa con Filita



*Segunda Etapa*

Ciclo	Tiempo	pH		C.E.	Ciclo	Tiempo	pH		C.E.
		Azul	Blanco				Azul	Blanco	
1	15.27				41	7.88			
2	9.37				42	8.92			
3	8.07				43	7.73			
4	8.10				44	10.23			
5	9.10				45	10.23			
6	8.97				46	7.62			
7	8.72				47	7.97			
<b>8</b>	<b>8.63</b>	<b>5.34</b>	<b>5.33</b>	<b>9.67</b>	<b>48</b>	<b>7.98</b>	<b>6.31</b>	<b>6.21</b>	<b>8.87</b>
9	8.33				49	7.75			
10	7.95				50	7.95			
11	9.00				51	7.83			
12	8.43				52	7.97			
13	9.07				53	8.65			
14	9.40				54	8.47			
15	9.23				55	8.62			
<b>16</b>	<b>9.23</b>	<b>5.54</b>	<b>5.45</b>	<b>9.71</b>	56	8.68			
17	8.93				57	7.88			
18	9.32				58	7.70			
19	8.47				59	8.33			
20	8.80				60	8.12			
21	8.82				61	8.05			
22	7.52				62	7.43			
23	7.75				63	7.35			
24	8.18				<b>64</b>	<b>7.17</b>	<b>6.62</b>	<b>6.45</b>	<b>8.62</b>
25	7.20				65	8.37			
26	7.95				66	7.03			
27	7.80				67	8.65			
28	9.05				68	9.88			
29	7.57				69	8.23			
30	8.08				70	6.95			
31	7.68				71	7.38			
<b>32</b>	<b>8.15</b>	<b>5.83</b>	<b>5.63</b>	<b>9.55</b>	72	7.50			
33	9.00				73	6.70			
34	8.45				74	7.03			
35	8.10				75	7.00			
36	8.53				76	7.10			
37	8.35				77	7.38			
38	9.18				78	7.28			
39	9.93				79	6.87			
40	7.85				<b>80</b>	<b>6.52</b>	<b>6.53</b>	<b>6.62</b>	<b>8.18</b>

Tabla A 10. Resultados de la Segunda Etapa con Caliza

## Resumen de resultados

Primera Prueba Continua													
Primera Etapa						Segunda Etapa							
Datos iniciales						Datos iniciales							
Vol. DA (ml)	pH		C.E.			Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Peso de roca (Kg)			
	Azul	Blanco				Azul	Blanco						
13,300	2.54	2.34	10.2			3,880	5.07	4.72	8.69	1.96			
Datos finales						Datos finales							
Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 5 ciclos (L)	Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 4 ciclos (L)
	Azul	Blanco					Azul	Blanco					
3,880	4.34	4.15	8.73	4.6	175	49	490	6.65	5.78	7.16	2.3	74	10.33
Aplicando ecuación						Aplicando ecuación							
		Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)				Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)			
		6	7.5	3.5				6	7.5	3.5			
Segunda Prueba Continua													
Primera Etapa						Segunda Etapa							
Datos iniciales						Datos iniciales							
Vol. DA (ml)	pH Azul					Vol. DA (ml)	pH Azul		Peso de roca (Kg)				
5,000	2.27					2,900	4.15		1.96				
Datos finales						Datos finales							
Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 9 ciclos (L)	Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 15 ciclos (L)
	Azul						Azul						
3,000	4.16	-	-	1.88	400	45	2,900	5.17	-	-	1.8	400	43.2
Aplicando ecuación						Aplicando ecuación							
		Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)				Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)			
		125	7.5	15				125	7.5	15			
Tercera Prueba Continua													
Primera Etapa						Segunda Etapa							
Datos iniciales						Datos iniciales							
Vol. DA (ml)	pH		C.E.			Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Peso de roca (Kg)			
	Azul	Blanco				Azul	Blanco						
5,000	2.34	2.13	12.8			4,230	3.79	3.6	9.98	4.56			
Datos finales						Datos finales							
Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 24 ciclos (L)	Vol. DA (ml)	pH		C.E.	Tiempo de residencia (horas)	Vel. Flujo (ml/min)	Flujo en 80 ciclos (L)
	Azul	Blanco					Azul	Blanco					
3,880	4.5	4.4	10.2	4.6	434	120	4,230	6.53	6.62	8.18	11	510	338.40
Aplicando ecuación						Aplicando ecuación							
		Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)				Ciclos	pH	Tiempo de residencia (horas)			
		121	7.5	16.7				121	7.5	16.7			

Tabla A 11. Datos obtenidos de la primera etapa de la cuarta prueba continua

En los datos anteriores se puede ver en la segunda etapa de la primera prueba que se comienza con un pH inicial de 5 y para llevar al DA a un valor de 7.5 se requiere de muy poco tiempo de residencia comparado con los tiempos estimados en la segunda y tercera

prueba continua, por lo que se decidió establecer el inicio de una siguiente prueba con dos etapas, la primera con el objetivo de llegar a un pH de 5 y así minimizar el tiempo de residencia en la segunda etapa.

Se pensó en el valor de 5 de pH del DA por que la mayoría de los elementos como lo es el Fe y Al precipitan totalmente como se ha visto en los análisis que nos reportan en las pruebas y también la actividad bacteriana que produce la acides en el drenaje disminuye.

Trabajando con los datos de la segunda y tercera prueba, se buscaron los tiempos de retención necesarios para que la roca filita pueda elevar el pH del DA hasta un valor de 5.

Los ciclos y tiempos de residencia que se registraron en las tablas ayudaron a determinar la cantidad de tiempo que debe estar en contacto la roca con el drenaje para lograr elevar el pH al valor deseado.

Generando gráficas con los datos de la tabla de la segunda y tercera prueba empleando filita se puede obtener su ecuación por medio de Excel como se muestra a continuación:



De acuerdo a los ciclos realizados en las pruebas y los tiempos de residencia para elevar el pH a un cierto valor, las ecuaciones fueron dadas de forma lineal facilitando el trabajo para la obtención de los tiempos necesarios para llegar a un pH de 5.

Se hicieron operaciones con la ecuación de la segunda prueba obteniendo que para llegar a un pH de 5 se tendrían 13 ciclos de los cuales se llevaría 2.7 horas y con la ecuación de la tercera prueba, los ciclos serían 28 con un tiempo de 5.3 horas.

La diferencia de horas en las pruebas se debe a que en la tercera se empleó roca filita que no tiene buen potencial de neutralización como en la segunda y por esa razón se notó una diferencia de 2.6 horas de contacto el DA con la roca para llegar a un pH no tan distantes entre ellos.

Contando los tiempos de residencia para la filita se decidió manejar un valor intermedio entre las dos pruebas que sería de 4.5 horas, tiempo el cual debe de estar en contacto el DA con la roca para neutralizar el drenaje a un valor de 5 de pH.

En el caso de la caliza, los tiempos de residencia necesarios para elevar el pH del DA a 7.5 fueron calculados en cada una de las etapas de las pruebas teniendo resultados que van de las 3 horas hasta las 17 horas de contacto. El menor tiempo obtenido fue cuando se aplicó la segunda etapa con caliza un DA con pH alrededor de 5 y los tiempos largos fueron cuando se hicieron las pruebas con un pH del DA por debajo de 5.

Si se desea obtener un pH por arriba de los 7.5, lo más recomendable para el tiempo de residencia de una nueva prueba sería dejarlo hasta que alcance el valor esperado teniendo en cuenta que puede ser mayor a las 17 horas calculadas con la ayuda de la ecuación de la tercera prueba.

#### CUARTA PRUEBA CONTINUA

##### PRIMERA ETAPA

Litros adicionados	Altura de columna (l)	Flujo (ml/min)	Flujo promedio (ml/min)	Hora de medición	Tiempo de residencia
2	4	11	7.32	09:05	4 hrs 31 min
	3.5	8.5		10:08	
	3	7		11:05	
	2.5	5.1		12:28	
	2	5		13:36	
4	4	14	9.46	13:45	4 hrs 25 min
	3.5	7		14:51	
	3	11		16:25	
	2.5	8.5		17:15	
	2	6.8		18:10	
4.2	2	9.2	9.5	18:44	2 hrs 36 min
	2	17.8		18:58	
	1.5	7.3		19:47	
	1	3.7		21:20	

Tabla A 12. Datos obtenidos de la primera etapa de la cuarta prueba continua