

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**FILTRACIÓN CON MATERIALES LOCALMENTE DISPONIBLES PARA REMOCIÓN
DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN AGUA DE INDUSTRIA MINERA**

POR:

I.E. MARISSA NÚÑEZ RUVALCABA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



Filtración con materiales localmente disponibles para remoción de sólidos suspendidos en agua de industria minera. Tesina presentada por Marissa Núñez Ruvalcaba como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ecología y Medio Ambiente, ha sido aprobada y aceptada por:

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

Ph. D. Felipe Alonso Rodríguez Almeida
Encargado del Despacho de la Secretaría de Investigación y Posgrado

D. Ph. Agustín Corral Luna
Coordinador Académico

Dra. Marusia Rentería Villalobos
Presidente

01 Marzo 2018

Fecha

Comité:

Dra. Marusia Rentería Villalobos
Dra Leonor Cortés Palacios
Dr. Gilberto Sandino Aquino de los Ríos
Ph.D. Sandra Rodríguez Piñeros

© Derechos Reservados
MARISSA NÚÑEZ RUVALCABA
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO FRANCISCO
R. ALMADA KM. 1, CHIHUAHUA,
CHIH., MÉXICO C.P. 31453
MARZO 2018

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a Dios, a mis padres Elsa y Jesús, a mis hermanos Iván y Luis, a toda mi familia, amigos y compañeros que estuvieron apoyándome en este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar una etapa más en mi vida, a mis padres y hermanos por estar incondicionalmente para mí, a mis amigos y compañeros por apoyarme cuando lo necesité, a mis maestros por sus enseñanzas.

Quiero agradecer a todos aquellos que indirecta y directamente contribuyeron para que fuera posible este trabajo.

CURRICULUM VITAE

La autora nació el 20 de Diciembre de 1990 en Ciudad Delicias, Chihuahua.

2009-2012 Estudios de Licenciatura en la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Zootecnia y Ecología en la Ciudad de Chihuahua, Chih.

2012-2013 Prácticas profesionales en Exploraciones Mineras Parreña S.A. de C.V.

Servicio social en PROFAUNA A.C.

2013- 2017 Ingeniero en control ambiental en Exploraciones Mineras Parreña S.A. de C.V.

RESUMEN

FILTRACIÓN CON MATERIALES LOCALMENTE DISPONIBLES PARA
REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN AGUA DE INDUSTRIA
MINERA.

POR:

I.E. MARISSA NUÑEZ RUVALCABA

Maestría en Ecología y Medio Ambiente

Facultad de Zootecnia y Ecología

Secretaría de Investigación y Posgrado

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Dra. Marusia Rentería Villalobos

El tratamiento de aguas residuales provenientes de la minería requiere tecnología que pueda adaptarse a los sitios en donde se lleva a cabo la extracción minera. El diseño de esta tecnología debe hacerse de acuerdo con las características del agua, la calidad final que se desea alcanzar, y los estándares reglamentarios. En el presente trabajo se diseñaron y evaluaron dos sistemas de filtración para la remoción de sólidos suspendidos de agua residual de la industria minera del municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua. Uno de los filtros se empacó con grava y hojarasca de pino (Filtro 1) y el otro con arena, grava y hojarasca de pino (Filtro 2), estos materiales

fueron previamente recolectados en las inmediaciones de la mina. Se caracterizaron alícuotas de la solución inicial del proceso de barrenación, un blanco (agua destilada), así como las concentraciones (% v/v) utilizadas para la determinación de remoción de los filtros. Los parámetros medidos fueron pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), Turbidez (TB) y sólidos suspendidos totales (SST). Para la medición del SDT, pH y CE se empleó un potenciómetro (Hanna Combo pH & EC Waterproof). Para la determinación de TB se utilizó un turbidímetro con Microprocesador (Hanna Instruments, HI93703). Los SST fueron determinados conforme a la norma mexicana (NMX-AA-034-SCFI-2001). Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de varianza y de correlación para la comparación de estos dos arreglos, mediante el programa SAS 9. Los resultados muestran que en los dos filtros se lleva a cabo el proceso de remoción. En el Filtro 1 el proceso de remoción se da principalmente por las especies químicas disueltas presentes en la solución; determinados por el pH, SDT y CE. En el Filtro 2 tiene mayor porcentaje de remoción de TB y SST. Lo anterior es atribuido a los arreglos utilizados en cada uno de los filtros. Debido a todo lo anterior, se concluye que la filtración con material localmente disponible puede ser una opción viable, sencilla y económica para dar tratamiento al agua proveniente del proceso minero.

ABSTRACT

FILTRATION WITH LOCALLY AVAILABLE MATERIALS FOR REMOVAL OF SUSPENDED SOLID WATER FROM MINING INDUSTRY.

BY:

I.E. MARISSA NUÑEZ RUVALCABA

Waste water treatment from mining operations requires technology that adapts to the geographic and environmental conditions of the mining site. To design this technology it is important to consider the quality of the water that is discharged both before and after the technology, this latter should comply with the national regulations. We designed and evaluated two filters to remove suspended solids of waste water from mining operations in the municipality of Guadalupe y Calvo, Chihuahua. One filters contained gravel and pine litter (Filter 1), and other filter contained gravel, pine litter, and sand (Filter 2); these materials were previously collected in the nearby of the mine site. Waste water from the drill pad process a blank sample (distillated water), and the concentrations (% v/v) to determine remotion for the filters were characterized. The estimated parameters were pH, total solid dissolved (TSD), electric conductivity (EC), and total solid suspended (TSS). To measure TSD, TB, pH and CE we used the Hanna Combo pH and EC waterproof potentiometer. To determine TB the portable microprocessor turbiditymeter (Hanna Instruments HI93703) was used. The TSD were determined according to the Mexican norm (NMX-AA-034-SCFI-2001). To compare the two filters, an ANOVA and

correlation were performed using the statistical program SAS 9. Results showed that the filters removed solids. Filter 1 has mainly chemical removal properties, as determined by pH, TDS and EC. Meanwhile, Filter 2 has greater removal properties in terms of TB and TSS. The results may be due to the composition of each filter. These results are attributed to the arrangement of the material within the filters. Thus, we can conclude that filters that contains material nearby the mine site would be an option to treat waste water from drill pad activities.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
CONTENIDO.....	x
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE GRÁFICAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Contaminación de agua.....	3
Parámetros Físico-Químicos.....	4
Temperatura (T).....	4
Potencial de hidrógeno (pH).....	5
Conductividad eléctrica (CE).....	5
Turbidez (TB).....	6
Sólidos suspendidos totales (SST).....	6
Sólidos disueltos totales (STD).....	7
Tratamiento de agua.....	7
Filtración.....	8
Tipos de filtración.....	8
Filtración con Empaque Orgánico	9
La Minería.....	10
Impactos ambientales de la minería.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
Área de estudio.....	13
Diseño de los filtros.....	13

Muestreo de Agua Residual.....	15
Experimentación.....	15
Análisis Estadístico.....	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
LITERATURA CITADA.....	38

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Parámetros medidos en agua potable usada a la entrada de los filtros.....	19
2	Resultados de parámetros medidos a la salida del filtro 2, durante su acondicionamiento de los filtros.....	20
3	Resultado de parámetros medidos en agua antes y después del lavado de la hojarasca.....	¡Error! Marcador no definido.
4	Resultado de parámetros medidos en solución, a diferentes concentraciones, sometidas a filtración en el arreglo 1.....	26
5	Resultado de parámetros medidos en solución, a diferentes concentraciones, sometidas a filtración en el arreglo 2.....	29

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Comportamiento de los parámetros analizados en las diferentes corridas o lavados realizados en el Filtro 2.....	26
2	Comportamiento de remoción en los parámetros medidos en agua a diferentes concentraciones v/v en el Filtro 1: a) pH, b) SDT, c) CE, d) TB y e) SST.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Prototipos con los arreglos del material de filtración: a) filtro 2 y b) filtro 1.....	14
2	Sistemas de filtración: a) Arreglos finales de los filtros 1 (derecha) y 2 (izquierda), y b) alícuotas de medición antes y después del lavado de la hojarasca.....	24

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural necesario para mantener la vida de cualquier especie del planeta. Actualmente el recurso agua se ve amenazado debido al alto porcentaje de agua residual, producto de los procesos industriales y agrícolas, que se descargan al ambiente sin pasarla por un tratamiento previo, y que consecuentemente contamina las aguas superficiales y subterráneas. Debido a lo anterior, se hace necesario emplear tratamientos para mejorar la calidad de agua (Rodríguez *et al.*, 2006).

El agua en su estado natural está compuesta por gases, iones, especies ácidas, especies inorgánicas y materia orgánica; el porcentaje de presencia de estos elementos está en función de la localización (agua superficial o subterránea), el tipo de terreno, y la estación del año. En el contenido del agua natural se pueden encontrar sustancias disueltas o suspendidas (Canales, 2015).

La actividad minera requiere la utilización del agua en estado natural para la depuración de minerales, por lo que existe un porcentaje de agua residual que debe de ser tratada antes de ser vertida a las fuentes naturales. La filtración es considerada una tecnología eficiente en la remoción de microorganismos y materia inorgánica del agua (EPA, 1990), además de ser una alternativa económica y sustentable para disminuir entre otros los efectos de las descargas de aguas residuales en el medio ambiente (Vigueras, 2012).

La filtración, es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión (Barrientos *et al.*, 2004). La materia en suspensión

puede ser partículas inorgánicas de centímetros y muy densas, tales como: arcillas, limos u otros componentes del suelo (Orozco *et al.*, 2003), hasta partículas de origen orgánico muy estables y con tamaño de nanómetros (Rodríguez *et al.*, 2006).

En diferentes partes del mundo se han realizado investigaciones de filtración con arena, grava y materiales localmente disponibles, comprobando su eficacia en la remoción de diferentes contaminantes del agua. Esta investigación busca contribuir en el mejoramiento de la calidad de agua residual producto del proceso minero, eliminando la mayor concentración de sólidos suspendidos por medio de filtración, por lo que se evaluaron dos sistemas de filtros, difiriendo en ellos la cantidad y el acomodo de material orgánico. Debido a esto, en el presente trabajo se diseñaron y evaluaron dos sistemas de filtración para la remoción de sólidos suspendidos de agua residual de una industria minera del municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

REVISIÓN DE LITERATURA

Contaminación de agua

El agua es un recurso natural cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino indispensable como soporte de cualquier forma de vida. Actualmente, el porcentaje de agua residual ha incrementado, y esto aunado con su deficiente disposición, ocasiona la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, razón por la cual se hace necesario emplear tratamientos para mejorar la calidad de agua (Rodríguez *et al.*, 2006).

La calidad del agua es la condición general que permite que se emplee para determinados usos (FEA *et al.*, 2006). El problema de la mala calidad del agua por consecuencia de la contaminación puede ser lo que nos lleve a sufrir una severa escasez en los próximos años. Cuando el agua contiene elementos extraños, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales o domésticos, los cuales alteran sus características naturales, se dice que está contaminada. El fenómeno de la contaminación del agua no es nuevo, pues ha acompañado al hombre en toda su historia. Independientemente de su uso, la calidad del agua permanece principalmente en los materiales y sustancias que lleva disueltos o en suspensión y los organismos que ahí se encuentran. Para determinar su calidad, es necesario conocer algunas características que afectan su posible uso como, por ejemplo, el oxígeno disuelto, cantidad de partículas suspendidas, cantidad y tipo de sales disueltas, presencia y concentración de compuestos tóxicos y bacterias, así como otro tipo de microorganismos. La calidad de ésta depende

del uso que se le pretende dar, resulta complicado definir una forma única de medir su calidad (SEMARNAT, 2014).

La contaminación de agua se puede dar por alteraciones físicas, químicas y biológicas (García, 2009). Las físicas se dan por variaciones en la calidad natural del agua, influyendo parámetros como color, olor, turbidez, sabor, conductividad eléctrica, temperatura, entre otras. Las alteraciones químicas en el agua pueden ser de origen orgánico e inorgánico, como materia orgánica, grasas, aceites, pesticidas, metales entre otros, mientras la contaminación biológica es debido a la presencia de microorganismos patógenos (Barba, 2002).

Los efectos de la contaminación de agua pueden ser la disminución y/o desaparición de la vida acuática, el incremento en las enfermedades hídricas, el deterioro de la calidad de agua y la pérdida del equilibrio ecológico (Pesántez, 2014).

Parámetros Físico-Químicos

Temperatura (T). Este parámetro en un río puede afectar la densidad y solubilidad de gases. La densidad afecta directamente la mezcla de aguas con masas diferentes, especialmente la estratificación estacional (Shelton, 1994). La temperatura del agua es un parámetro muy importante a considerar, esto debido a su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como en la aplicabilidad del agua en diferentes usos. Por ejemplo, una temperatura alta puede producir un cambio en las especies piscícolas. Además, las altas temperaturas pueden dar lugar a crecimientos indeseables de plantas acuáticas y hongos (Metcalf y Eddy, 1996).

Potencial de hidrógeno (pH). El concepto de pH se deriva de la necesidad de medir la acidez y alcalinidad. La acidez es una propiedad que en los orígenes de la química se detectó por el sabor agrio de las sustancias, así como la alcalinidad se apreció por la sensación jabonosa de algunas sustancias al tacto. Para lograr medir estas propiedades se creó una escala que se basa en la concentración de los iones de hidronio (H_3O^+) en una solución (Barba, 2002). El pH se expresa en unidades logarítmicas, para lo cual se utiliza una escala en un rango de 0 a 14. De esta manera, una solución con un pH menor que 7 será considerada como ácida, en tanto una solución con pH mayor que 7 será considerada como básica. La desgasificación (por ejemplo pérdida de dióxido de carbono), precipitación y otras reacciones, químicas, físicas y biológicas pueden causar cambios considerablemente importantes en una muestra de agua en pocas horas, o incluso, en algunos minutos después de su colecta (Shelton, 1994). El cambio a un pH alto en un ecosistema, puede causar la muerte de peces y esterilizar una corriente de agua natural, mientras que las aguas con un valor de pH bajo pueden alimentar la corrosión de las estructuras de acero o concreto (Cano, 2002).

Conductividad eléctrica (CE). La CE es la medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo. El aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. Actualmente, el parámetro más importante para la posibilidad de uso de agua para riego es la CE (Crittenden *et al.*, 2012).

Turbidez (TB). Este parámetro es uno de los más importantes en la calidad del agua, ya que indica su contaminación. El análisis de TB mide la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de materia sin disolver (NOM, 2001. NMX-AA-038-SCFI-2001). La turbidez del agua puede ser causada por partículas suspendidas en el agua tales como sedimentos, materia orgánica y plancton. Si la turbidez del agua es alta, habrá muchas partículas suspendidas en ella. Estas partículas sólidas en el agua bloquean el paso de la luz solar, evitando que las plantas acuáticas realicen la fotosíntesis. Las plantas producirán menos oxígeno y con ello bajarán los niveles de Oxígeno Disuelto (OD). Las partículas suspendidas en el agua también absorberán calor adicional de la luz solar lo cual ocasionará que el agua sea más caliente. El agua caliente no es capaz de guardar tanto oxígeno como el agua fría, así que los niveles de OD bajarán, especialmente cerca de la superficie. Las partículas suspendidas también son destructivas para muchos organismos acuáticos tales como los macro invertebrados que se encuentran en el agua.

Sólidos suspendidos totales (SST). El agua puede contener varios tipos de sólidos, entre ellos, sólidos disueltos y los sólidos suspendidos (NOM, 2015. NMX-AA-034-SCFI-2015). El término sólido en suspensión describe las partículas en suspensión presentes en una muestra de agua. Los sólidos y sales disueltas pueden afectar de manera adversa la calidad del agua. El análisis de sólidos disueltos es importantes como indicador de la efectividad de procesos de tratamiento del agua. Altas concentraciones de SST pueden depositarse en el fondo de un cuerpo de agua. Este depósito puede impedir la transferencia de oxígeno y resultar en la muerte de los organismos.

Además, disminuyen la eficacia de agentes desinfectantes del agua potable; por proveer a los microorganismos de un sitio protector frente la presencia de desinfectantes. Hay contaminantes de origen orgánico e inorgánico que son absorbidos en la tierra y aumentando la concentración de contaminantes presentes en los sólidos. Es decir que contaminantes adsorbidos en sólidos pueden ser transportados a otros cuerpos de agua, resultando en la exposición de contaminantes a organismos lejos del origen de contaminación.

Sólidos disueltos totales (SDT). Son los sólidos disueltos en aguas limpias y residuales, pueden afectar de forma negativa la calidad del agua, ya que representan el contenido de especies iónicas disueltas. Dentro de los cationes se pueden encontrar principalmente el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , mientras que los aniones se refieren a los contenidos de F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , entre otros. Éstos representan las especies químicas mayoritarias disueltas en el agua. Las aguas con grandes cantidades de SDT suelen ser de menor palatabilidad y pueden inducir una reacción fisiológica poco favorable en el consumidor. Por otra parte las aguas altamente mineralizadas tampoco son adecuadas para muchas aplicaciones industriales, o incluso, resultan estéticamente insatisfactorias incluso para bañarse (APHA, 1992).

Por otra parte, dada las grandes cantidades de agua contaminada en el planeta, y sus consecuencias en la salud humana y de los ecosistemas, se han diseñado diferentes métodos para disminuir la contaminación hídrica.

Tratamiento de agua

El tratamiento de agua sirve para proteger la salud pública y para preservar el medio ambiente, en el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y

biológicos (Falconi, 2012). Para elegir el tratamiento más adecuado es fundamental conocer los contaminantes que están afectando al líquido y la calidad final que se desea alcanzar después del tratamiento (Rodríguez *et al.*, 2006). El impacto en el medio ambiente del vertido de las aguas tratadas será menor en la medida que el sistema de tratamiento sea más eficiente.

Filtración

La filtración usualmente trabaja por combinación de procesos físicos y químicos (EPA, 1990), consiste en la separación de la materia en suspensión al pasar el agua por un medio poroso que generalmente es arena. La separación de los materiales sólidos se efectúa al pasar el agua por los poros de la capa filtrante y la adhesión de las partículas a los granos de arena (Barrientos *et al.*, 2004). La filtración es una tecnología de tratamiento sencilla, confiable y eficiente que puede producir efluentes de baja turbidez (Galvis *et al.*, 1999; Martín, 2009).

Tipos de filtración

Los tipos de filtración pueden clasificarse de distintas formas, entre los cuales se pueden mencionar: filtros lentos o rápidos, de flujo ascendente o descendente y de acuerdo a la carga hidráulica, por presión o gravedad (Pérez, 1981; Otero 2007; Arango 2004).

En los filtros lentos, el agua pasa por la capa filtrante a baja velocidad haciendo que las partículas se adhieran a los granos de arena; en los filtros rápidos la velocidad del agua es mayor, acumulando las partículas relativamente grandes en la parte superior del medio filtrante (Barrientos *et al.*, 2004). En la filtración ascendente el agua del afluente va escurriendo en el sentido que los granos del medio filtrante disminuyen su tamaño, en los

filtros descendentes las partículas suspendidas quedan retenidas en la parte superior (CEPIS/OPS, 2004). En los filtros de presión el agua es forzada bajo presión, mientras que en los filtros de gravedad el agua fluye hacia abajo por la acción de la gravedad (Hiusman y Wood, 1974).

Además de la clasificación antes mencionada, es importante la selección del material de empaque, ya que este debe ser capaz de remover la mayor cantidad posible de partículas suspendidas, produciendo un efluente de buena calidad (Barrientos *et al.*, 2004).

Filtración con Empaque Orgánico

En 1980 se comenzaron a usar filtros con empaque orgánico, también llamados biofiltros, dada la buena eficiencia para tratar agua residual (Medina, 2012). Los biofiltros son una alternativa para el saneamiento de aguas contaminadas y de bajo impacto en el medio ambiente. Algunas de las ventajas de los biofiltros es el bajo costo de construcción y operación, la nula dependencia de productos químicos, el bajo requerimiento de mano de obra calificada para su operación, y la ausencia de lodos (Cevallos, 2015).

La grava y la arena se han utilizado como estratos filtrantes, por contar con una superficie de contacto; sin embargo, en la actualidad lo atractivo de la biofiltración es el reemplazo de los materiales granulares tradicionales por medios fibrosos (Arango, 2004). En las últimas décadas los soportes orgánicos han logrado eficiencias iguales o mejores que en las plantas convencionales (Vigueras *et al.* 2014).

En Chile se desarrolló una tecnología de biofiltración mixta, que utiliza como estrato filtrante piedra de río, grava, viruta de pino, aserrín, hojas de eucalipto y lombrices (Cevallos, 2015). En México se ha realizado filtración

sobre materiales orgánicos como residuos de árboles y desechos agrícolas (Vigueras, 2012), para el tratamiento de aguas residuales domésticas y de agroindustrias, los cuales han mostrado más del 90% de remoción de sólidos suspendidos (Garzón *et al.* 2012).

La biofiltración en minas ha sido probada para remoción de metales pesados que se encuentran en los drenajes ácidos (Vizcaíno y Fuentes, 2015)

La Minería

La minería es una de las actividades económicas que tiene mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y fuente de la expansión regional desde la colonia. Esta actividad ha estado presente en el desarrollo del país como un factor importante de modernización y avance, al suministrar insumos a prácticamente todas las industrias (INE, 2007).

Las grandes empresas mineras operan en el norte del territorio mexicano, como es Chihuahua, Zacatecas, Coahuila, Sonora y San Luis Potosí (Román, 2015). Históricamente en Chihuahua la minería ha sido pilar en la economía del estado, como actividad fundadora de importantes centros de población, en la actualidad es un motor que apoya el desarrollo industrial del estado (SGM, 2014).

Las actividades mineras están a menudo relacionadas con los impactos ambientales, incluyendo la contaminación por metales en los sedimentos y agua de los sistemas acuáticos (Hun-Bok *et al.*, 2005). La explotación de minerales está asociada con una importante modificación de la superficie, lo cual afecta la cuenca y el régimen hidrológico en cantidad y calidad (Bud *et al.*, 2007). Los contaminantes ingresan al ambiente acuático principalmente por descargas directas de fuentes industriales, siendo la industria minera una

de las más importantes (Alloway y Ayres, 1993). En su impacto específico, los problemas ambientales relacionados con los depósitos de mineral son el drenaje ácido y las altas concentraciones de metales pesados en el agua de drenaje de los yacimientos mineros (Carrillo *et al.*, 2003).

La industria minera utiliza volúmenes de agua en todos sus procesos (Pesantes, 2014), de los cuales un alto porcentaje es liberado como agua residual, que posteriormente se constituye un problema de carácter ambiental (Richards, 2002). De ahí que es muy importante mejorar la calidad del agua residual para minimizar el impacto.

Impactos ambientales de la minería

La actividad minera produce impactos ambientales negativos (Moran, 2001), principalmente por el uso de químicos, generación de residuos, uso extensivo de tierras y uso intensivo de agua (Delgado, 2010). Convirtiendo la minería en una de las actividades que presenta una gran afectación al medio ambiente (González, 2014).

Los impactos ambientales que se generan con la actividad minera son de acuerdo a la localización de las instalaciones mineras, el tipo de minería, las diversas fases del proceso minero, los minerales explotados, la tecnología de extracción y el método de concentración empleado (Yupari, 2015).

Cuando no se implementan los controles ambientales adecuados, factores como el viento y la lluvia pueden dispersar los contaminantes al entorno inmediato, afectando suelos, sedimentos y cuerpos de agua. Aun y en concentraciones bajas pueden causar efectos nocivos para los organismos

vivos, transportarse y contaminar a otros medios abióticos (Gutiérrez *et al*, 2007).

Los proyectos mineros tienen diferentes etapas secuenciales, comenzando con la exploración de los minerales y terminando con el post-cierre de mina (ELAW, 2010). La contaminación del agua se da por el aumento en la carga de sedimentos a los cuerpos de agua (Yupari, 2015), incluyendo metales liberados por las soluciones químicas utilizadas, por lo que las aguas subterráneas y superficiales suelen contaminarse (Bravo, 2015). En el estado de Chihuahua Chacón 2016 encontró altos contenidos de Cu, Ni y Zn en agua de río y de manantial una zona cercana a jales mineros, lo que afecta la calidad del agua y de los organismos acuáticos (Sánchez, 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente trabajo se realizó a escala real en el laboratorio de parámetros ambientales, de la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. La metodología propuesta busca que el diseño y construcción final de los filtros estudiados cuenten con las características necesarias para su aplicación en el proceso de emisión de residuos líquidos provenientes de la barrenación en la exploración minera.

Diseño de los filtros

Los materiales utilizados para realizar el filtro fueron arena, grava y hojarasca de pino; la hojarasca fue elegida por su disponibilidad en la zona y es fácil de obtener por tratarse de un desecho de los árboles. Los materiales fueron recolectados en la zona de la actividad minera donde se pretende implementar el sistema de filtración. Se realizó un proceso de tamizado para la arena y la grava a 2 y 16 mm, respectivamente. En la hojarasca se eliminaron residuos orgánicos de gran tamaño, ejemplo troncos o rocas (Figura 1).

Para la elaboración de los filtros se usaron mitades de tubo de PVC hidráulico con una longitud de 100 cm y 12.7 cm de alto. En ambos tubos se colocó plástico en un borde en donde se presume va a entra el agua, así como tela de alambre en el borde en donde será la salida del agua; esto con el fin de evitar que el material filtrante y el agua se salieran del filtro. El filtro 1 se realizó un arreglo de secciones de material: orgánico (hojarasca), arena y grava. Por su parte, en el filtro 2 el arreglo fue mediante la mezcla de material orgánico, arena y grava.



Figura 1. Prototipos con los arreglos del material de filtración: a) filtro 2 y b) filtro 1.

Muestreo de Agua Residual

El agua residual del proceso de exploración (m_i) fue recolectada directamente de la solución de barrenación, en la zona de Guadalupe y Calvo. Esta solución contiene principalmente sosa caustica (NaOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y algunos aditivos que contienen compuestos orgánicos (alquenos, bencenos y compuestos órgano-oxigenados), ver Anexo 1. Posteriormente, la muestra fue trasladada al laboratorio de parámetros ambientales de la Facultad de Zootecnia y Ecología en garrafones de plástico de 20 y 50 L. Las muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente hasta su análisis.

Experimentación

Para el proceso de experimentación se caracterizaron el agua residual (m_i) y una muestra de agua destilada o blanco (m_b). Los parámetros determinados para la caracterización de las muestras fueron pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), Turbidez (TB) y sólidos suspendidos totales (SST). Para la medición del SDT, T, pH y CE se empleó un potenciómetro (Hanna Combo pH & EC Waterproof). Además, se utilizó el turbidímetro con Microprocesador, para la determinación de TB (Hanna Instruments, HI93703). Los SST fueron determinados conforme a la norma mexicana para el “Análisis de agua -medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –método de prueba” (NMX-AA-034-SCFI-2001). Así mismo, se registró el tiempo en que la muestra pasaba a través de cada filtro.

Previo a la filtración de las muestras, los arreglos de los filtros fueron acondicionados mediante “lavados” con agua potable, para determinar la

variabilidad de los parámetros a evaluar debido a los materiales utilizados. Debido al arreglo establecido en el filtro 1, el agua estaba siendo retenida por la sección de arena. Con ello, se tuvo que realizar una modificación en este filtro. Así, en el arreglo se cambiaron las tres secciones por sólo dos: hojarasca y grava. Por lo anterior, la hojarasca fue “lavada” con agua potable previamente caracterizada. Una vez finalizada esta actividad, se tomaron 4 alícuotas del agua utilizada para la medición de los mismos parámetros. Por el contrario, en el filtro 2 (arreglo de material mezclado), el agua pudo ser filtrada. Así, para el filtro 2 se realizaron 39 repeticiones en total.

Para conocer la eficiencia de remoción de ambos filtros se prepararon soluciones de agua residual: agua destilada en concentraciones (v/v) de 0:1 (0%), 0.25:0.75 (25%), 0.5:0.5 (50%), 0.75:0.25 (75%) y 1:0 (100%). Cada uno de las concentraciones se corrió por triplicado, donde se les determinaron los parámetros antes mencionados.

Además, en cada filtración se midieron blancos, correspondiendo a las concentraciones de 0% v/v.

Análisis Estadístico

Para comparar la remoción entre el filtro 1 y el filtro 2, se utilizó una prueba de hipótesis para la comparación de estos dos arreglos (poblaciones). Para ello, se efectuó un análisis de varianza para identificar el efecto de las medias de los parámetros medidos en ambos filtros, utilizando el paquete SAS® (SAS 9.1.3, 2006). Los resultados de los parámetros medidos en el experimento se describen utilizando el siguiente modelo estadístico (ecuación 1):

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2 \\ j = 1, 2, \dots, n_i \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

y_{ij} = es la observación j-ésima del nivel i del factor

μ = es la media de la respuesta para el nivel i-ésimo del factor

ε_{ij} = error aleatorio

La eficiencia de remoción en ambos filtros se determinaron mediante las hipótesis $H_0: \mu_1 = \mu_2$, y $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$.

Se realizó una Prueba de Tukey para comparación múltiple de medias cuando existió efecto del parámetro.

Por otra parte, se realizaron 3 pruebas en cada uno de los 4 niveles de contenido v/v (25%, 50%, 75% y 100%). Experimento con un solo factor $\alpha = 4$ niveles de contenido v/v para $n=3$ pruebas. Se utilizó el análisis de varianza para probar $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ contra la hipótesis alternativa H_1 : donde algunas medias de los parámetros son diferentes. Las sumas de cuadrados requeridas se calculan con la ecuación 2:

$$SS_T = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad SS_{\text{Tratamientos}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los parámetros medidos en agua potable que se utilizaron en la entrada de los filtros para su acondicionamiento se encuentran descritos en el Cuadro 1. Los resultados de los parámetros medidos en agua después de ser filtrada en el filtro 2 (arreglo de material mezclado), se encuentran en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Parámetros medidos en agua potable usada a la entrada de los filtros.

Muestra	pH	CE μS/cm	SDT mg/L	T °C	TB NTU
1	7.8	583	290	23.7°c	0
2	7.9	580	286	23.4	0
3	7.8	575	286	20.7	0
4	7.5	577	287	22.5	0
5	7.5	557	279	24.4	0
6	7.8	536	268	22.2	0
7	7.7	515	257	21.1	0
8	7.8	527	247	21.8	0
9	7.8	522	261	22.4	0
10	7.8	513	256	21.5	0
11	7.8	532	267	23.2	0
Media	7.7	547	271	23	0
Desviación típica	0.13	28	15	1.14	0
Mínimo	7.5	513	247	20.7	0
Máximo	7.9	583	290	24.4	0

Cuadro 2. Resultados de parámetros medidos a la salida del filtro 2, durante su acondicionamiento.

Repetición	V _{flujo} cm/s	pH	CE μS/cm	SDT mg/L	T °C	TB NTU
1	1.03	8	758	380	22.1	132
2	1.67	7.9	676	341	21.9	60
3	1.89	8	643	321	22.4	59
4	2.27	7.9	619	308	21.9	47.2
5	2.70	7.97	694	348	22.6	125
6	2.50	7.94	647	323	22.4	73
7	2.22	7.94	626	314	22.9	90
8	2.94	8	610	307	22.9	61
9	3.33	8.03	569	285	23.1	43
10	2.56	7.99	566	283	23.3	41.3
11	2.13	8.1	551	273	23.7	37.6
12	2.56	8	554	277	23.6	34.3
13	2.56	8	556	276	22.7	54
14		7.91	603	306	20.4	61
15		7.8	598	299	21	45
16		7.8	557	279	22.6	68
17		7.9	553	277	19.5	53
18		7.91	552	276	21.7	92
19		7.92	560	280	21.8	39
20		7.96	511	256	21.7	42

21	8	517	260	21	54
22	8	523	261	21.1	59
23	8	512	256	21.1	75
24	8	519	260	21.2	69
25	8.1	510	257	21.4	48
26	8.1	509	255	21.4	66
27	8.1	521	260	21.6	57
28	8	525	262	21.5	62
29	8	504	252	22.1	59
30	8	499	249	21.8	46
31	8	483	243	22.2	38
32	9	487	244	22.4	44
33	8	523	259	21.4	51
34	8.1	515	257	21.4	43
35	8	526	263	21.5	46
36	9	483	242	21.9	48
37	7.9	531	265	22.4	43
38	8	514	257	22.7	50
39	8	521	261	23.2	46
Media	8.03	557	279	22	58
Desviación típica	0.24	63	31.7	0.9	21.3
Mínimo	7.8	483	242	19.5	34.3
Máximo	9	758	380	23.7	132

De la prueba de hipótesis en los parámetros de entrada y salida del Filtro 2, para el acondicionamiento usando agua potable, se obtuvo que el pH y la TB son significativamente diferentes ($p\text{value}<0.05$). Los demás parámetros no mostraron una diferencia entre poblaciones. Con lo anterior, el pH del agua aumenta entre un 1 y 4% a la salida del filtro. Lo cual indica que existe una lixiviación de metales alcalinos y alcalinotérreos (Dragana *et al.*, 2013), así como la presencia de especies aniónicas, carbonatos y bicarbonatos, durante el acondicionamiento a través de lavados del material filtrante con agua, cambiando así su pH inicial. Así mismo, el valor de TB está aumentando a la salida del filtro, en un 100%. Así, este comportamiento es indicativo del aumento en contenido de las partículas de diámetros muy pequeños, micro partículas y/o coloides, que están siendo arrastradas y suspendidas en el agua a través de su paso por entre los poros del material filtrante. Además, se observa que a medida que van aumentando el número de corridas o lavados, los parámetros de CE ($R^2=0.69$) y SDT ($R^2=0.68$) tienden a disminuir. Esto se entiende desde el punto en que los primeros lavados arrastran la mayor parte de partículas disueltas, ver Gráfica 1. Sin embargo, el pH y la TB se mantienen constante a través de los lavados.

Por otra parte, en el filtro 1 (material acomodado por estratos) se hizo una modificación descartando la arena, utilizando solamente el material orgánico y la grava.

Los resultados de este acondicionamiento se encuentran en el Cuadro 3. Así mismo, en la Figura 2 se observa el arreglo resultante en el filtro 1 y la diferencia de coloración en el agua utilizada en el lavado de la hojarasca.

Cuadro 3. Resultado de parámetros medidos en agua antes y después del lavado de la hojarasca.

Repetición		pH	CE μS/cm	SDT mg/L	T °C
1	inicial	7.7	540	268	22.9
	final	6.6	438	242	22.7
2	inicial	7.6	567	283	23.1
	final	7.2	483	241	22.7
3	inicial	7.7	515	257	23.5
	final	7.3	463	232	23.7
4	inicial	7.7	542	271	23.4
	final	7.3	465	233	23.5
Media	inicial	7.67	541	270	23.2
	final	7.1	462	237	23.1

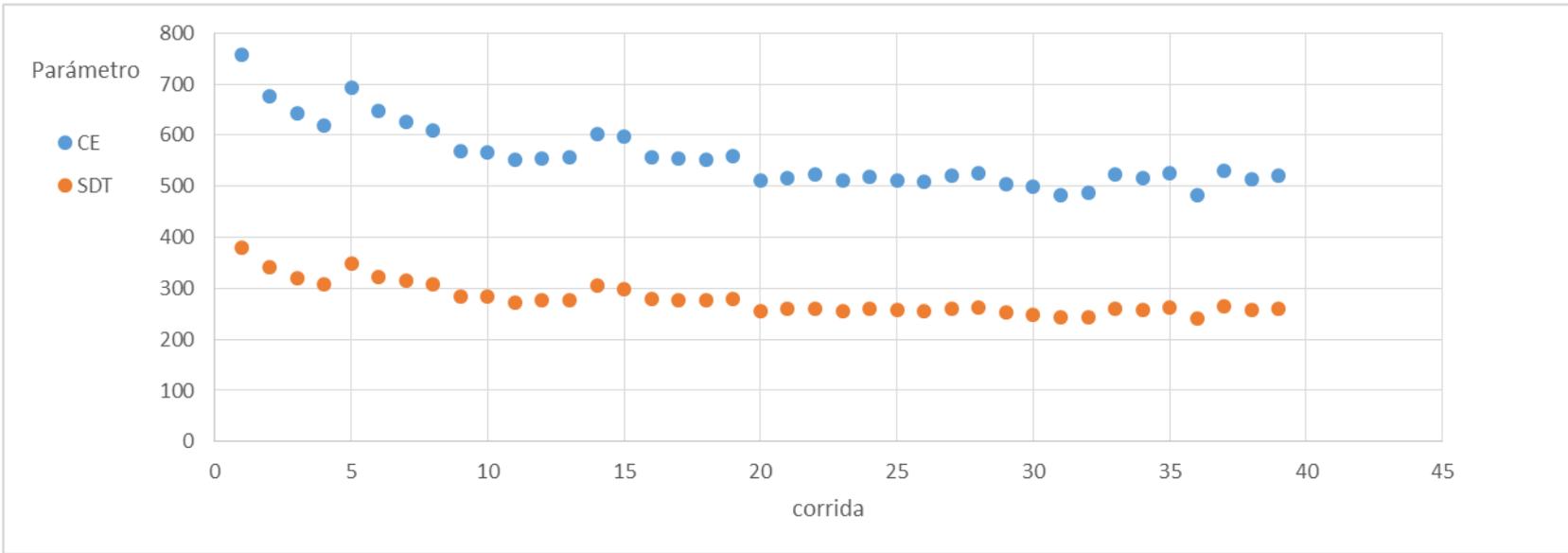


Figura 2. Sistemas de filtración: a) Arreglos finales de los filtros 1 (derecha) y 2 (izquierda), y b) alícuotas de medición antes y después del lavado de la hojarasca para integrarla al filtro 1.

El lavado de este material, nos permite observar la variación de los parámetros en agua que pudiera estar pasando a través de un filtro compuesto solo por él. Así, en la Gráfica 1 se observa el comportamiento de los parámetros CE y SDT medidos en el agua, una vez que fue utilizada en el lavado de la materia orgánica (hojarasca). Además, estadísticamente se observó que las variables de pH, CE y SDT son significativamente diferentes antes y después del lavado. Las tres disminuyeron al final del lavado. Esto corrobora lo encontrado en los lavados con agua potable utilizada en el acondicionamiento del filtro 2; donde, la CE y SDT disminuyen a través de las corridas. De lo anterior, se puede atribuir que el material orgánico es el responsable de la adsorción de los iones disueltos. En consecuencia, representa una disminución en el contenido de sales que son las responsables de encontrar valores bajos para la CE.

Por otra parte, en los Cuadros 4 y 5 se muestran los resultados de los parámetros medidos en los filtros 1 y 2, respectivamente; los parámetros analizados fueron pH, CE, SDT, T y SST para las concentraciones (v/v) de 25, 50, 75 y 100%. Así mismo, en las Gráficas 2 y 3 se muestra el comportamiento de los parámetros medidos a la salida de los filtros 1 y 2, respectivamente.

En el Filtro 1, se encontró que los valores de remoción para los parámetros medidos no son significativamente diferentes a los de entrada, tomando en cuenta las cuatro concentraciones. Sin embargo, estadísticamente entre concentraciones, en la de 100 % (v/v) los parámetros de pH, TB y SST (medidos a la salida del filtro) son diferentes significativamente en comparación con las demás ($pvalue < 0.05$). Así, el pH muestra una disminución a medida que la concentración (v/v) aumenta, ver



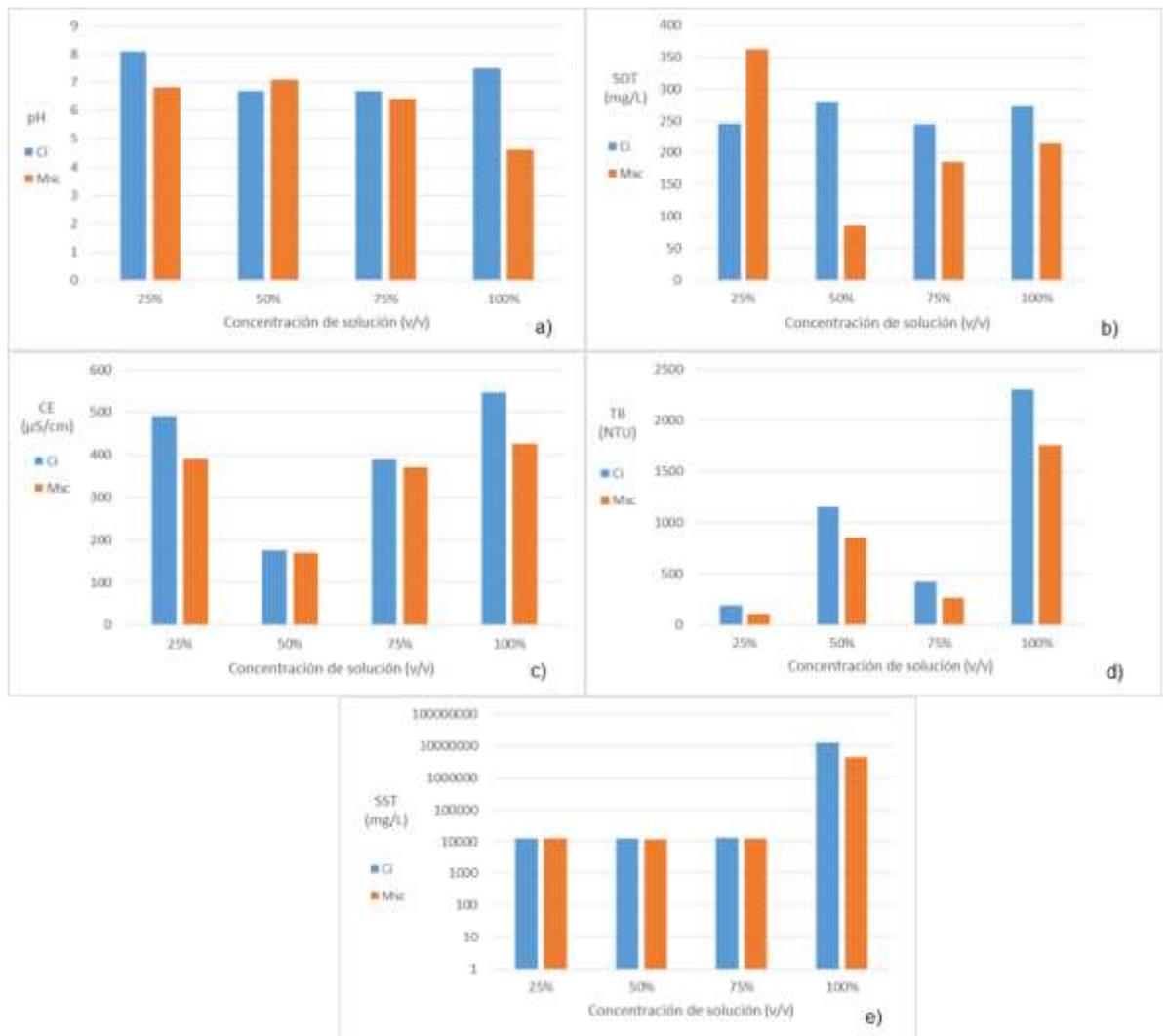
Gráfica 1. Comportamiento de los parámetros analizados en las diferentes corridas o lavados realizados en el Filtro 2.

Cuadro 4. Resultado de parámetros medidos en solución, a diferentes concentraciones de la m_i , sometidas a filtración del arreglo 1.

Concentración	Parámetro	Ci	m _b	Msd (Medición salida directa)			Msc (Medición salida corregida)*			
				1	2	3	1	2	3	
	pH	8.1	7.5	6.8	7.7	6.9	6.5	7.4	6.6	
25%	CE	μS/cm	491	187.3	416	585	667	228.3	429.3	511.3
	SDT	mg/L	245	93.7	693	292	335	615	214	257
	TB	NTU	186	0	119	139	58	119	139	58
	SST	mg/kg	12755	12816	12945	12775	13287.5	12303	12133	12645.5
	pH		6.7	7.5	7.3	7.4	7.5	7	7.1	7.2
50%	CE	μS/cm	174.6	187.3	381	311	284.6	225.3	155.3	128.9
	SDT	mg/L	278.3	93.7	191	156	142.4	113	78	64.4
	TB	NTU	1152	0	759	602	1206	759	602	1206
	SST	mg/kg	12684	12816	11713	12297.5	12683	11070	11655	12041
75%	pH		6.7	7.5	6.7	6.6	6.9	6.4	6.3	6.6
	CE	μS/cm	389	187.3	662	503	414	506.3	347.3	258.3

	SDT	mg/L	244	93.7	331	251	207	253	173	129
	TB	NTU	417	0	183	248	348	183	248	348
	SST	mg/kg	12884	12816	12846	12910	12895	12204	12268	12253
	pH		7.5	7.5	5.4	3.6	5.8	5.1	3.3	5.5
	CE	μS/cm	546	187.3	536	744	466	380.3	588.3	310.3
100%	SDT	mg/L	273	93.7	269	373	233	191	295	155
	TB	NTU	2304	0	1045	2346.5	1871.5	1045	2346.5	1871.5
	SST	mg/kg	13225806	12816	5806723	2107914	5724138	5806081	2107272	5723496

*se refiere al valor medido directamente menos el valor del blanco (m_b) a la salida del filtro



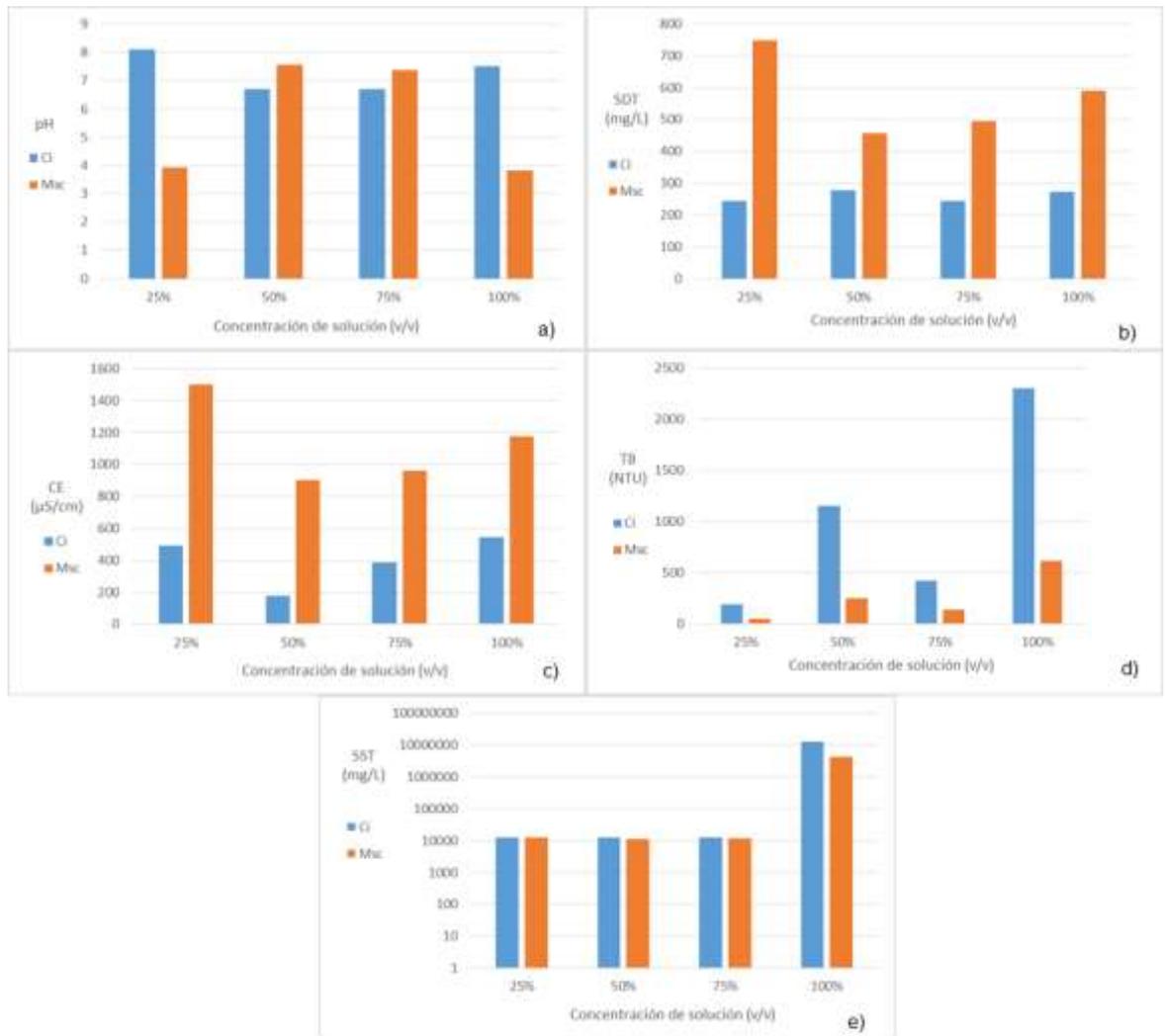
Gráfica 2. Comportamiento de remoción en los parámetros medidos en agua a diferentes concentraciones v/v en el Filtro 1: a) pH, b) SDT, c) CE, d) TB y e) SST.

Cuadro 5 Resultado de parámetros medidos en solución, a diferentes concentraciones de la m_i , sometidas a filtración del arreglo 2

Concentración	Parámetro	C_i	m_b	Medición directa (M_d)			Medición corregida (M_c)*			
				1	2	3	1	2	3	
25%	pH	8.1	7.7	3.9	2.7	5.5	3.8	2.6	5.4	
	CE	$\mu\text{S/cm}$	491	65.1	1172	2325	1111	1139	2291	1077
	SDT	mg/L	245	32.5	586	1155	556	569.2	1138.2	539.2
	TB	NTU	186	2.58	95	25.8	26.6	92.42	23.22	24.02
	SST	mg/kg	12755	12816	12670	13179	13033	12001	12510	12363
50%	pH	6.7	7.5	7.4	7.5	7.5	7.5	7.6	7.6	
	CE	$\mu\text{S/cm}$	174.6	187.3	1085	906	819	1051.5	872.5	785.5
	SDT	mg/L	278.3	93.7	556	454	410	539.2	437.2	393.2
	TB	NTU	1152	0	193	305	245	190.42	302.42	242.42
75%	SST	mg/kg	12684	12816	11247	12344	11911	10579	11675	11242
	pH	6.7	7.5	7.3	7.2	7.3	7.4	7.3	7.4	

	CE	μS/cm	389	187.3	1201	975	805	1167.5	941.5	771.5
	SDT	mg/L	244	93.7	644	488	403	627.2	471.2	386.2
	TB	NTU	417	0	83	132	202	80.42	129.42	199.42
	SST	mg/kg	12884	12816	13033	12846	12786	12363	12177	12117
	pH		7.5	7.5	4.5	4.6	2.7	4.4	4.5	2.6
	CE	μS/cm	546	187.3	871	790	1974	837.5	756.5	1940.5
100%	SDT	mg/L	273	93.7	425	395	1004	408.2	378.2	987.2
	TB	NTU	2304	0	637	741	463	634	738	461
	SST	mg/kg	13225806	12816	6168421	4533127	2088036	6167752	4532458	2087367

*se refiere al valor medido directamente menos el valor del blanco (m_b) a la salida del filtro



Gráfica 3. Comportamiento de remoción en los parámetros medidos en agua a diferentes concentraciones v/v en el Filtro 2: a) pH, b) SDT, c) CE, d) TB y e) SST.

Figura 4a. Con ello, se puede atribuir que los cationes de las familias I y II de la tabla periódica, Ca y Mg principalmente, estén siendo adsorbidos. Además, de una disminución en los contenidos de aniones como lo son el HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , entre otros. Más aún, el porcentaje de remoción en pH del valor de la solución de entrada (C_i) llega a ser de hasta un 38%. Esto es de gran importancia, ya que observando la Figura 4b, se determina que el Filtro 1 tiene una remoción de SDT en un intervalo de 21 a 69%. El valor máximo de remoción es en la concentración del 50% (v/v), estabilizándose alrededor de un 23% para concentraciones mayores. Al igual que los SDT, en la CE también se observa un porcentaje de remoción de hasta un 22% en la concentración (v/v) de 100% (Figura 4c). Por el contrario, los contenidos en TB y SST a 100% (v/v) son mucho mayores a los medidos en las demás concentraciones, ver Figuras 4d y e. No obstante, si presentan un comportamiento de remoción de TB y SST de hasta 43 y 65%.

Así mismo, se determinó que existe una correlación positiva entre los parámetros de SDT y CE ($r < 0.0001$), así como entre la TB y SST ($p = 0.03$). Lo anterior era de esperarse, ya que los SDT representan el valor total de los iones disueltos en un líquido, los cuales son proporcionales a la formación de sales responsables de la conducción eléctrica en esa solución. Además, la TB representa la transparencia que puede perder un líquido debido a la presencia de partículas suspendidas en él. Por el contrario, el pH mostró una correlación negativa con los parámetros de Tb ($p = 0.006$) y SST ($p = 0.04$). Esto nos indica que a pH bajos existe la formación por coagulación y floculación de macromoléculas (por la composición original de la muestra), coloides de ácidos carboxílicos (fúlvicos) u otros compuestos órgano-oxigenados, hasta

alcanzar un posible agrupamiento para formar partículas de mayor tamaño. No así para pH altos, donde los óxi-aniones se estén poniendo en solución para aumentar el valor de pH.

Por otra parte, en el Filtro 2 se determinó que el pH se puede clasificar en dos poblaciones, encontrando similitudes en las concentraciones de 25 y 100%, así como en las concentraciones de 50 y 75%. En consecuencia, el pH medido en las concentraciones de 50 y 75% son diferentes significativamente del medido en las concentraciones 25 y 100%, $pvalue < 0.05$. En estas últimas dos concentraciones el pH es más bajo. Además, los valores de TB y SST medidos a la salida del filtro 2 en la solución de concentración de 100% (v/v), son significativamente más altos que en el resto de las concentraciones analizadas, $pvalue < 0.05$. Así mismo, se observa que el porcentaje de remoción en este filtro es para el material particulado, ver Figura 5. Así, la Tb está siendo removida de la solución por arriba de un 67%, mientras que los SST son removidos en un intervalo de un 4 a 68%; este último en la solución de mayor concentración. Al contrario del Filtro 1, el arreglo establecido en el Filtro 2 ayuda en la remoción de partículas suspendidas. Más aún, se obtuvo un alto valor de correlación entre la TB y los SST, con $r=0.9$ y un $p < 0.0001$. La remoción en este filtro del material disuelto no puede ser comprobada, para lo cual se proponen dos alternativas. La primera, puede ser atribuida a una menor área de contacto de la solución con el material de filtración, limitando el área superficial del material orgánico con las especies químicas disueltas; esto es debido a que la mezcla de la grava con la hojarasca presenta poros de mayor diámetro. Inclusive se propone un aporte de especies disueltas por el material filtrante. En la segunda alternativa, cabe la posibilidad de que

existió un error en la toma de mediciones. De ser esto último, se recomienda repetir los experimentos para descartar cualquier error técnico existente.

Así mismo, se encontró que existe una correlación negativa del pH con los SDT y la CE, $p < 0.05$. Esto concuerda con la primer alternativa establecida, ya que al bajar el pH, se están poniendo en solución las especies químicas adsorbidas al material filtrante; principalmente cationes y aniones formadores de óxi-sales y sales hidrácidas, compuestos inorgánicos.

Finalmente, se realizó un análisis de los parámetros entre ambos filtros. Así, se encontró que los parámetros de SDT, CE y TB son significativamente diferentes entre los filtros 1 y 2 ($p\text{value} < 0.05$). Con ello se puede proponer que el arreglo en el Filtro 1 brinda una mayor remoción de las especies químicas disueltas en la solución. Por el contrario, aunque el Filtro 1 presenta remoción del material particulado suspendidos, el arreglo en el Filtro 2 mostró una capacidad mayor para la remoción de las partículas suspendidas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se logró diseñar dos tipos de arreglos para la filtración de soluciones provenientes de desechos en el proceso de barrenación, dentro de la exploración de minería. Además, se caracterizaron ambos sistemas de filtración para la remoción del material suspendido, así como la remoción de especies químicas disueltas.

Se obtuvo que ambos arreglos presentan un porcentaje de remoción adecuado. Así el arreglo de la mezcla del material filtrante presenta un mayor porcentaje de remoción del material particulado suspendido. Así mismo, el arreglo donde se utiliza material orgánico separado del inorgánico, presenta una buena opción para la remoción de especies químicas disueltas.

Estos resultados permiten concluir que la filtración con material orgánico localmente disponible es una tecnología simple y eficaz, adaptada a la problemática ambiental de los lugares aislados como es el caso de la industria minera. Los materiales utilizados en los filtros son de fácil obtención y de bajo costo, la operación de esta tecnología es simple en su operación y mantenimiento, lo que la convierten en una alternativa interesante para el tratamiento de aguas residuales.

Se recomienda llevar a cabo un estudio más detallado de los sistemas de filtración, tales como: a) aumentar el número de repeticiones en el filtrado y medición de los parámetros para concentraciones diferentes de solución contaminada, b) caracterizar las especies químicas presentes en la solución proveniente de la minería, y c) caracterizar el material filtrante. Con ello se

podrá dar un mayor aporte para la aplicación de estos sistemas como materiales de bajo coste.

Este trabajo se pretende aplicar en un proyecto de exploración minera ubicado en el SE del estado de Chihuahua.

LITERATURA CITADA

- Alloway, B.J. y D.C. Ayres. 1993. Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic & Professional. New York, USA.
- Arango, A. 2004. La biofiltración, una alternativa para la potabilización de agua. Revista lasallista de investigación. Vol. 1:61-66.
- Barrientos, H., J. Tello, C. Tito y M. Palomino. 2013. Purificación de agua por medio de filtros lentos de arena en la comunidad de "Kuychiro". Departamento académico de física. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú.
- Barba, L.E. 2002. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Bravo, V. 2015. Introducción a los Impactos Ambientales sobre los Recursos Naturales. Departamento de Economía Energética. Fundación Bariloche. Buenos Aires, Argentina.
- Bud, I., S. Duma, I. Denuț, y I. Tașcu. 2007. Water pollution due to mining activity. Causes and consequences. BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte, 152(10), 326-328.
- Cano de los Ríos, O. C. 2002. Manual de Prácticas de Laboratorio, Contaminación de Agua. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.
- Canales, R.A. 2015. Composición química y tipos de aguas naturales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo.
- Carrillo-Chávez, A., O. Morton-Bermea, E. González-Partida, H. Rivas-Solorzano, G. Oesler, V. García-Meza y E. Cienfuegos. 2003. Environmental geochemistry of the Guanajuato mining district, Mexico. Ore Geology Reviews, 23(3), 277-297.
- CEPIS/OPS. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano. Manual I: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.
- Cevallos, F.D. 2015. Evaluación de la eficiencia de sistemas de biofiltración en aguas residuales industriales. Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias. Universidad de las Américas. Quito, Ecuador.
- Chacón, K.O. 2016. Impacto de la Actividad Minera y Forestal en el Desarrollo Sustentable de la Región Minera Ocampo, Chihuahua. Disertación de

Doctorado. Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua.

- Crittenden, C., J. Howe, W. Hand, G. Tchobanoglous y R. Trussell. 2012. Principles of Water Treatment. Editor John Wiley & Sons, Incorporated.
- Delgado, G.C. 2010. La Gran Minería en América Latina, Impactos e Implicaciones. Universidad Nacional Autónoma de México. Acta Sociológica núm. 54 pp.17-47.
- Dragana, B., G. Milan, S. Velizar, Š Nada., Š. Snežan y P Nevenka. 2013. Adsorption of heavy metal ions by beech sawdust – Kinetics, mechanism and equilibrium of the process. Ecological Engineering, 58: 202– 206.
- ELAW, 2010. Guía para evaluar EIAS de proyectos mineros. Alianza Mundial de Derecho Ambiental. USA
- FEA, Cemda y Presencia Ciudadana Mexicana. 2006. El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. México.
- EPA, 1990. Environmental Pollution Control Alternatives: Drinking water treatment for small communities. Filtration technologies for small systems. Environmental protección agency, USA.
- Falconi, F. 2012. Diseño de un sistema de gestión integral de aguas residuales industriales generadas por el proceso de explotación minera en el proyecto corazón, Cantón Cotacachi. Facultad de Ingeniería en geología, minas, petróleos y ambiental. Universidad central del ecuador. Quito, Ecuador.
- Galvis, G., J. Latorre y J. Teun. 1999. Filtración en múltiples etapas, tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico. Universidad del Valle Ciénaga. Santiago de Cali, Colombia.
- García, M. 2009. Biología y geología. Cenoposiciones. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.
- Garzón, M.A., G. Buelna y G.A. Moeller. 2012. La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. Morelos, México.
- González, M. 2014. Análisis Espectral de Sólidos Suspensos en Aguas Continentales con Presencia de Actividades Mineras: Caso de Estudio Río Sipí, Pacífico Colombiano. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

- Gutiérrez, M., F.M. Romero y G. González 2007. Suelos y Sedimentos Afectados por la Dispersión de Jales Inactivos de Sulfuros Metálicos en la Zona Minera de Santa Bárbara, Chihuahua. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24:170-184.
- Hiusman, L. y W. Wood 1974. Slow sand filtration. World health organization. Ginebra, Suiza.
- Hun-Bok, J., Y. Seong-Tack, M. Bernhard, K. Soon-Oh, P. Seong-Sook, y L. Pyeong-Koo. 2005. Transport and sediment-water partitioning of trace metals in acid mine drainage: an example from the abandoned Kwangyang Au-Ag mine area, South Korea. Environ. Geol. 48, 437-449.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1990. Atlas agropecuario del estado de Chihuahua.
- INE. 2007. Industria minera. En: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/16/parte3_12.html. Consultado 23 de abril del 2015.
- Llano, B., F. Cardona, D. Ocampo y L. Ríos. 2014. Tratamiento Físicoquímico de las Aguas Residuales Generadas en el Proceso de Beneficio de Arcillas y Alternativas de Uso de los Lodos Generados en el Proceso. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Colombia.
- Martín, I. 2011 Diseño de una guía para la elaboración de filtros lentos de potabilización del agua. Universidad libre facultad de ingeniería. Bogotá, Colombia.
- Medina, A. 2012. Efecto de la granulometría sobre el desempeño de un Sistema de biofiltración utilizando material orgánico. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Jiutepec, Morelos.
- Metcalf y Eddy Inc. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales. Vertido y reutilización tomo 1 tercera edición McGraw-Hill Book Co. México.
- Moran, R.E 2001. Aproximaciones al Costo Económico de Impactos Ambientales en la Minería. Algunos ejemplos en Estados Unidos y Canadá: Ambiente y Desarrollo. Centro de Investigación y Planificación del Medio Ambiente VOL XVII: 59 – 66.
- Muhammad, N., J. Parr, M. D. Smith y A. D. Wheatley. 2005. Removal of heavy metals from storm and surface water by slow sand filtration: the importance of speciation. Urban water journal, vol. 2.
- NOM. 2001. NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA- 038-1981).

- NOM. 2015. NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Orozco, C., A. Pérez, N. González, F. J. Rodríguez, y J. M. Alfayate. 2003. Contaminación ambiental: una visión desde la química. Ed. Thomson, España, pp. 31, 41-62.
- Otero, N. 2007. Filtración de aguas residuales para reutilización. Capítulo 3 filtración. Tesis doctorales ciencias y tecnologías.
- Pérez, J. A. 1981. Manual de tratamiento de aguas. Facultad de minas, Universidad Nacional Medellín. Medellín, Colombia.
- Pesántez, J.P. 2014. Estudio del proceso de depuración de aguas residuales industriales provenientes de empresas mineras. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias químicas. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- Richards J. 2002. Sustainable Development and the Mineral Industry. Society of Economic Geologists Newsletter N° 48.
- Rodríguez, A., P. Letón, R. Rosal, M. Dorado, S. Villar y J.M. Sanz. 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Universidad de Alcalá. Madrid, España.
- Román, M. 2015. Propuesta Para la Gestión Integral del Agua en una Cuenca con Actividad Minera en el Municipio de Aquiles Serdán, Chihuahua. Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Sánchez, E. y M.L. Ortiz. 2014. Escenarios ambientales y sociales de la minería a cielo abierto. Laboratorio de Investigaciones Ambientales, Centro de Investigación en Biotecnología. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- SEMARNAT. Agua. Consultado 16 de Diciembre 2014. 82-101. En: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf
- Shelton, 1994. Field guide for collecting and processing stream water samples for the National Water-Quality Assessment program: U.S. Geological Survey Open-file Report 94-455. California Estados Unidos de América.
- SGM. 2014. Panorama minero del estado de Chihuahua. Serie panorama minero de los estados. En: <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/CHIHUAHUA.pdf> Consultado 16 de mayo del 2015.
- Vázquez, A. 2003. Estudio de trazabilidad para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en un industria alimenticia.

Departamento de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México

- Viguera, J.M. 2012. Innovación Tecnológica para Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas con Biofiltros Orgánicos. Tesis de doctorado. Instituto Politécnico Nacional. Victoria de Durango, Durango.
- Viguera, J.M, D.M.C. Aguilar, M.A. Garzón y L.A. De la Peña. 2014 Tecnología novel para tratamiento de aguas residuales con filtros orgánicos Revista ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ. Vol. XII No. 2. P 39-47.
- Vizcaíno, L. y N. Molina 2015. Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pre tratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 25 (1), pp. 43– 60.
- Yupari, A. 2015. Informe “Pasivos Ambientales Mineros en Sudamérica”. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Instituto Federal de Geo ciencias y Recursos Naturales, BGR, y el Servicio Nacional de Geología y Minería. Perú.

ANEXO 1

Principales aditivos utilizados en la barrenación, los cuales tienen las propiedades de lubricación, bajo punto de explosividad e inflamabilidad.

- 1 sodium carbonate
- 2 AMC-AUS-DET
- 3 AMC-AUS-TROL
- 4 AMC-CR-650
- 5 AMC Penetrol Xtra
- 6 BIG BEAR DIAMOND DRILL ROD GREASE
- 7 AMC ROD GREACE-XTRA TACKY
- 8 AMC- AUS- GEL XTRA
- 9 AMC- EZEE-TROL
- 10 AMC-TUBE LUBE
- 11 FORM-A-CORE
- 12 DD-2000
- 13 ULTRAVIS
- 14 DD XPAND
- 15 VIBRA STOP
- 16 DD955
- 17 TORQUELESS
- 18 THREAD COMPUND
- 19 HI-TECH 100-50
- 20 RDO 302 ES MW (Nonsoluble & Soluble)
- 21 Jabón Potásico