

**Evaluación de los parámetros de diseño del filtro que será utilizado para la
remoción de sólidos disueltos totales como hierro y cobre,
del
afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la
Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.**

Sergio Andrés Gelvez Rojas

Id. 000258124

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2019

**Evaluación de los parámetros de diseño del filtro que será utilizado para la ⁱⁱ
remoción de sólidos disueltos totales como hierro y cobre,
del
afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la
Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.**

Sergio Andrés Gelvez Rojas

Id. 000258124

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Paulo Alexander Rueda Quintero

Director del Proyecto

Alexandra Cerón Vivas

Nombre del Docente

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

Copyright © 2019 por Sergio Andrés Gelvez Rojas. Todos los derechos reservados.

Dedicatoria

iv

A mi madre, por darme la fortaleza y apoyo para sobrellevar todos los obstáculos que se nos han presentado en la vida, por acompañarme y brindarme su amor incondicional.

Agradecimientos

v

A mis padres por ser el pilar fundamental de la familia y por ser mi motivo más grande para salir adelante, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y sabios consejos.

A todos mis familiares que de una u otra manera contribuyeron para que esta meta se hiciera realidad.

A la Sociedad Minera de Santander S.A.S por su apoyo económico en la totalidad de mi carrera profesional y su apoyo en las prácticas empresariales.

A mi supervisor de la practica Ing. Paulo Rueda por su dedicación y ganas de transmitir su conocimiento.

A mi directora de trabajo de grado, Docente Alexandra Cerón, y demás docentes que me acompañaron en la formación a lo largo de las diferentes etapas vividas en la universidad.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por permitirme crecer intelectualmente, como en un gran sentido humano que la destacan.

*Para ser exitoso, tienes que dejar el miedo al éxito.
Daniel Habif*

Tabla de Contenido

vi

1.	Introducción	3
2.	Generalidades de la Empresa	5
	2.1 Historia.....	6
3.	Diagnóstico de la Empresa.....	8
4.	Estructura organizacional.....	10
	4.1 Empleados de MINESA S.A.S	11
	4.2 Propósito Empresarial.....	11
5.	Antecedentes	13
6.	Objetivos	15
7.	Actividades	16
	7.1 Inspección y función de estructuras hidráulicas	16
8.	Estudio de alternativas y principios del tratamiento	24
	8.1 Filtración.....	24
	8.2 Técnicas de filtrado utilizados para la remoción de Hierro y Cobre	26
	8.3 Principios de adsorción.....	29
9.	Evaluación de parámetros y recomendaciones de diseño	32
10.	Conclusiones	40
11.	Recomendaciones	42
12.	Lista de Referencias.....	43
13.	Anexos	49

Tabla 1. Técnica de Nano filtración en diferentes estudios..... 28
Tabla 2. Ultrafiltración en diferentes estudios para remover metales pesados..... 29
Tabla 3. Condiciones experimentales de algunos carbones..... 31
Tabla 4. Características físicas del medio filtrante 32
Tabla 5. Porcentajes de material filtrante 34
Tabla 6. Relación de altura del medio filtrante..... 36

Lista de figuras

viii

<i>Figura 1.</i> Ubicación geográfica del proyecto minero Soto Norte.	5
<i>Figura 2.</i> Estructura organizacional de la empresa Minesa S.A.S. /	10
<i>Figura 3.</i> Porcentaje de empleados de Minesa S.A.S.	11
<i>Figura 4.</i> Afloramiento de agua natural del Túnel Exploratorio. Fuente: Autor.....	16
<i>Figura 5.</i> Estructuras de aplicación de PAC. Fuente: Autor.	17
<i>Figura 6.</i> Estructuras de corrección de pH. Fuente: Autor.....	17
<i>Figura 7.</i> Filtros en serie y paralelo. Fuente: Autor.	18
<i>Figura 8.</i> Medio filtrante. Fuente: Autor.	19
<i>Figura 9.</i> Aforo de caudal del afloramiento natural de agua. Fuente: Autor.....	19
<i>Figura 10.</i> Toma de datos de Hierro y Cobre. Fuente: Autor.....	20
<i>Figura 11.</i> Aforo y toma de parámetros IN-SITU en la PTARD. Fuente: Autor.....	21
<i>Figura 12.</i> Aforo de caudal a la red hidrológica. Fuente: Autor	22
<i>Figura 13.</i> Inducción Ambiental. Fuente: Autor.	23
<i>Figura 14.</i> Diferentes configuraciones de medio filtrante. Autor	33
<i>Figura 15.</i> Distribución de filtros instalados. Autor.....	39

Lista de anexos

Anexo A. Plano del sitio el Emboque.....	49
Anexo B. Formato de registro de datos para el afloramiento de agua natural.....	50
Anexo C. Formato de seguimiento en PTARD	51
Anexo D. Formato de monitoreo de puntos de agua	52
Anexo E. Mapa de la red hidrogeológica	53

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Evaluación de los parámetros de diseño del filtro que será utilizado para la remoción de sólidos disueltos totales como hierro y cobre, del afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

AUTOR(ES): Sergio Andrés Gelvez Rojas

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Alexandra Cerón Vivas

RESUMEN

En la Sociedad Minera de Santander S.A.S se construyó en el año 2012 el túnel exploratorio El Emboque, en el cual se encontró un afloramiento natural de agua, por lo que se decidió construir una serie de estructuras hidráulicas, encargadas de tratar el agua producto del túnel y resolver preventivamente el problema de remoción de Hierro y Cobre que contiene este efluente. Los filtros como estructura principal fueron instalados como una prueba piloto, pero presentan problemas en el material de construcción, configuración del medio filtrante apropiado y una óptima geometría que mejore el espacio donde están ubicados. Por lo anterior, surge la necesidad de desarrollar la evaluación de los parámetros de diseño de unos nuevos filtros que se ajusten al área dispuesta para la instalación y la configuración óptima del medio filtrante, además que involucre la geometría de los filtros. Para el cumplimiento de los objetivos planteados se realizó un estudio de alternativas y principios de tratamientos que fueron empleados para la remoción de Hierro y Cobre, luego una serie de visitas al sitio donde se encuentra situado el túnel exploratorio de la empresa, visualizando las estructuras que se encuentran instaladas y la función que desempeñan. Por último, se realizó una hoja de cálculo en Excel que permite evidenciar los cálculos del lecho filtrante, geometría de la unidad estructural y pérdida de energía por el material filtrante, de esta manera se pudo concluir que a partir de la evaluación de los parámetros de diseño y el sitio, la mejor opción es un filtro rápido rectangular de flujo ascendente que contenga 15% de Grava como medio de soporte, 30% de carbón activado granular, 30% de antracita y 25% de arena de la altura y se pueda aprovechar el área de construcción.

PALABRAS**CLAVE:**

Filtro, Carbón activado, Hierro, Cobre, afloramiento, parámetros de diseño.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Evaluation of the design parameters of the filter that will be used for the removal of total dissolved solids such as iron and copper, from the outcrop of natural water from the Emboque exploratory tunnel of Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

AUTHOR(S): Sergio Andrés Gelvez Rojas

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Alexandra Cerón Vivas

ABSTRACT

In the Sociedad Minera de Santander SAS, the El Emboque exploratory tunnel was built in 2012, in which a natural outcrop of water was found, so it was decided to build a series of hydraulic structures, in charge of treating the water produced by the tunnel and preventively solve the problem of Iron and Copper removal that contains this effluent. The filters as the main structure were installed as a pilot test, but present problems in the construction material, configuration of the appropriate filter medium and an optimum geometry that improves the space where they are located. Therefore, the need arises to develop the evaluation of the design parameters of new filters that fit the area provided for installation and optimal configuration of the filter medium, in addition to involving the geometry of the filters. For the fulfillment of the proposed objectives, a study was made of alternatives and treatment principles that were used for the removal of Iron and Copper, then a series of visits to the site where the company's exploratory tunnel is located, visualizing the structures that they are installed and the function they perform. Finally, a spreadsheet was made in Excel that shows the calculations of the filtering bed, geometry of the structural unit and loss of energy by the filtering material, in this way it was possible to conclude that from the evaluation of the parameters of design and site, the best option is a rectangular upflow fast filter containing 15% Gravel as a medium of support, 30% granular activated carbon, 30% anthracite and 25% sand of the height and can be used the construction area.

KEYWORDS:

Filter, activated carbon, iron, copper, outcrop, design parameters.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. Introducción

El agua es uno de los compuestos químicos más importantes para los seres humanos y la vida en general, este recurso puede estar almacenado en diferentes sitios, como por ejemplo en el subsuelo del planeta. Las aguas subterráneas en Colombia constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, puesto que son reconocidas por ser fuentes alternas de aprovechamiento en lugares donde existe acceso limitado a aguas superficiales, como también su influencia en obras civiles, túneles, carreteras y proyectos mineros, entre otros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Los metales son elementos que pueden encontrarse de forma natural y disuelta en el agua, según el tipo de suelo y rocas presentes a lo largo de una corriente superficial. En concentraciones traza, muchos de estos metales son necesarios para la vida acuática y para la salud humana, algunos son nutrientes esenciales para las plantas y los animales, micronutrientes como Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Zinc (Zn), Escandio (Sc) y Vanadio (V) mientras que otros elementos como el Níquel (Ni), Estaño (Sn) y Cromo (Cr) son esenciales únicamente para los animales (Domenech & Peral, 2008).

El agua subterránea adquiere su composición química de una variedad de fuentes, puesto que presenta un aumento en la disolución y suspensión de los constituyentes, esto se debe a el contacto con gases, líquidos y sólidos que se encuentran durante el pasaje del ciclo hidrológico, desde que desciende y entra en contacto con el suelo y litología del subsuelo, determinando los ambientes químicos en el que se encuentran los elementos trazas (G. Galindo, M.A.Herrero, M.Flores & J.L.Fernandez T, 1999).

En base a las afirmaciones anteriores, este tipo de alteraciones en la composición fisicoquímica del agua sugiere la necesidad de desarrollar diferentes sistemas convencionales para el tratamiento de efluentes contaminados con concentraciones de metales pesados; estos sistemas van ajustados a las necesidades de cada región, adecuando modelos apropiados al entorno técnico, económico, ambiental y social.

Debido a que el afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la Empresa MINESA S.A.S. presentan en su composición química metales como Hierro y Cobre, se aborda la necesidad de evaluar nuevos parámetros de diseño para la construcción a futuro de un filtro, que utilice como principio la adsorción del carbón activado, debido a que es una tecnología efectiva para este tipo de contaminantes, de acuerdo al Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico RAS y demás literatura.

2. Generalidades de la Empresa

La Sociedad Minera de Santander S.A.S., (MINESA S.A.S.), es una empresa enfocada hacia la exploración para la valoración de los recursos minerales de oro, plata, cobre y demás concesibles, en su proyecto denominado Soto Norte, que se encuentra ubicado en el área rural del Municipio de California – Santander.

El proyecto minero, se encuentra localizado en la provincia Soto Norte al Noreste de la ciudad de Bucaramanga. Para acceder al área de influencia se conduce a través de una vía de 53 Km, con un tramo de 20 Km, pavimentados y el resto del trayecto es una vía carretable sin pavimentar. Durante esta trayectoria se pasa a través de los Municipios de Matanza y Surata, hasta llegar al Municipio de California-Santander, donde posteriormente se toma una vía terciaria que conduce a las inmediaciones del área de influencia directa de interés. Dentro del área de influencia del proyecto se encuentran localizadas las veredas Centro, La Baja y Angosturas; que pertenecen al área rural del Municipio de California-Santander como se ilustra la Figura 1. (Rueda P, 2018).



Figura 1. Ubicación geográfica del proyecto minero Soto Norte. Adaptado de Departamento de Geología de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

2.1 Historia

A mediados de los años 90, cuando el Ministerio de Minas otorgó varias licencias para la exploración de oro en la región de California, en las estribaciones de la cordillera Oriental; una de esas concesiones a 10 años la recibieron los particulares Jesús Hermes Arias y Alonso Amaya. Como ellos, otros mineros fueron beneficiarios de licencias similares. Sin embargo, a partir de 2009, varios de esos buscadores de oro fueron cediendo sus derechos a la sociedad CVS Explorations Ltda., que terminó sumando títulos hasta consolidar una apreciable extensión de terreno para la explotación de oro en una veta promisoría. En noviembre de 2011, después de una reforma en la sociedad CVS Explorations Ltda. y para facilitar las anotaciones en el Registro Minero Nacional, la firma cambió su nombre por AUX Colombia Limitada. Según el certificado de existencia y representación legal de la época, esa firma tenía como socio principal a Carlos Alfredo Urrutia Valenzuela, quien nueve meses después asumió como embajador de Colombia en Washington. No obstante, con el tiempo se supo que el yacimiento de California quedó en manos del poderoso grupo económico EBX, del empresario brasileño Eike Batista, quien para ese momento era considerado como el séptimo hombre más rico del planeta.

En los siguientes meses, bajo el amparo de la ley que le otorgó privacidad y agilidad a la creación de sociedades, AUX Colombia cambió también su razón social por AUX Colombia SAS y en mayo de 2013, pactó con la Agencia Nacional de Minería un nuevo contrato de concesión. El acuerdo quedó pactado hasta junio de 2028 para hacerlo efectivo, era un área de 351 hectáreas distribuidas en cinco zonas del territorio. Aunque en tiempo reciente la actividad minera en la zona se vio afectado por la presencia de personas al

margen de la ley ELN, este factores ya no fue relevantes para retardar la puesta en marcha de producción minera; la nueva problemática fue de tipo ambiental, donde la principal discordia entre el área de influencia y sus aledaños, es la proximidad del proyecto a el páramo de Santurban que obligo a esperar las delimitaciones de línea de páramo por parte del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. El actual representante de la empresa AUX Colombia y Cesar Torresini ratificó que Mubadala Development Company recibió la empresa por un proceso de reestructuración de deuda. Fue así entonces que se conformó legalmente la Sociedad Minera de Santander S.A.S, que fue relevó a AUX limitada en los títulos mineros de California Santander y se hizo pública en el municipio el 11 de noviembre de 2015 (Hernández, 2015).

3. Diagnóstico de la Empresa

MINESA S.A.S. se encuentra actualmente en la fase exploratoria geológica del subsuelo y superficie; con la finalidad de ubicar zonas importantes, para así luego delimitar e identificar recursos minerales de interés económico, para su posterior estimación de reservas mediante el uso de métodos sistemáticos. Por motivos de ampliar el estudio estructural del suelo y verificar el reservorio de minerales que contiene los títulos mineros, la empresa decide realizar la construcción del túnel exploratorio El Emboque a inicios del año 2012, con una profundidad de 160 m, siguiendo las pautas de la Guía Minero Ambiental, encontrando un afloramiento de agua natural en el momento de construcción de este.

El tratamiento del afloramiento de agua natural del túnel exploratorio tiene una serie de procesos, donde inicia con la captación del efluente por canales que están distribuidos a lo largo del túnel y se encuentran a los costados. Fueron construidos el 80% en concreto con sección transversal rectangular y el 20% en tubería de PVC de 6", en el interior del túnel se distribuyeron tres puntos estratégicos, dos puntos para la aplicación de caliza y un tercer punto para la aplicación de Poli cloruro de Aluminio (PAC) que tienen como objetivo el ajuste de pH inicial del afloramiento natural; posteriormente llega por la tubería a una estructura de aforo y dosificación que está construida en concreto, donde se dosifica Poli cloruro de Aluminio, cuya función es producir la alteración en la carga eléctrica a nivel iónico de las partículas, haciendo que estas se atraigan entre sí y formen juntas una partícula más grande (flocs) para permitir que los metales (Hierro y Cobre) se precipiten, en esta estructura también se realiza una corrección de pH al efluente del túnel exploratorio con

soda caustica y por último se realiza el aforo de caudal total y toma de parámetros físico químicos que produce el afloramiento de agua natural del túnel exploratorio Emboque donde se realiza mensualmente; finalmente el efluente pasa por una serie de reductores de velocidad hasta llegar a 6 filtros que contienen material filtrante como (grava, arena torpedo y carbón activado) y con un volumen de 5000 L cada uno, finalmente pasa a un tanque de flujo ascendente-descendente de 43 m³ que desempeñan el papel de remoción de sólidos disueltos totales como Hierro y Cobre.

El mantenimiento que se realiza a los filtros es un retro lavado en dirección opuesta (descendente) al ingreso del efluente, a pesar de los diferentes problemas que presentan en su operación, cumplen la función de remover concentraciones de metales como Hierro y Cobre presentes en este efluente cumpliendo con la norma referente a los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, (Res. 0631 del 2015).

4. Estructura organizacional

MINESA S.A.S. está constituido por un excelente equipo humano, con la experiencia, cualidades y conocimientos especializados en el cumplimiento de los objetivos empresariales y el reconocimiento de los resultados esperados, la estructura organizacional de MINESA S.A.S. se observa en la Figura 2.

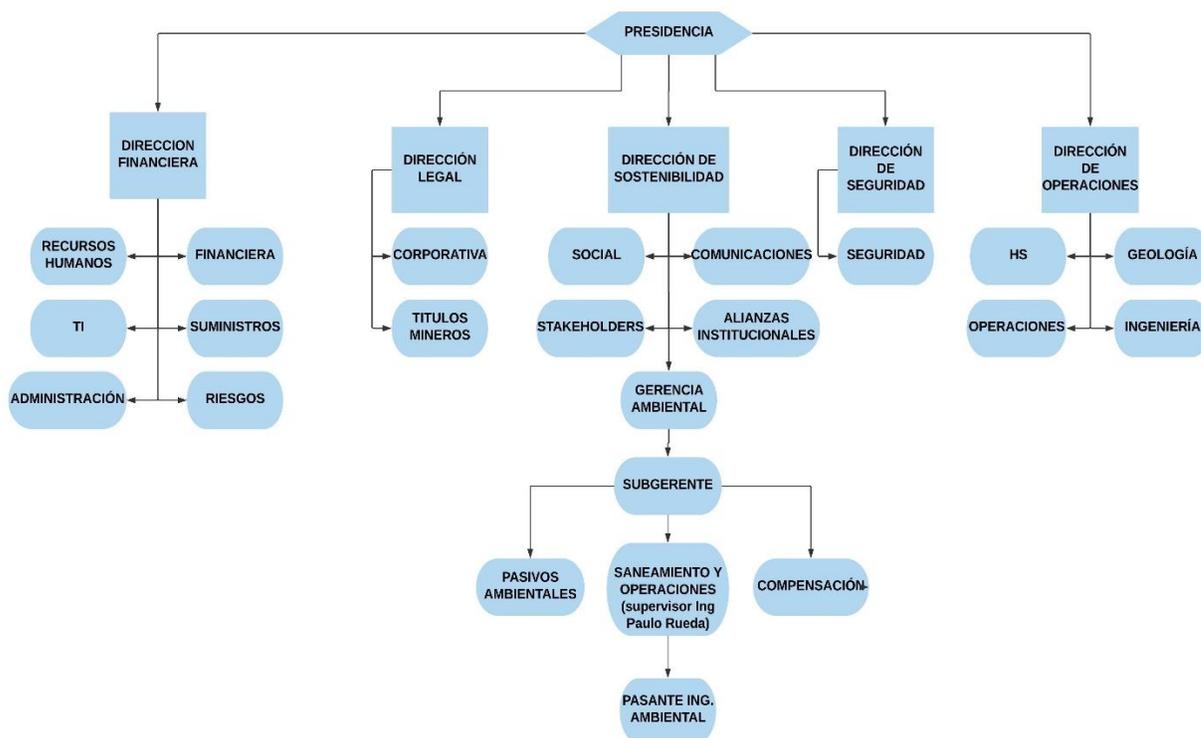


Figura 2. Estructura organizacional de la empresa Minesa S.A.S. Adaptado de <https://www.minesa.com/quienes-somos/equipo-corporativo/>

La persona encargada de supervisar las labores realizadas en la práctica empresarial es Paulo Rueda, Ingeniero Ambiental responsable del área de saneamiento ambiental, operaciones ambientales y apoyo técnico a la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

4.1 Empleados de MINESA S.A.S

La empresa cuenta con un talento humano considerado como el activo más valioso dentro de la organización, razón por la cual MINESA S.A.S. está comprometida con el desarrollo integral de todos sus colaboradores y su número se representa en la Figura 3.

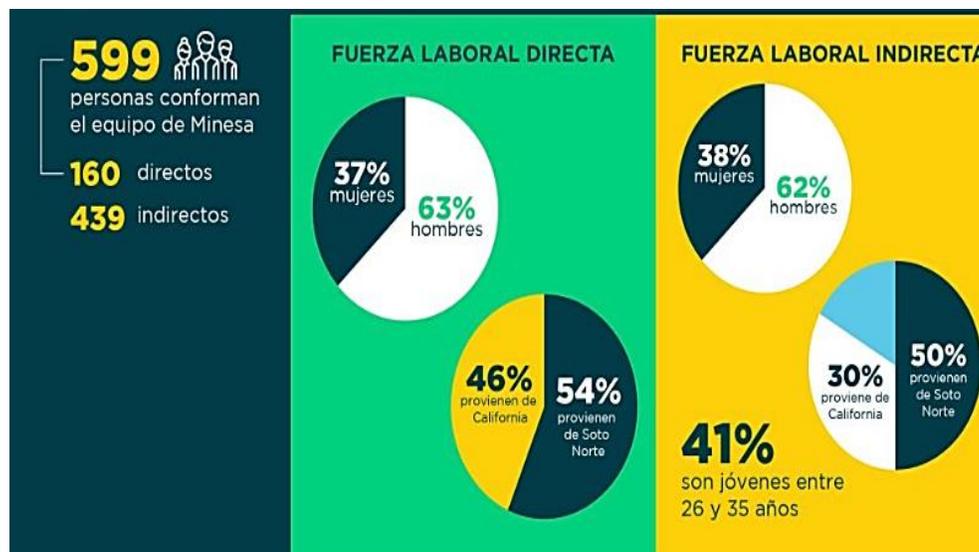


Figura 3. Porcentaje de empleados de Minesa S.A.S. Recuperado de <https://www.minesa.com/quienes-somos/equipo-corporativo/>

Sus oficinas se encuentran ubicadas en la ciudad de Bucaramanga Transversal Oriental # 90-102, Torre Empresarial Cacique piso 11 y números de contacto +57 7 6971200 y correo electrónico info@minesa.com.

4.2 Propósito Empresarial

Misión

- Proteger nuestros recursos naturales.
- Mejorar la vida de la gente y las comunidades locales contribuyendo con el desarrollo económico a Santander y Colombia.

- Hacer uso de la última tecnología y sistemas de negocio para tener una operación minera segura, eficiente y rentable.

Visión

- La compañía líder en minería de oro más admirada en Colombia.

5. Antecedentes

En los diferentes tratamientos a efluentes que contienen metales pesados como hierro y cobre, han sido utilizados procesos físicos como filtración, adsorción y sistemas de membrana, (Othman, F, 2001). Estos estudios indican que la eliminación de Cu está influenciada por el medio y no solo por el pH. Los resultados obtenidos para el medio filtrante de piedra caliza y el carbón activado obtuvieron una eficiencia de remoción de metal alrededor del 95%.

De igual manera las investigaciones realizadas por -Hamidi Abdul Aziz-, (2004) concluyeron que, a un tiempo de retención de 57,8 min, una tasa de carga superficial de 12,2 m³/m² día y una carga de metales por debajo de 0,5 kg de metales/m³ día, se obtuvo una eficiencia de remoción por encima del 90% durante los primeros 30 días utilizando la piedra caliza como medio alternativo para el tratamiento. Como complemento se puede resaltar el estudio de -Herbert Mpagi Kalibbala-, (2012), donde demuestran que el sistema de filtro horizontal con piedra pómez natural es una opción prometedora para el tratamiento de este tipo de aguas. El filtro registró reducciones promedio del hierro total y ferroso del 39% y 89%, respectivamente.

Los drenajes ácidos de minas generan gran impacto ambiental, principalmente a recursos como suelo y agua, surgiendo la necesidad de implementar un tratamiento, de acuerdo con la naturaleza del efluente; De acuerdo a -Chaparro-. (2015), los métodos de tratamiento más comunes requieren una supervisión constante del sistema, electricidad, insumos químicos, remoción de subproductos, entre otros. Comúnmente el proceso que ocurre en un drenaje de mina ácido inicia en una fase previa de oxidación del hierro ferroso (Fe²⁺)

al estado férrico (Fe^{3+}), a través de aireación natural o mecánica, posteriormente se adiciona un agente neutralizante, para subir el pH y precipitar los metales que están presentes en el agua, y finalizando se adiciona un agente floculante para remover los sólidos suspendidos remanentes en el efluente de la mina. El tratamiento anteriormente mencionado suele ser eficaz, aunque muy costoso por los reactivos, equipos y la necesidad de tener un operario presente en el sistema o energía permanente (Rötting et. 2015)

En otras ocasiones para la remoción de Hierro Férrico se han implementado tratamientos poco convencionales, como un filtro de sustrato alcalino disperso cálcico, el cual está conformado principalmente por cascaras de huevo de gallina, que al ser un sustrato alcalino aumenta las condiciones de pH a niveles óptimos para la precipitación de este metal trivalente que es retenido en casi su totalidad con una eficiencia entre 99.6 a 99.9 % de eficiencia (Cisneros Figueroa, D.F, 2017).

6. Objetivos

Objetivo General

Evaluar los parámetros de diseño del filtro que será utilizado para la remoción de sólidos disueltos totales como hierro y cobre del afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

Objetivos específicos

Estudiar alternativas de tratamiento para la remoción de hierro y cobre presente en el agua natural del túnel exploratorio el Emboque de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

Evaluar los parámetros de diseño de un filtro para la remoción de hierro y cobre que se implementará en el afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

Establecer las recomendaciones técnicas producto de la evaluación realizada al filtro que se implementará en el afloramiento de agua natural del túnel exploratorio del Emboque de la Empresa Sociedad Minera de Santander S.A.S.

7. Actividades

7.1 Inspección y función de estructuras hidráulicas

- **Emboque**

Se realizó visitas al sitio de influencia del proyecto minero Soto Norte de la Empresa Minera de Santander MINESA S.A.S, se logró observar cómo está distribuida la topografía del terreno y como se encuentra distribuida el área conocido como el Emboque, como se puede observar en el plano del Anexo A que fue proporcionada por el departamento de Geología. Las actividades realizadas se iniciaron en primera parte con la inspección del lugar donde se origina el afloramiento natural de agua al interior del túnel exploratorio como se percibe en la Figura 4.



Figura 4. Afloramiento de agua natural del Túnel Exploratorio. Fuente: Autor.

En este túnel se encuentra posicionado una estructura hidráulica como se detalla en la Figura 5, que tiene la función de dosificar con 5 ppm de PAC (Poli cloruro de Aluminio). Esta dosificación está basada en múltiples estudios realizados por la empresa; y su objetivo es realizar una coagulación al afloramiento, debido a que en la unidad donde se efectúa la

aplicación del polímero cuenta con un pequeño resalto hidráulico, beneficiando así la mezcla completa y óptima.



Figura 5. Estructuras de aplicación de PAC. Fuente: Autor.

En la parte exterior del túnel se encuentran ubicados dos estructuras que corresponden a un lazo medidor de pH y una bomba dosificadora de Soda Cáustica como se visualiza en la Figura 6, donde su propósito es dosificar la soda a la fuente hídrica en dosis de 10 ppm y así regular el pH que oscila entre valores de 7-8 una vez es aplicado. La bomba dosificadora tiene una serie de programación que ayuda a que la operación sea más sencilla, debido a que se ajusta para que a partir de la lectura de pH dosifique automáticamente hasta llegar al rango esperado.



Figura 6. Estructuras de corrección de pH. Fuente: Autor.

Siguiendo el recorrido de las estructuras hidráulicas, llega a una serie de filtros, inicialmente a tres filtros y luego pasan a los siguientes tres, estos se encuentran instalados en la parte baja del sitio del emboque como se ve en la Figura 7, esta ubicación se escogió por la topografía del terreno y para que el flujo se moviera en sentido de la gravedad, optimizando así los costos por energía.



Figura 7. Filtros en serie y paralelo. Fuente: Autor.

Estos filtros fueron construidos como una prueba piloto que realizó la empresa con la necesidad de tratar el agua producida por el afloramiento natural, dando buen resultado en la remoción de Hierro y Cobre, el medio filtrante que se empleó fue: Arena, Antracita, Carbón Activado granular y como medio de soporte se utilizó la Grava gruesa como se observan en la Figura 8.



Figura 8. Medio filtrante. Fuente: Autor.

- **Apoyo a labores de la empresa**

De acuerdo a la práctica empresarial que se realizó en la empresa MINESA S.A.S., se contribuyó con las diferentes labores que realiza el departamento ambiental, específicamente el área de saneamiento y operaciones, ofreciendo el apoyo a actividades como:

- ✓ **Aforo de caudal al afloramiento de agua natural**

Se realizó el aforo de caudal al afloramiento de agua natural al interior del túnel, en una canaleta de forma rectangular y afuera en una estructura que fue hecha para este tipo de aforo, el aforo de caudal fue efectuado con el molinete, como se representa en la Figura 9 y se contribuyó en la toma de datos en campo a partir de los formatos que se utilizan y se observan en el Anexo B que son utilizados para este tipo de actividad, con el fin de contribuir a la retroalimentación de la base de datos del departamento ambiental.



Figura 9. Aforo de caudal del afloramiento natural de agua. Fuente: Autor.

✓ Toma de datos de Hierro y Cobre

Se ayudó en las labores relacionadas a la toma de datos de Hierro y Cobre mediante los checkers portátiles, en el origen del afloramiento como en el efluente que trata los filtros instalados como se aprecia en la Figura 10. Esta actividad se realiza con el fin de retroalimentar la base de datos del departamento ambiental que es la encargada del seguimiento, inspección y operación del tratamiento utilizado en el afloramiento de agua natural.



Figura 10. Toma de datos de Hierro y Cobre. Fuente: Autor.

✓ Operación de PTARD

Conforme a las otras labores realizadas por parte del área de saneamiento y operaciones, se acompañó en la operación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Domestica (PTARD), efectuando funciones de aforo de caudal del afluente y toma de parámetros IN-SITU en diferentes unidades hidráulicas de la planta como se ve en la Figura 11, estos datos son registrados en libros que poseen un formato que se percibe en el Anexo C y es una herramienta indispensable para alimentar la base de datos del área de saneamiento.



Figura 11. Aforo y toma de parámetros IN-SITU en la PTARD. Fuente: Autor.

✓ **Monitoreo a red hidrológica**

Con el cumplimiento de las diferentes tareas trazadas por el departamento Ambiental, se efectuó el acompañamiento a los puntos de muestreo de la red hidrológica realizada por la empresa, donde se realiza principalmente el aforo de caudal a diferentes cuerpos hídricos como se contempla en la Figura 12, estos puntos están distribuidos en diferentes sitios en la zona de influencia de proyecto Minero de Soto Norte como se muestra en el Anexo D, ya que resulta ser una información útil para la construcción del documento del estudio de impacto ambiental que radicó MINESA S.A.S. frente a la Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA).



Figura 12. Aforo de caudal a la red hidrológica. Fuente: Autor

✓ **Inducción Ambiental**

La inducción Ambiental es obligatoria para todo trabajador directo, contratista y/o visitante que ingresa a la empresa, fue realizada en varias ocasiones con el fin de apoyar al personal de área de ambiental, como se observa en la Figura 13. La evidencia del formato de asistencia de la inducción realizada se presenta en el Anexo E.

Los temas tratados durante la inducción son:

- ✓ Residuos sólidos
- ✓ Uso y ahorro eficiente del agua
- ✓ Flora
- ✓ Fauna
- ✓ Ruido



Figura 13. Inducción Ambiental. Fuente: Autor.

8. Estudio de alternativas y principios del tratamiento

A partir de los filtros utilizados en el tratamiento del afloramiento natural de agua para la remoción de Hierro y Cobre disueltos, se realizó una búsqueda de las diferentes alternativas que se han implementado para este tipo de aguas con presencia de estos metales.

8.1 Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad (Maldonado Yactayo, 2004). Es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante.

Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento (Maldonado Yactayo, 2004).

Los mecanismos de filtración por transporte son influenciados, principalmente por las características físicas y químicas del afluente, del pretratamiento químico, de la tasa de filtración, del medio filtrante y del método de operación (Di Bernardo, 1993). Estas son:

- ✓ **Cernido:** Ocurre cuando la partícula es de mayor tamaño que los poros del medio filtrante, esto ocasiona que la partícula quede atrapada en los intersticios; por lo general, este mecanismo ocurre en las capas superficiales del medio, (Arboleda Valencia, 2000).

- ✓ **Sedimentación:** La sedimentación solo puede producirse con material suspendido relativamente grande y denso, cuya velocidad de asentamiento sea alta y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja. (Maldonado Yactayo, 2004).
- ✓ **Intercepción:** El mecanismo de intercepción es llevado a cabo por el contacto de las partículas floculentas con la superficie de los granos del lecho o con partículas de floc ya depositadas en la superficie (Arboleda Valencia, 2000).
- ✓ **Impacto inercial:** Este mecanismo consiste en el transporte de partículas por los granos del medio filtrante cuando el movimiento alcanzado por la partícula es tan grande que permite seguir su propia trayectoria diferente a la línea de flujo y colisionar con los granos del lecho impulsada por las fuerzas de inercia (Arboleda Valencia, 2000)
- ✓ **Difusión:** El mecanismo de difusión se rige por el movimiento browniano donde las partículas que se hallan en un medio fluido se desplazan en movimientos aleatorios. De esta forma, las partículas tienden a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración atravesando los espacios intersticiales del lecho filtrante (Di Bernardo, 1993).
- ✓ **Acción Hidrodinámica:** Este mecanismo se atribuye a la remoción de partículas con tamaño relativamente grande. Cuando se considera el escurrimiento con gradiente de velocidad constante, las partículas suspendidas en el agua estarán sometida a velocidades tangenciales variables en la dirección perpendicular al escurrimiento; esto hace que la diferencia de velocidades haga girar la partícula y sea conducida para la región de velocidad más alta (Di Bernardo, 1993).

La adherencia es atribuida a algunos tipos de fenómenos que ocurren como la interacción entre las fuerzas eléctricas y las fuerzas de Van der Waals entre las partículas y la superficie de los gránulos de un lecho filtrante (Di Bernardo, 1993).

- ✓ **Fuerzas de Van der Waals:** Estas fuerzas entre las partículas que están presentes en el medio filtrante y las partículas que están suspendidas en el líquido a tratar, se generan energías atractivas debido a el movimiento de electrones en sus orbitas, que hace que se unan entre sí. (Pérez Jorge,1981)
- ✓ **Fuerzas Electrostáticas:** Se considera como la principal responsable de la adhesión de material suspendido al medio filtrante debido a las cargas de polos opuestos que contiene el medio y los sólidos suspendidos, generando una fuerza de atracción, por el contrario, si el medio filtrante posee una carga negativa y los sólidos son neutros, se presenta una barrera de energía y puede producir un efecto de retención. (Pérez Jorge,1981).

8.2 Técnicas de filtrado utilizados para la remoción de Hierro y Cobre

- **Filtro rápido**

El filtro rápido por gravedad es el tipo de filtro más utilizado en tratamiento de aguas. La operación de filtración supone dos etapas: filtración y lavado (Romero Rojas, 2006). Los filtros rápidos convencionales constan de tanques rectangulares en concreto de 3.5 a 5 m de profundidad total, en el cual se coloca un lecho de arena y grava sobre un sistema de drenaje. Se debe realizar un lavado del filtro invirtiendo el sentido del flujo con agua inyectada a presión, debido a que a un intervalo de tiempo de funcionamiento este se obstruye. (Arboleda, 2000). Se puede dividir en dos tipos:

- ✓ **Filtración directa**

Utiliza primero un coagulante químico, como sales de hierro o aluminio, las cuales se agregan al agua fuente. Después, se agita la mezcla lentamente para inducir la unión de las partículas pequeñas en suspensión “flóculos”; en seguida pasa el agua fuente a través de filtros para que las partículas restantes se adhieran por sí mismas al material de filtro (Global Health and Education Foundation, 2007). Los medios filtrantes granulares deben retener sólidos suspendidos (incluyendo el Fe y Mn oxidados) con tamaño mayor a 10 mm. Un lecho filtrante diseñado adecuadamente y operando en condiciones óptimas es capaz de remover la mayoría de las partículas con tamaños de 5 a 10 mm (Sommerfeld., 2000).

- **Filtración por Membrana**

Esta tecnología presenta altas eficiencias, debido a que requiere poco espacio y es de fácil operación, esta técnica se emplea en procesos de tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas. Las membranas que se seleccionan en este método van de acuerdo con características como su peso molecular, material de la membrana (sintéticos, polímeros naturales modificados), permeabilidad y solubilidad del solvente, (Taylor & Wiesner, 2002).

- **Nano filtración**

Esta técnica de tratamiento de agua es relativamente reciente, ya que utiliza membranas con poros muy pequeños (<1 nm) y requiere presiones de funcionamiento en el rango de 10-50 bar. Por lo tanto, las membranas empleadas para la nano filtración son capaces de retener especies neutras con peso molecular <200-300 g/mol, y también para rechazar iones inorgánicos por un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada, presenta mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, (González, et al; 2006). Según la Tabla 1 muestra los tipos de especies que se removieron a diferentes condiciones y la eficiencia de remoción de esta técnica.

Tabla 1. Técnica de Nano filtración en diferentes estudios

Especie	Condiciones				Método y complemento	% Eficiencia de remoción	Ref.
	pH	Concentración Inicial	t _{tr}	Temperatura °C			
Pb ²⁺ Cd ²⁺	5,8	150 mg/L, 40 mg/L	10h	25	Nanofiltración, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros 0,262 nm.	98,5 -96	Gherasim, et al; 2013
Fe ²⁺ , Al ²⁺ , Mg ²⁺	6-7	4920 mg/L, 3050 mg/L, 3400 mg/L	36h	25	Purificación de ácido fosfórico por nanofiltración. Membrana DS5 DL 0,5 nm.	98 - 96	González, et al; 2006
Cd ^{1/2} , Zn ²⁺	2- 11	80 mg/L	4- 24h	20-22	Tartrato de sodio y potasio (PST) en un proceso de nanofiltración con membrana GE Osmosnic en poliamida aromática.	95,5 - 98	Liu, et al; 2012
Mg ²⁺ Li ⁺	6-7	2000, 8000 mg/L	NA	20	Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90.	80,1 - 85	Bi, et al; 2014

t_{tr}: Tiempo de tratamiento

Fuente. Recuperado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Caviedes, D; Muñoz, R; Perdomo, A; Rodríguez, D; y Sandoval, I. (2015). *Revista Ingeniería y Región*, 13(1):73-90.

- **Ultrafiltración**

Es un proceso de fraccionamiento selectivo utilizando presiones de hasta 145 psi (10 bares). Su principio es concentrar sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 umas. El permeado contiene solutos orgánicos de bajo peso molecular y sales (Alka, et al; 2012). La Tabla 2 hace referencia a la técnica para la efectividad de remoción de los diferentes metales presentes en aguas residuales industriales.

Tabla 2. Ultrafiltración en diferentes estudios para remover metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Ref.
	pH	Concentración Inicial	t _{Tr}	Temperatura °C	Método y complemento		
Cd ²⁺ , Fe ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ⁺² , Ni ⁺²⁺	6,5	20mM	2,5 h	Ambiente	Nanofiltración micelar mejorada con nonaoxietileno oleiléter RO90 en contraste con dodecil-sulfato de sodio (SDS).	> 95	Schwarze, et al; 2015
Cd ²⁺ , Cu ²⁺	3,5-4,5	0,4-0,7mg/L, 0,4-0,6mg/L	NA	25	Separación de Cd y Cu de aguas ricas en fosforo por ultrafiltración micelar mejorada, membrana Amicon 8400 stirred cell, Millipore.	84,3 y 75,0	Landaburu, et al; 2011
Cd ²⁺	2-13	50mg/L	NA	5-45	Evaluación de micelar mejorada ultrafiltración con agentes tensoactivos mixtos.	98	Huang, et al; 2014

t_{Tr}: Tiempo de tratamiento

Fuente. Recuperado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Caviedes, D; Muñoz, R; Perdomo, A; Rodríguez, D; y Sandoval, I. (2015). *Revista Ingeniería y Región*, 13(1):73-90.

8.3 Principios de adsorción

La técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo de adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo (Liu & Lee, 2014).

Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, Zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias (Osei Boamah, et al; 2015).

- **Carbón activado**

El carbón activado es un producto comercial con superficie específica alta, de carácter micro poroso y una alta capacidad de adsorción, por lo tanto, elimina una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos y metales pesados presentes en medios acuosos. (Aghakhani, A, Mousavi S., MostafazadehFard B. 2013.)

Según la Agencia para la Protección Ambiental de EEUU (USEPA) recomienda el carbón activado como una de las mejores tecnologías disponibles para la remoción de contaminantes orgánicos (Mukherjee et al., 2007).

La principal propiedad de este material filtrante es la adsorción y ha demostrado ser muy eficaz para la remoción de metales tóxicos presentes en fase líquida (Basso et al., 1992), su principal desventaja radica en el costo del adsorbente, ya que puede ser muy alto, según Méndez et al. (2008). En la Tabla 3 se exponen las condiciones de tres estudios mediante este método.

Tabla 3. Condiciones experimentales de algunos carbonos

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Ref.
	pH	Concentración Inicial	tTr	Temperatura °C	pH		
Pb ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cd ²⁺	5	10-180 mg/L	24h	20	Carbón mesoporoso ordenado CMK-3.	Desde 29 mg/g de Zn ²⁺ a 177 mg/g de Pb ²⁺	Barczak, <i>et al</i> ; 2015
Cr	7,8	0,12 mg/L	2min	Ambiente	Fe-BC (hierro a base de carbón de bambú)	>0.05 mg/L	Wang, <i>et al</i> ; 2011
Pb ²⁺	4	100 mg/L	6h	Ambiente	Carbón activado procedente de huesos de vaca.	50%	Prado, <i>et al</i> ; 2014
Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺	5,5	10-100 mg/L	5min - 20h	20-40	Carbón activado producido a partir de piedras tunecinas.	18,68 mg/g de Cu, 16,12 mg/g de Ni y 12,19 mg/g de Zn	Bouhamed, <i>et al</i> ; 2015

t_{Tr}: Tiempo de tratamiento

Fuente. Recuperado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Caviedes, D; Muñoz, R; Perdomo, A; Rodríguez, D; y Sandoval, I. (2015). *Revista Ingeniería y Región*, 13(1):73-90.

9. Evaluación de parámetros y recomendaciones de diseño

El filtro que se le evaluaron los parámetros de diseño, es un filtro directo de flujo ascendente de forma rectangular con caudal de diseño de 18 L/s proporcionado por la empresa y un material filtrante que consta de arena, antracita, carbón activado y un medio de soporte como la grava; esta opción se escogió de las diferentes técnicas que han sido empleadas para la remoción de Hierro y Cobre, mencionadas anteriormente, combinando el filtro rápido directo con la propiedad adsorbente del carbón activado, por lo cual este filtro puede ser una opción económicamente viable y con buenos resultados en la remoción de estos metales que contiene el afloramiento de agua natural, según la prueba piloto que realizó la empresa.

- **Propiedades de los medios filtrantes**

Se escogieron los diferentes medios filtrantes con sus respectivos tamaños con base a la prueba piloto que vino desarrollando la empresa y apoyándose en el RAS 2000 título C, como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Características físicas del medio filtrante

	<i>Tamaño Efectivo (TE)</i>	<i>Coficiente de uniformidad (Cu)</i>
<i>Arena</i>	0,45-0,65 mm	1,35-1,70
<i>Antracita</i>	0,45-0,60 mm	≤1.7
<i>Carbón activado granular</i>	0,55-0,75 mm	≤1,7
<i>Grava</i>	25-50 m	-

Nota. Elaboración por el Autor

- **Configuración del material filtrante**

A Continuación se muestra en la Figura 14 una serie de configuraciones del lecho filtrante con diferentes materiales, a partir de estas referencias se hace una propuesta de una distribución de los medios filtrantes que se utilizaran en el filtro ubicado en el sitio el emboque, para el tratamiento del agua natural del túnel exploratorio de la empresa.

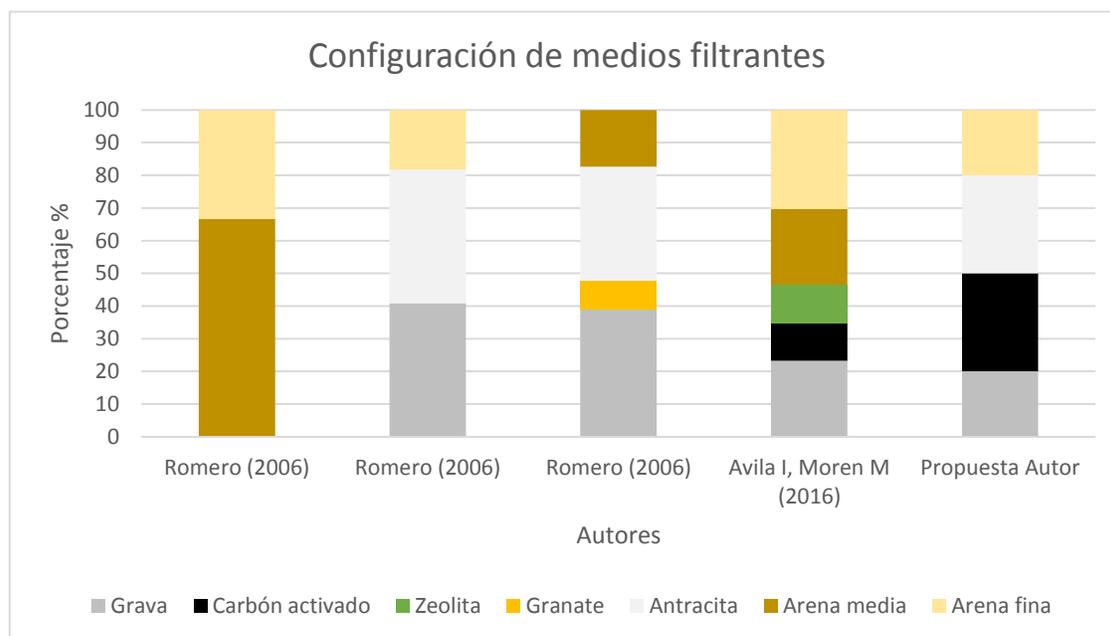


Figura 14. Diferentes configuraciones de medio filtrante. Autor

La Tabla 5 muestra el porcentaje del material filtrante que cada autor utilizó para cada uno de los filtros, con base a esta información se propuso una alternativa que tuviera diferentes materiales convenientes para el tipo de agua a tratar y la altura en el filtro a evaluar.

Tabla 5. Porcentajes de material filtrante

	Grava	Carbón activado	Zeolita	Granate	Antracita	Arena media	Arena fina
Romero (2006)	0	0	0	0	0	66,66	33,33
Romero (2006)	40,9	0	0	0	40,9	0	18,18
Romero (2006)	39,13	0	0	8,69	34,78	17,39	0
Avila I, Moren M (2016)	23,25	11,62	11,62	0	0	23,25	30,23
Propuesta Autor	15	30	0	0	30	0	25

Nota. Elaboración por el Autor

- **Área del filtro**

El área del filtro se calcula mediante la Ecuación 2, conociendo anteriormente el caudal de diseño y la velocidad de filtración que se asumió como $300 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ día})$, esto según el RAS 2000 título C.

$$A = \frac{QD}{Vf} \quad (2)$$

$$A = \frac{155,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{300 \frac{\text{m}}{\text{día}}} = 5,18 \approx 6 \text{ m}^2$$

Donde:

A= Área del filtro

QD= Caudal de diseño, $\text{m}^3/\text{día}$.

Vf= Velocidad de filtración, $\text{m}/\text{día}$.

- **Geometría del filtro**

De acuerdo al resultado del área del filtro, se realiza el respectivo cálculo mediante la Ecuación 3, para determinar el largo y ancho de esta unidad.

$$A = b * l \quad (3)$$

$$A = 3m * 2m = 6 m^2$$

Donde:

A= Área superficial, m²

b= Base, m.

l= Largo, m.

- **Altura del filtro**

Según la estratificación del material filtrante mediante la propuesta que se muestra en la Tabla 4, se realizó la correspondiente relación del porcentaje de altura con los lechos filtrantes a utilizar como se puede observar en la Tabla 5, se decidió a criterio del autor una altura del filtro de 3 metros.

Tabla 6. Relación de altura del medio filtrante

Altura		
<i>Arena</i>	52	cm
<i>Antracita</i>	78	cm
<i>C. Activado</i>	78	cm
<i>Grava</i>	52	cm
<i>Borde libre</i>	40	cm
<i>Altura total</i>	300	cm

Nota. Elaboración propia

- **Perdida de carga**

Como se puede observar en la Ecuación 4, se obtiene al cálculo de la pérdida de carga por el paso de agua para todos los estratos del material filtrante.

$$h_{mf} = \frac{0.0608 * Vf * L_o}{d_o^2} \quad (4)$$

Arena

$$h_{mf} = \frac{0.0608 * 0,347 \frac{cm}{seg} * 60cm}{(0,05cm)^2} = 506,66 \text{ cm}$$

Antracita

$$h_{mf} = \frac{0.0608 * 0,347 \frac{cm}{seg} * 60cm}{(0,055cm)^2} = 418,73 \text{ cm}$$

Carbón Activado

$$h_{mf} = \frac{0.0608 * 0,347 \frac{cm}{seg} * 48cm}{(0,065cm)^2} = 239,84 cm$$

Grava

$$h_{mf} = \frac{0.0608 * 0,347 \frac{cm}{seg} * 72cm}{(3,5cm)^2} = 0,124 cm$$

Donde:

h_{mf} = pérdida de carga en el material filtrante, cm

V_f = velocidad de filtración de la arena, cm/s

L_o = espesor de la capa de la arena, cm

d_0 = diámetro efectivo de la arena, cm

- **Aprovechamiento de espacio**

Se procedió a calcular mediante las Ecuaciones 5, 6 y 7 el área de las placas donde están situados, el área del filtro y el porcentaje desaprovechado en las dos placas donde están situados.

$$A = L * A \tag{5}$$

$$A_{placa1} = 7,6m * 2,5m = 19 m^2$$

$$A_{placa2} = 5,83m * 3,3m = 19,239 m^2$$

Donde:

A= Área de placa, m.

L= Largo de placa.

A= Ancho de placa, m.

$$A_{filtro} = \pi * r^2 \quad (6)$$

$$A_{filtro} = \pi * 0,9025m^2 = 2,559 m^2$$

$$A_{filtros} = 2,559 m^2 * 3 und = 7,677 m^2$$

Donde:

A filtro= Área del filtro, m².

R²= Radio del filtro, m

$$A_{sin\ construir\ placa\ 1} = A_{placa} - A_{filtro} \quad (7)$$

$$A_{sin\ construir\ placa\ 1} = 19m - 7,677m = 11,23 m^2$$

$$\%Espacio\ sin\ construir\ placa\ 1 = 59,60 \%$$

$$A_{sin\ construir\ placa\ 2} = 19,239m - 7,677m = 11,56 m^2$$

$$\%Espacio\ sin\ construir\ placa\ 2 = 60,10 \%$$

Según la prueba piloto que realizó la empresa en el sitio el emboque con los filtros instalados y los cálculos anteriores realizados, se evidencia en la Figura 15 la distribución de los filtros en el área de construcción.

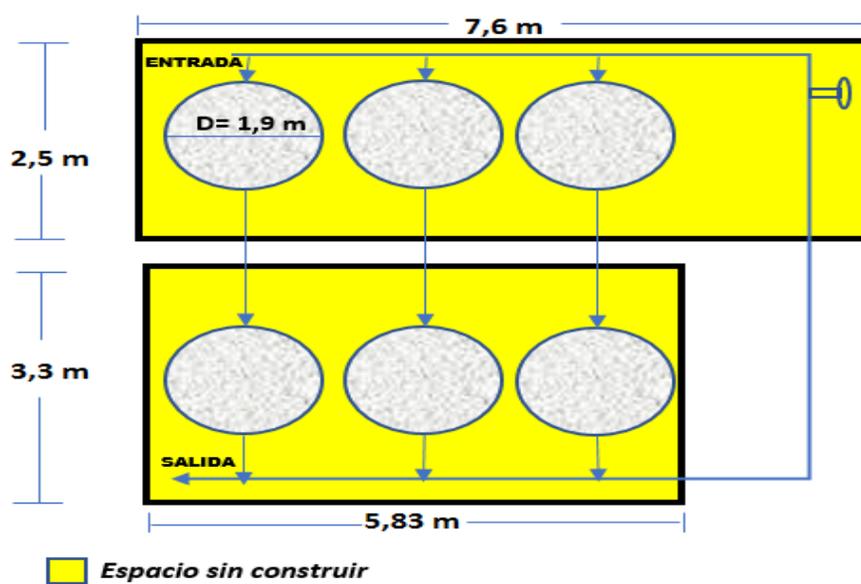


Figura 15. Distribución de filtros instalados. Autor

10. Conclusiones

Según las fuentes consultadas para las alternativas de remoción de hierro y cobre del afloramiento de agua natural del túnel exploratorio, se decidió evaluar un filtro rápido de flujo ascendente, configurando un medio filtrante de arena, antracita, carbón activado y medio de soporte como la grava.

La evaluación de los parámetros de diseño permitió encontrar falencias en el aprovechamiento del espacio destinado para la construcción de la unidad hidráulica de tratamiento.

La implementación del carbón activado como una parte del lecho filtrante, constató según las fuentes consultadas, que es una opción viable para la remoción de hierro y cobre presentes en el afloramiento de agua natural.

Mediante la configuración del material filtrante, se empleó unas alturas y diámetros de partículas predeterminadas como lo estipula el título C del RAS 2000, debido a que los filtros pilotos no tenían una distribución apropiada y su medio filtrante no estaba estandarizado para este tipo de filtros.

En conclusión se puede determinar mediante los parámetros de diseño, que se podría construir en un futuro dos filtros rectangulares, donde se pueda aprovechar el área de construcción y sea de mayor facilidad de operación y mantenimiento.

11. Recomendaciones

Se recomienda que en el diseño y construcción del filtro, se realice un ensayo granulométrico, con el fin de implementar el material filtrante en sus respectivos tamaños efectivos.

Evaluar otro tipo de materiales filtrantes para la remoción de metales como Hierro y Cobre presentes en el afloramiento natural de agua, teniendo en cuenta perspectivas económicas y técnicas.

Implementar un sedimentador antes del proceso de filtración, para que contribuya en la precipitación de flocs, producto de la coagulación hecha por la aplicación del PAC, esto evitaría la saturación del lecho filtrante.

Se sugiere implementar un tipo de canaleta Parshall en inmediaciones a la entrada de los filtros, esta estructura hidráulica la función de implementar un aforo de caudal y vertir el líquido de manera uniforme a los filtros.

Se recomienda que la operación de los filtros sea constante así como el mantenimiento de los lechos filtrante, para un óptimo trabajo de estas unidades.

12. Lista de Referencias

- Aghakhani, A, Mousavi S., MostafazadehFard B. (2013, pp. 1928-1935). *Desalination of saline water with single and combined adsorbents*. Desalination and Water Treatment.
- Alka, M; Kulkarni, S; Mungray, A. (2012, pp.10, 27-46) *Removal of heavy metals from wastewater using micellar enhanced ultrafiltration technique: a review*. Central European Journal of Chemistry.
- Arboleda Valencia, J. (2000, pp. 163-170) *Control del proceso de coagulación-floculación. In: Teoría y práctica de la purificación del agua*. Santa Fé de Bogotá: Mc GrawHill.
- Arboleda, j. (2000, pp. 215). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: Mc GRAW HILL.
- Barczak, M; Michalak-Zwierz, K; Gdula, K; TyszczykRotko, K; Dobrowolski, R; Da, browski, A. (2015, pp. 211, 162-173) . *Ordered mesoporous carbons as effective sorbents for removal of heavy metal ions*. Microporous and Mesoporous Materials.
- Basso et al, M.C. Basso, E.G. Cerrella, A.L. Cukierman. (2001, pp. 1-6). *Remoción de cadmio (II) de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña* Revista Argentina. Avanc. En Energ. Renov y Med. Amb.
- Bi, Q; Zhang, Z; Zhao, C; Tao, Z. (2014, pp. 1690-1694). *Study on the recovery of lithium from high Mg/Li ratio brine by nanofiltration*. Water Science & Technology.

- Bouhamed, F; Elouear, Z; Bouzid, J; Ouddane, B. (2015, pp.6). *Multi-component adsorption of copper, nickel and zinc from aqueous solutions onto activated carbon prepared from date stones*. International Conference on Integrated Management of the Environment - ICIME 2014. Environmental Science Pollution.
- Caviedes, D; Muñoz, R; Perdomo, A; Rodríguez, D; y Sandoval, I. (2015, 73-90) *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales*. Revista Ingeniería y Región.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004, pp. 58-87). *Mezcladores*. En *Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada*. Lima, Perú: CEIPS.
- Chaparro Leal, L. (2015, pp. 53-57). *Drenajes ácidos de mina*. Formación y manejo. Revista
- Cisneros Figueroa, D. F. (2017, pp. 94-95). *Propuesta metodológica de tratamiento pasivo basado en sustrato alcalino disperso para la remediación ambiental de metales pesados provenientes de drenaje ácido de mina*.
- Corcho Romero, F; Duque Serna, J. (1993, PP. 92). *AcueductOS. Teoría y diseño*. Colombia, Medellín: Sello editorial.
- Di Bernardo, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamiento de água*. III ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Domenech, X; Peral, J; (2008, pp. 239). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Editoria Reverté. Barcelona, España.
- G. Galindo, M.A.Herrero, M.Flores & J.L.Fernandez T. (1999, pp. 13, 2) *Correlación de metales trazas en aguas subterráneas someras en la Cuenca Del Rio Salado*,

- Provincia de Buenos Aires, Argentina. Serie correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán.*
- Gherasim, C; Mikulášek, P. (2013 pp. 343,67-74). *Influence of operating variables on the removal of heavy metal ions from aqueous solutions by nanofiltration Desalination.*
- Global Health and Education Foundation. (2007). *Sistemas de Filtración.* Recuperado 6 febrero, 2019, de <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Filtration-Systems-technologies.html>
- González, M; Navarroa, R; Saucedoa, I; Avilaa, M; Prádanosb, P; Palaciob, L; Martínezb, F; Martínb, A. Hernández, A. (2006 pp. 200, 361-363). *Effect of phosphoric and hydrofluoric acid on the charge density of a nanofiltration membrane. Desalination.*
- Hamidi Abdul Aziz, Mohd Suffian Yusoff, Mohd Nordin Adlan, Nurul Hidayah Adnan, Salina Alias. (2004, pp. 353-358). *Physico-chemical removal of iron from semi-aerobic landfill leachate by limestone filter.* New York. Elsevier.
- Herbert Mpagi Kalibbala, Olle Wahlberg y Elzbieta Plaza (2012, pp. 1628-1637) *Lecho de filtración de flujo horizontal: Impacto en la eliminación de la materia orgánica natural y el hierro coexisten en la fuente de agua,* Separation Science and Technology.
- Hernández, N. Q. (25 de 04 de 2015). *El oro de California, en manos de árabes.* Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/investigacion/el-oro-de-california-manos-de-arabes-articulo-557063>

- Huang, J; Peng, L; Zeng, G; Li, X; Zhao, Y; Liu, L; Li, F; Chai, Q. (2014, pp. 125, 83-89). *Evaluation of micellar enhanced ultrafiltration for removing methylene blue and cadmium ion simultaneously with mixed surfactants*, Separation and Purification Technology.
- Hurtado Giraldo, G. M. (2016, pp 64). *En evaluación de los procesos de operación de la planta de tratamiento villa Santana ubicada en la ciudad de Pereira, Risaralda* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Jorge Arturo Pérez Parra. (1981, pp 138). *Manual de Tratamiento de Aguas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Landaburu, J; Pongrácz, E; Keiski, R. (2011, pp. 81, 41-48). *Separation of cadmium and copper from phosphorous rich synthetic waters by micellar-enhanced ultrafiltration*. Separation and Purification Technology.
- Liu, S; Li, Z; Wang, C; Jiao, A. (2012, pp. 116, 131-136). *Enhancing both removal efficiency and permeate flux by potassium sodium tartrate (PST) in a nanofiltration process for the treatment of wastewater containing cadmium and zinc*, Separation and Purification Technology.
- Liu, X; Lee, D; (2014, pp 160, 24-31). *Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes from wastewaters*, Bioresource Technology.
- Maldonado Yactayo, V. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida*. Filtración. Lima: CEPIS/OPS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). *Diagnóstico de las Aguas Subterráneas* | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [Online] Minambiente.gov.co. recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1631-plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-37>.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000: Título B, Sistemas de acueducto.
Bogotá D.C : Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo económico, 2000.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000: Título C, Sistemas de potabilización.
Bogotá D.C : Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo económico, 2000.
- Mukherjee et al. S. Mukherjee, K. Sunil, M. Amal, F. Maohong. (2007, pp. 133-142).
Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and Wood charcoal Chemical Engineering Journal.
- Osei Boamah, P; Huang, Y; Hua, M; Zhang, Q; Wu, J; Onumah, J; Sam-Amoah, L; Osei Boamah, P. (2015 pp, 16, 113-120). *Sorption of heavy metal ions onto carboxylate chitosan derivatives—A mini-review*, Ecotoxicology and Environmental Safety.
- Othman, F., MS Yusuff, M. Perwira, N. Othman, M. Johari, DRH Basri, HA Aziz, MN Adlan y FAH Ashaari. (2001). *Eliminación de cobre del agua mediante la técnica de filtración de piedra caliza: Determinación del mecanismo de eliminación*.
Recuperado de:
<http://search.ebscohost.com.consultaremota.upb.edu.co/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=8349982&lang=es&site=ehost-live>.
- Prado, M; Arruda, S; Ulson, G; Ulson, A. (2014, pp. 65, 342-349). *Study of lead (II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone*. Journal of Cleaner Production.

- R.I. Méndez-Novelo, J.A. Pietrogiovanna-Bronca, B. Santos, M. Sauri-Riancho, G. Giacomán, E. Castillo (2010, pp. 211-220), *Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-adsorción*. Revista internacional de contaminación ambiental.
- Romero Rojas, J. A. (2004, pp 88-89). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*, Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero Rojas, J. A. (2006, pp 191-2314). *Purificación del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rötting, T., Nieto, J.M., Macías, F., & Sgier, H. (2015, pp 70-75). *Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina*. Tecnoaqua.
- Rueda Paulo. (2018, pp 59-60). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de la compañía Sociedad Minera de Santander S.A.S.* (Tesis de Maestría). Universidad Internacional Iberoamericana de Puerto Rico.
- Schwarze, M; Gross, M; Moritz, M; Buchner, G; Kapitzki, L; Chiappisi, L; Gradzielski, M. (2015, pp. 478,140-147). *Micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) of metal cations with oleylthoxycarboxylate*, Journal of Membrane Science.
- Sommerrfeld, E. (2000). *Iron and Manganese Removal Handbook*. American Water Works Association.
- Taylor, J; Wiesner, M. (2002, pp 707-779). Membranas. Capítulo 11. En: AWWA. *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de Agua Comunitaria*. McGraw Hill. Madrid.
- Wang, X; Wang, Y; Wang, X; Liu, M; Xia, S; Yin, D; Zhao, J. (2011, pp. 174, 326 – 332). *Microwave-assisted preparation of bamboo charcoal-based iron-containing adsorbents for Cr (VI) removal*. Chemical Engineering Journal.

13. Anexos

Anexo A. Plano del sitio el Emboque



Anexo B. Formato de registro de datos para el afloramiento de agua natural

	FORMATO DE REGISTRO DE PARAMETROS FISICO - QUIMICOS IN SITU DEL AFLORAMIENTO DE AGUA NATURAL DEL TUNEL DEL EMBOQUE DE LA EMPRESA SOCIEDAD MINERA SANTANDER S.A.S.						Código. AAGNEM.		
							Formato. 01 RAAGNEM		
							Versión. 001		
Ingeniero Responsable.			Operario de Registro Datos.			Auxiliar de Registro.			
MONITOREO DE PARAMETROS FISICO - QUIMICOS IN SITU									
Fecha.			Hora.		Condición Climática.			Punto de Monitoreo.	
Caudal In situ (lt/s)			Caudal p (lt/s)		METODO DE VELOCIDAD - ÁREA				
V1 (lt)		T1 (s)			Longitud Canal (mt).			No Secciones.	
V2 (lt)		T2 (s)			Ancho Sección (mt).			Caudal (m³/s).	
V3 (lt)		T3 (s)			H1 (mt)		V1 (m/s)		Caudal (lt/s).
Total					H2 (mt)		V2 (m/s)		
					H3 (mt)		V3 (m/s)		
					H4 (mt)		V4 (m/s)		
					H5 (mt)		V5 (m/s)		
PARAMETROS DE MONITOREO					Observaciones.				
pH		TDS (ppm)							
Conductividad (µS/cm)		OD (ppm)							
Turbiedad (NTU)		Cu (ppm)							
Temperatura (°C)		Fe (ppm)							
MONITOREO DE PARAMETROS FISICO - QUIMICOS IN SITU									
Fecha.			Hora.		Condición Climática.			Punto de Monitoreo.	
Caudal In situ (lt/s)			Caudal p (lt/s)		METODO DE VELOCIDAD - ÁREA				
V1 (lt)		T1 (s)			Longitud Canal (mt).			No Secciones.	
V2 (lt)		T2 (s)			Ancho Sección (mt).			Caudal (m³/s).	
V3 (lt)		T3 (s)			H1 (mt)		V1 (m/s)		Caudal (lt/s).
Total					H2 (mt)		V2 (m/s)		
					H3 (mt)		V3 (m/s)		
					H4 (mt)		V4 (m/s)		
					H5 (mt)		V5 (m/s)		
PARAMETROS DE MONITOREO					Observaciones.				
pH		TDS (ppm)							
Conductividad (µS/cm)		OD (ppm)							
Turbiedad (NTU)		Cu (ppm)							
Temperatura (°C)		Fe (ppm)							

Anexo C. Formato de seguimiento en PTARD

0104
 Código: PTARD
 Formato: 01 RPTARD
 Versión: 001

FORMATO DE REGISTRO DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL CAMPAMENTO LA HIGUERA DE LA EMPRESA MINESA S.A.S.

MONITORIEO DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS IN SITU

11	12	2018	8:15	Señado	Punto de Monitoreo Tanque Homogenizador			
Caudal de Entrada			Parámetros de Monitoreo					
V1 (lt)	1,32	T1 (s)	1,55	0,862	pH	7,62	Temperatura (°C)	17,60
V2 (lt)	1,82	T2 (s)	1,72	1,05	Conductividad (µS/cm)	638	OD (ppm)	3,67
V3 (lt)	1,70	T3 (s)	1,66	1,02	Turbiedad (NTU)	103	ORP	60
Total				0,977	TDS (ppm)	320		

Parámetros de Monitoreo	Punto de Monitoreo Inicio Reactor				Parámetros de Monitoreo	Punto de Monitoreo Medio Reactor			
pH	7,52	Temperatura (°C)	17,63		pH	7,53	Temperatura (°C)	17,63	
Conductividad (µS/cm)	693	OD (ppm)	3,32		Conductividad (µS/cm)	705	OD (ppm)	2,93	
Turbiedad (NTU)	110	ORP	96,9		Turbiedad (NTU)	200	ORP	104,2	
TDS (ppm)	346				TDS (ppm)	353			

Parámetros de Monitoreo	Punto de Monitoreo Clarificador				Parámetros de Monitoreo	Punto de Monitoreo			
pH	7,48	Temperatura (°C)	17,35		pH		Temperatura (°C)		
Conductividad (µS/cm)	725	OD (ppm)	1,73		Conductividad (µS/cm)		OD (ppm)		
Turbiedad (NTU)	28,8	ORP	104,9		Turbiedad (NTU)				
TDS (ppm)	363				TDS (ppm)				

Afluente de Agua Tratado (m³/hr)

Volumen Inicial Macro Medidor (m ³)	12,663	Volumen Final Macro Medidor (m ³)	
Hora de la Toma de Medida (hr)	8:20 a.m.	Hora de la Toma de Medida (hr)	

Estado de los Equipos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Higuera

Bombas Dosificadoras			Filtros de Agua			Blowers	
B1. Pac	B2. Biocatalizador	B3. Hipoclorito de Calcio	Presión (psi)	Caudal (lt/s)	Volumen (m ³)	B3 Hz	B4 Hz
Levas - Dosis 30 - 3000	Levas - Dosis 30 - 2500	Levas - Dosis 30 - 700	0	0	12063	45	50

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCESOS REALIZADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA HIGUERA

Entrada. pH=7.92	T°=17.12	m/s=630	S/D=315	ORP=112.8	OD=3.62
Salida. pH=7.79	T°=17.91	m/s=728	S/D=365	ORP=105.3	OD=2.86

8:00 a.m → 1000 g PAC tanque homogenizador.
1000 g PAC Inicio Reactor.
5000 g PAC tanque de 250 L.

3:30 pm → 1000 g PAC tanque homogeneizador.
1000g PAC Inicio reactor.
2500g PAC Tanque 250L
700g Cloro Tanque 280 litros

Bomba 2

Anexo D. Formato de monitoreo de puntos de agua

Punto de Monitoreo		Monitoreo y Aforo de Caudal - Campos Hidricos																																											
Aforador		Punto 27 - Q. la baba																																											
Longitud del Canal (m)		Sergio - Zulima																																											
Condiciones climaticas/ Observaciones:		Día Soleado																																											
Ancho de la Seccion (m)		0.2																																											
Numero de Secciones		15																																											
FECHA		16-08-18																																											
HORA		8:40 AM																																											
V1	0.4	V2	0.8	V3	0.7	V4	0.7	V5	0.7	V6	0.7	V7	0.7	V8	0.7	V9	0.7	V10	0.7	V11	0.5	V12	0.6	V13	0.7	V14	0.5	V15	0.5	V16	0.5	V17	0.5	V18	0.5	V19	0.5	V20	0.5	V21	0.5	V22	0.5	V23	0.5
V1'	—	V2'	—	V3'	—	V4'	—	V5'	—	V6'	—	V7'	—	V8'	—	V9'	—	V10'	—	V11'	—	V12'	—	V13'	—	V14'	—	V15'	—	V16'	—	V17'	—	V18'	—	V19'	—	V20'	—	V21'	—	V22'	—	V23'	—
V1"	—	V2"	—	V3"	—	V4"	—	V5"	—	V6"	—	V7"	—	V8"	—	V9"	—	V10"	—	V11"	—	V12"	—	V13"	—	V14"	—	V15"	—	V16"	—	V17"	—	V18"	—	V19"	—	V20"	—	V21"	—	V22"	—	V23"	—
1	0.10	2	0.16	3	0.14	4	0.21	5	0.27	6	0.27	7	0.42	8	0.44	9	0.48	10	0.48	11	0.47	12	0.34	13	0.42	14	0.31	15	0.35	16	0.10	17	—	18	—	19	—	20	—	21	—	22	—		

Punto de Monitoreo		Monitoreo y Aforo de Caudal - Campos Hidricos																																											
Aforador		Punto 35 - Q. la baba																																											
Longitud del Canal (m)		Sergio - Zulima - Rosa																																											
Condiciones climaticas/ Observaciones:		Día Soleado																																											
Ancho de la Seccion (m)		0.265																																											
Numero de Secciones		10																																											
FECHA		16-08-18																																											
HORA		9:20 Am																																											
V1	0.2	V2	0.1	V3	0.2	V4	0.1	V5	0.2	V6	0.1	V7	0.1	V8	0.1	V9	0.1	V10	0.2	V11	0.1	V12	0.1	V13	0.1	V14	0.1	V15	0.1	V16	0.1	V17	0.1	V18	0.1	V19	0.1	V20	0.1	V21	0.1	V22	0.1	V23	0.1
V1'	—	V2'	—	V3'	—	V4'	—	V5'	—	V6'	—	V7'	—	V8'	—	V9'	—	V10'	—	V11'	—	V12'	—	V13'	—	V14'	—	V15'	—	V16'	—	V17'	—	V18'	—	V19'	—	V20'	—	V21'	—	V22'	—	V23'	—
V1"	—	V2"	—	V3"	—	V4"	—	V5"	—	V6"	—	V7"	—	V8"	—	V9"	—	V10"	—	V11"	—	V12"	—	V13"	—	V14"	—	V15"	—	V16"	—	V17"	—	V18"	—	V19"	—	V20"	—	V21"	—	V22"	—	V23"	—
1	0.05	2	0.21	3	0.25	4	0.24	5	0.22	6	0.50	7	0.51	8	0.52	9	0.41	10	0.36	11	0.37	12	—	13	—	14	—	15	—	16	—	17	—	18	—	19	—	20	—	21	—	22	—		

Anexo E. Mapa de la red hidrogeológica

