

Estudio para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en los floculadores y sedimentadores

Study for the recovery of aluminum sulfate from sludge generated in the flocculators and settlers

Karina Elizabeth Torres-Mendoza

karina.torres.mendoza@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7673-3409>
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas-Ecuador

Rosalba Mercedes Lara-Tambaco

rosalbalara@utelvt.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5899-4261>
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas-Ecuador

María Elena León-Araujo

maraju6212@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2029-7107>
Instituto de Posgrado, Maestría en Ingeniería
Química Mención Procesos Químicos en la
Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo-Ecuador

RESUMEN

Esta investigación se realizó un estudio para recuperar el sulfato de aluminio de la planta de tratamiento EAPA "SAN MATEO" mediante lodos generados en floculadores y sedimentadores de la planta, con la adición de ácido sulfúrico se recupera el coagulante utilizado en el tratamiento de agua. El objetivo de este estudio es optimizar el proceso de potabilización, recuperando una solución de sulfato de aluminio contenido en los subproductos del proceso para luego reutilizarlo en la planta, disminuyendo costos de producción, residuos generados y su contaminación al ambiente. La investigación fue desarrollada a nivel de laboratorio, en la cual los ensayos de tratamiento de lodos se determinaron a partir de técnicas que están regidas por la norma ISO IEC 17025 la cual establece los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración. Por último se evaluó la factibilidad económica de la reutilización del sulfato de aluminio recuperado como coagulante en el proceso de potabilización, considerando el costo de los equipos necesarios para el proceso de acidificación, donde se determinó que es más factible comprar el coagulante y no recuperarlo debido a las condiciones actuales de la planta, misma que no permite adaptar un proceso de recuperación del coagulante por el elevado costo de la implementación de una estación de bombeo de lodos.

Palabras claves: Sulfato de aluminio, Lodos, Floculadores, Sedimentadores.

ABSTRACT

In this investigation, a study was carried out to recover aluminum sulfate from the EAPA "SAN MATEO" treatment plant through sludge generated in flocculators and settlers of the plant, with the addition of sulfuric acid the coagulant used in water treatment is recovered. The objective of this study is to optimize the purification process, recovering a solution of aluminum sulfate contained in the by-products of the process to later reuse it in the plant, reducing production costs, waste generated and its contamination to the environment. The investigation was developed at the laboratory level, in which the sludge treatment tests were determined based on techniques that are governed by the ISO IEC 17025 standard, which establishes the requirements that test and calibration laboratories must meet. Finally, the economic feasibility of reusing the recovered aluminum sulfate as a coagulant in the purification process was evaluated, considering the cost of the necessary equipment for the acidification process, where it was determined that it is more feasible to buy the coagulant and not recover it due to the current conditions of the plant, which does not allow adapting a coagulant recovery process due to the high cost of implementing a sludge pumping station.

Keywords: Aluminum sulfate, Sludge, Flocculators, Settlers.

INTRODUCCIÓN

La E.A.P.A San Mateo, es una empresa encargada de suministrar el servicio de agua potable y alcantarillado en el Cantón de Esmeraldas, en su proceso para potabilización al agua cruda tiene las siguientes operaciones: captación, pre-sedimentación, precloración, canal parshall, floculación, sedimentación, filtración, poscloración, obteniendo como residuo de este proceso lodos aluminosos en las etapas sedimentación, floculación y filtración. Actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en las mismas fuentes de suministro en este caso en el Río Esmeraldas ocasionando contaminación al medio ambiente.

En la presente investigación a través del método de acidificación de lodos se realizó la recuperación de sulfato de aluminio Tipo A utilizado en planta y posteriormente reutilizarlo en el proceso. Los primeros en intentar recuperar el sulfato de aluminio en plantas potabilizadoras fue Conwel en 1987, seguido de los ensayos para recuperar aluminio de lodos de Jewell, el mismo que en 1903 patentó un proceso para tratamiento de agua y recuperación del coagulante por reacción de hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico (Sandoval, et al., 1997).

Franci, Teixeira y Da Silva. (1999) establecen en un estudio realizado en Brasil, que, para poblaciones entre 20000 y 50000 habitantes, es viable económicamente recuperar y clarificar el sulfato de aluminio, a partir de lodos provenientes de plantas potabilizadoras de agua, y utilizarlos posteriormente en las propias plantas. (Juan Nuñez, Margarteh Zarur). La E.A.P.A San Mateo actualmente se encuentra realizando cambios de tuberías para el agua potable que servirán para el mejoramiento del servicio a la población esmeraldeña, mediante la presente investigación se proyecta generar una propuesta para la optimización del sistema de potabilización, reduciendo costos para la empresa, y reduciendo contaminación al medio ambiente.

El objetivo de este trabajo es estudiar la posibilidad de recuperar el sulfato de aluminio de los lodos generados en los floculadores y sedimentadores de la E.A.P.A San Mateo y se evaluará la factibilidad económica de reintegrarlo al proceso de potabilización. Primero se determinó las características fisicoquímicas del lodo, segundo se estableció las condiciones óptimas para la recuperación de sulfato de aluminio considerando tiempo y dosis de ácido sulfúrico determinando el porcentaje máximo de recuperación del coagulante.

Luego se comparó la eficiencia entre el sulfato de aluminio recuperado y el utilizado en planta, por último, se evaluó su factibilidad económica de reutilizar el coagulante recuperado al proceso de potabilización teniendo en cuenta el costo de implementación de un sistema de acidificación de lodos.

Descripción de la Planta de Tratamiento de Agua Potable EAPA San Mateo y sus etapas

La Planta de Tratamiento del Sistema Regional de Esmeraldas, está ubicada en la parroquia San Mateo, perteneciente al cantón Esmeraldas, en una cota promedio de 16 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas 0°53'06.31" N 79°38'27.06" O. (Véase figura 1)

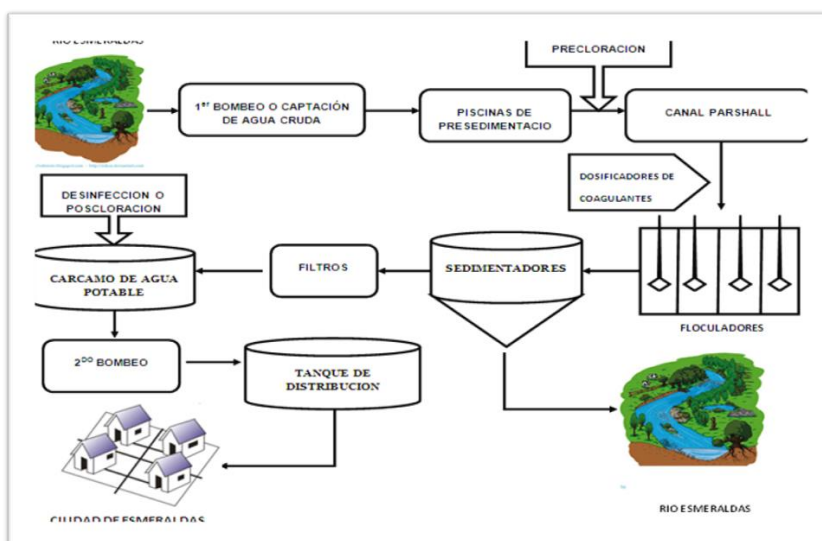
Figura 1. Vista Satelital Planta EAPA San Mateo.



Fuente: Google Earth - 2014

Su capacidad de producción de agua potable, actualmente se encuentra construido en su primer módulo de 1025 litros por segundo, pudiendo en el futuro cuando la demanda de la población así lo requiera, construir otro modulo similar al primero, para duplicar su producción a 2050 litros por segundo. (Manual de Operaciones de la Planta de tratamiento EAPA San Mateo, 1995).

Figura 2. Sistema de Potabilización de agua de la planta EAPA "San Mateo".



Según los registros de la planta el caudal promedio con el que trabaja es de 880 litros por segundo.

Captación

El bombeo de captación de agua cruda proviene del rio Esmeraldas, realizadas en el mismo lecho del rio en la cota 0.00, con todas sus obras constitutivas de rejillas, cámaras y pozos de bombeo para 5 unidades de manera que puedan

funcionar en paralelo de acuerdo a los requerimientos de la demanda y una estación de bombeo situada en la cota 9,67 m y constituida por 5 unidades bomba–motores iguales entre sí de eje vertical.

Se toma como quinta unidad, a cualquiera de las 5 bombas instaladas, la cual está parada y solo entra en funcionamiento cuando una de las cuatro que normalmente funcionan esta fuera de servicio, debido a su mantenimiento para mantener funcionando la planta a su máxima capacidad. Cada bomba es de funcionamiento autónomo, cuentan con tableros eléctricos y dispositivos de seguridad accionados por sus respectivos medidores de nivel para evitar funcionar en el vacío y sus respectivas válvulas de control. Estas bombas están conectadas a una tubería de impulsión que lleva el agua cruda hasta las piscinas de pre sedimentación.

Reserva de Agua Cruda o Pre sedimentación

La planta cuenta con 4 piscinas construidas de hormigón armado que miden 100 x 55 x 2,60 m, cada una de estas está provista de un medidor de nivel, salida sumergida hacia la planta y desborde superior. Cada piscina tiene una capacidad máxima de 13750 metros cúbicos.

Estas piscinas almacenan el agua cruda recibida del bombeo en la etapa de captación y tienen como función eliminar las partículas sólidas gruesas que se precipitan durante el tiempo de retención en la piscina. (Véase fig. 3)

Figura 3. Piscinas de Presedimentación.



Las piscinas están conectadas a un canal distribuidor, con su respectiva compuerta de control, que continúa hacia la planta por medio de una tubería de 1200 mm de diámetro.

Precloración

Es un proceso de acondicionamiento del agua cruda para que posteriores etapas sean más eficientes, esta consiste en añadir el agente generador de formas activas de cloro a la entrada de la planta depuradora.

En esta etapa se cuenta con un equipo completo de dosificación de cloro gas para aplicarlo al agua cruda y eliminar los microorganismos presentes en esta, este equipo es accionado eléctricamente por una consola de mando. La mayor parte del año este equipo está en stand by, entra en funcionamiento cuando el agua cruda que proviene de captación tiene una turbiedad menor a 5 NTU en este caso se reduce la dosis de coagulante utilizado.

Canal Parshall

Esta etapa está constituida de un vertedero rectangular que sirve de medidor alterno del caudal que ingresa a la planta. Al entrar el agua cruda con velocidad a la cámara forma una turbulencia que es aprovechada para mezclar la solución del coagulante para se disperse de forma homogénea en la masa de agua cruda mediante una canaleta perforada y colocada a lo ancho del canal.

Figura 4. Canal Parshall.



Floculación

Mediante un canal se conduce el agua cruda mezclada con el coagulante y se distribuye en 3 unidades de floculación, estas son idénticas y funcionan en paralelo siendo su capacidad unitaria es de 342 L/s. Cada unidad de floculación consta de 4 cámaras conectadas en serie mediante un orificio ubicado a nivel del fondo. Cada cámara mide 6.0 x 6.0 x 4.80 con una profundidad hidráulica de 4,27 m.

Figura 5. Floculadores.



Cada floculador tiene cuatro paletas de eje vertical en toda su profundidad que son accionadas por un motor eléctrico, estas llevan un movimiento lento produciendo el crecimiento del floculo para aumentar su peso y por efecto de la gravedad se sedimentan.

La velocidad de rotación de las paletas es decreciente de la primera a la cuarta cámara: en esta a través de un orificio ubicado a 1.86 m del fondo se empalma con el conducto de los sedimentadores. Cada cámara posee un desagüe para su vaciado si se necesita de limpieza y mantenimiento de las paletas.

Sedimentación

Las 3 unidades de floculación alimentan cada una a un módulo de sedimentación que consta de 4 cámaras longitudinales que miden 2.40 m de ancho y 22.70 m de longitud.

El agua se distribuye desde un conducto que se conecta con el floculador, hasta las cámaras sedimentadores, las cuales tienen placas inclinadas de 60° con la horizontal en todo su ancho y longitud separadas 5 cm entre sí, en esta etapa la tasa de sedimentación es de 1.80 m³/m² día (2.08 L / s m²).

El agua clarificada del proceso de sedimentación es recogida en la superficie por tuberías perforadas y es dirigida por un conducto que llega a un canal de recolección donde van a parar todos los conductos antes mencionados.

Figura 6. Sedimentadores



Bajo las placas y a un nivel inferior del canal distribuidor existe un canal de sección trapezoidal con la base menor hacia abajo donde se aloja una tubería perforada para percibir el lodo proveniente de la sedimentación que es conducido a otro canal ubicado como el recolector, en el extremo, también común a todos los sedimentadores y luego al sistema de filtración.

Válvulas accionadas manualmente y sifones de accionamiento permiten evacuar el lodo proveniente de este proceso y conducirlo a los canales de drenaje general de la planta (Manual de operaciones de la Planta de tratamiento EAPA San Mateo, 1995).

Filtración

Está constituida por 6 unidades de filtración rápida, cada una de las cuales consta con un manto flotante o lecho filtrante el cual está constituido por tres capas: la primera capa es de antracita con un espesor de 0.45 m, la segunda es de arena cuarcífera con un espesor de 0,30 m y la tercera es de ripio con diferente graduación a las demás es el soporte del manto filtrante y sirve de recogedor del agua filtrada a través de sus perforaciones y conducirla a otros conductos. (véase fig. 7)

Figura 7. Filtro.



Los filtros poseen válvulas de desagüe para evacuar el agua de lavado y de drenaje para la limpieza de la unidad. El canal de desagüe de lodos de los sedimentadores es también común para desagüe de los filtros.

Poscloración

En el tratamiento es la etapa que consiste en la desinfección total del agua es decir eliminar todos los microorganismos y el contenido de materia orgánica que no se haya eliminado del agua en las etapas anteriores.

Esta desinfección se logra por la aplicación de una dosis de cloro gas a través de equipos y dispositivos electrónicos. Esta dosis se aplica en la cámara de aguas claras que viene de los filtros donde se aprovecha turbulencia originada para la difusión del cloro gas en el agua.

La poscloración también tiene como finalidad mantener un residual de cloro en el agua tratada hasta que llegue al consumidor.

Figura 8. Dispositivo de inyección de cloro gas.



Existe un tiempo de contacto que debe cumplir el agua con el cloro gas y esto ocurre en el paso al cárcamo de bombeo para que exista la eliminación total de microorganismos.

El cárcamo contiene también un medidor que permite conocer el volumen existente del agua tratada.

Figura 9. Medidor de volumen.



Segundo bombeo

No es parte del proceso de tratamiento, pero si es de vital importancia debido a que bombea el agua tratada del cárcamo hasta un tanque de carga de 2000 m³ de capacidad, colocado en una montaña donde por gravedad se dirige hacia los tanques de distribución de la ciudad.

Este bombeo cuenta con 5 bombas que trabajan en paralelo y cada una impulsa 256 L/s contra una altura dinámica total de 175 m. Cuenta con todos los dispositivos eléctricos y mecánicos para lograr una operación segura.

En este sistema de bombeo 4 de las 5 bombas son las que trabajan y se toma como quinta a cualquiera de estas dejándola en stand by para mantenimiento de una de las 4. En esta tubería de bombeo, existen dos derivaciones hacia la planta. La primera es la que provee agua a presión para el lavado superficial de los filtros y la segunda para proporcionar el agua suficiente que se utiliza en la dilución de los productos químicos, ya que éstos, cualquiera que sea su forma de presentación, sólida, líquida o gaseosa, deben ser previamente disueltos en agua para su aplicación. Además, para uso en el laboratorio y para satisfacer las necesidades de los trabajadores que lleva a cabo la operación, el mantenimiento y administración de la planta.

Lodos de la planta de Tratamiento EAPA San Mateo

Origen de los Lodos

El principal residuo de las plantas de potabilización de aguas es el lodo. Este es producido en las etapas de pre sedimentación, sedimentación, floculación y filtración.

Los lodos en la EAPA San Mateo se producen a partir de la remoción de los sólidos suspendidos a través de la dosificación del coagulante, exceptuando los lodos de la etapa de pre sedimentación que se originan en las piscinas de almacenamiento de agua cruda y se depositan en el fondo de estas por gravedad. En el siguiente proceso se describe la generación de los lodos en la potabilización del agua cruda.

En el canal Parshall se realiza una mezcla rápida de agua cruda con el coagulante (sulfato de aluminio), luego el agua cruda ingresa a la etapa de floculación, donde se agruparán las partículas en suspensión formando flocs.

Los flocs por gravedad se alojan en el fondo de la cámara de sedimentación. En esta etapa se elimina el 70% de las impurezas orgánicas contenidas en el agua cruda.

Coagulación

Aspectos físicos como la turbiedad y el color del agua cruda se deben a la presencia de partículas muy pequeñas llamadas "coloides" que permanecen en suspensión durante un largo periodo en el agua y son capaces de atravesar medios filtrantes.

La coagulación consiste en neutralizar las fuerzas que mantienen separadas a las partículas coloides logrando que estas se aglomeren y formen partículas de mayor tamaño. Para llevar a cabo esta, se añade coagulantes químicos y la aplicación de una energía de mezclado logrando que los coloides formen flocs que puedan depositarse en el fondo del sedimentador.

Este proceso es el más eficaz para la remoción de sólidos en el agua, pero cuando es mal realizado conlleva a la rápida degradación de la calidad del agua y gastos injustificados en la operación del tratamiento.

Para evitar este gasto de dinero en el proceso de potabilización se determina una adecuada dosificación del coagulante la cual se determina a través de las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio.

Factores que influyen en el proceso de Coagulación

Existen muchos factores que influyen a la coagulación de aguas crudas entre los más importantes tenemos.

Tipo de Coagulante

Generalmente no todos los coagulantes producen el mismo efecto, ni producen la desestabilización por el mismo mecanismo por lo que se debe recurrir a la comparación experimental teniendo en cuenta el objetivo del tratamiento y el tipo de agua cruda a tratar.

Contenido de materia en suspensión

Este factor va a determinar la cantidad del coagulante que se debe emplear en el agua cruda. El tamaño de las partículas en suspensión es muy relevante debido a que si son muy grandes son fáciles de coagular y las muy pequeñas lo contrario necesitando una mayor cantidad de coagulante.

PH

Este factor va a determinar la naturaleza de las especies presentes en el agua y su solubilidad. Cada tipo de coagulante tiene una zona óptima de pH donde se produce la floculación a corto plazo y a una dosis determinada de coagulante, si se deja de operar en esta zona se baja el rendimiento y existe un desperdicio de producto químico.

Tabla 1. *PH optimo del agua según el coagulante utilizado.*

Coagulante Utilizado	Rango óptimo de PH para la coagulación
Sulfato de Aluminio	4 – 7
Aluminato de sodio	4 – 9
Cloruro de aluminio	4 – 6.5
Cloruro férrico	3.5 – 6.5 y > 8.5
Sulfato Férrico	4 – 7 y >9
Sulfato Ferroso	4.8 – 11

Salinidad

Las aguas crudas contienen sales en disolución y estas afectan al proceso de coagulación modificando factores como: margen del pH optimo, tiempo necesario para la floculación, dosis optima del coagulante y coagulante residual en el efluente.

Temperatura del agua

La temperatura es un factor limitante para el proceso de coagulación, por debajo de un cierto valor de esta, los rendimientos de clarificación en el agua cruda son mediocres.

Tiempo de mezcla y floculación

Estos dos factores en conjunto se les denominan "periodo de coagulación" y se define como el tiempo transcurrido desde la adición del coagulante y el final de la agitación a una velocidad que impida la decantación de materias floculadas.

Este factor se debe controlar en cada proceso pues en algunas ocasiones periodos largos favorecen al proceso mientras que en otras provocan la ruptura de los flóculos formados.

Fuerza de agitación

Por lo general a las aguas se las somete a una mezcla rápida seguida de otra lenta. La misión de la primera es dispersar el coagulante y fomentar las colisiones entre las partículas mientras que con la mezcla lenta se hace aumentar el tamaño del floculo manteniéndolo en suspensión hasta su precipitación.

Presencia de núcleos

Las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos. Las aguas que tienen poca turbidez coloidal son frecuentemente de difícil flocular, este factor influye en la velocidad de floculación y en el aumento de densidad del floculo.

Color

Es un factor muy importante a la hora de obtener calidad del agua. Este es debido a los compuestos orgánicos resultantes de la descomposición de materia orgánica o a las sales de manganeso y hierro.

Mecanismos de Coagulación

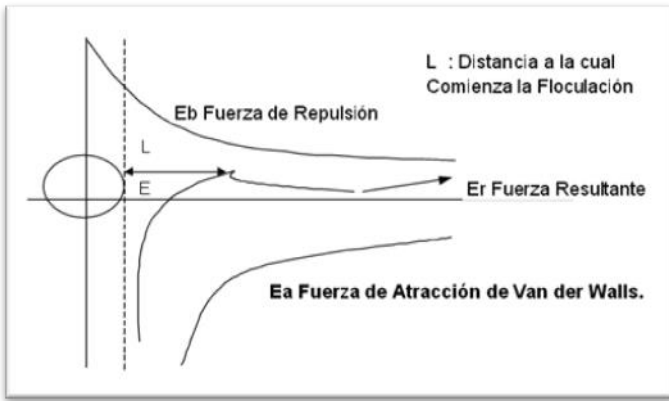
En la precipitación de partículas en suspensión de un agua cruda intervienen dos fenómenos la desestabilización y el transporte de las partículas. Esta se da por varios mecanismos físicos:

Compresión de la doble capa.

Al aproximarse dos partículas semejantes se genera sobre ellas una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta a las partículas.

Entre las partículas existe un potencial de atracción llamado fuerzas de Van de Walls que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos. (Figura 10)

Figura 10. *Fuerzas de Atracción y Repulsión.*



Fuente: SEDAPAL, 2000.

Adsorción y neutralización de cargas.

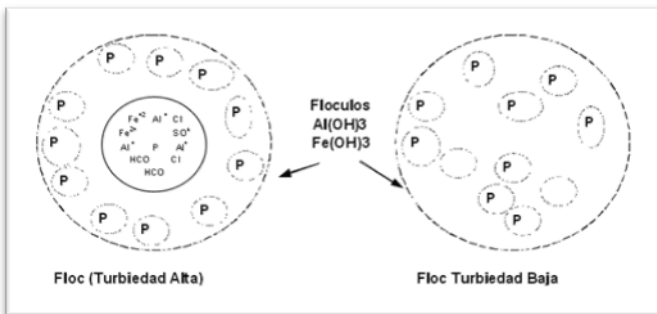
En la superficie las partículas coloidales poseen carga negativa atrayendo a los iones positivos que se encuentran solución del agua y forman la primera capa del coloide.

Luego de la teoría de la doble capa la coagulación es la anulación del potencial obtenido por productos de coagulación y floculación requiriéndose una energía externa como la agitación mecánica o hidráulica.

Atrapamiento de partículas en un precipitado.

Al adicionarse una dosis óptima coagulante se agrupan partículas coloidales desestabilizadas formando un flocs. Las sales de metales trivalentes como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ o cloruro férrico $FeCl_3$ producen un flocs formado de moléculas de $Al(OH)_3$ o $Fe(OH)_3$. La existencia de partículas coloidales y de ciertos aniones acelera la formación del flocs requiriendo menos coagulante.

Figura 11. Atrapamiento de las partículas en un Flocs.

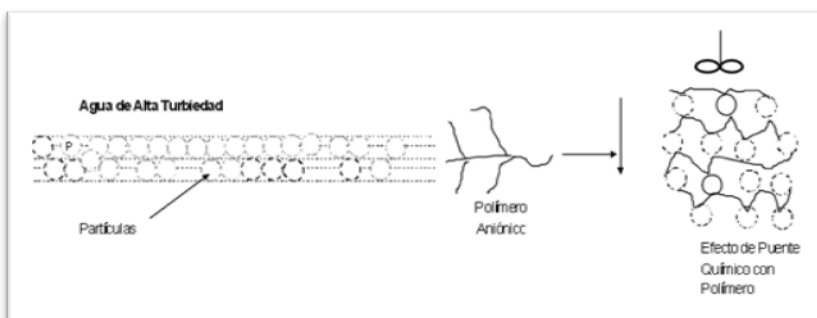


Fuente: SEDAPAL, 2000

Formación de puentes de las interpartículas

Las partículas coloidales son absorbidas por grupos químicos que contienen el polímero aniónico. En una de sus extremidades la molécula del polímero absorbe partículas coloidales dejando libre los otros sitios para absorber otras partículas formando un puente entre ellas. (Figura 12)

Figura 12. Efecto del Puente de las Partículas de Suspensión



Fuente: SEDAPAL, 2000

Coagulantes Utilizados

En una planta de tratamiento de agua el tipo de coagulante utilizado dependerá de las propiedades fisicoquímicas del agua cruda, del agua tratada que se quiere obtener o de la tecnología existente en la planta. Estos son componentes químicos que al entrar en contacto con el agua producen reacciones que forman un precipitado favoreciendo a la claridad del agua.

Entre los más importantes tenemos:

- Sulfato de Aluminio
- Aluminato de Sodio
- Cloruro de Aluminio
- Cloruro Férrico
- Sulfato Férrico
- Sulfato Ferroso
- Polielectrólitos

Sulfato de Aluminio

Es una sal solida de color blanco de formula $Al_2 (SO_4)_3$, se obtiene al reaccionar un mineral alumínico con ácido sulfúrico a temperaturas elevadas.

Con la bauxita: $Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \text{ ----- } > Al_2 (SO_4)_3 + 3H_2O$.

$2 Al (OH)_3 + 3 H_2SO_4 + 10 H_2O \text{ ----- } > Al_2 (SO_4)_3 + 16 H_2O$.

Existen dos tipos:

El sulfato de aluminio tipo A blanco, contenido de hierro inferior 0.5%.(fig. 13)

El sulfato de aluminio tipo B marrón, contenido de hierro inferior al 1,5%. (fig. 14)

Figura 13. Sulfato de Aluminio Tipo A



Figura 14. Sulfato de Aluminio Tipo B

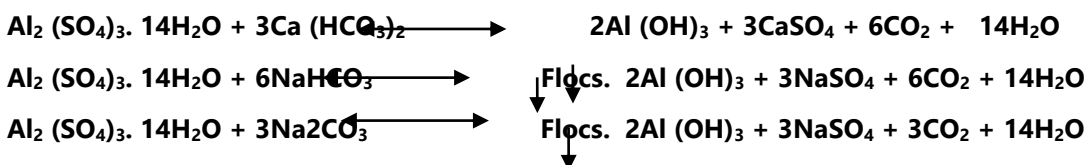


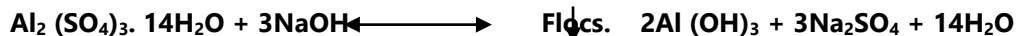
Fuente: www.quinsa.com

Aplicaciones

- Como coagulante que produce la sedimentación de sólidos en el tratamiento de agua potable.
- Ajustador de PH en la industria del papel y la pulpa.
- Eliminador de fosforo en aguas residuales.
- Es astringente en la preparación de drogas y cosméticos.
- Purificador en la melaza de caña de azúcar y fabricación de colorantes
- También se emplea para producir otras sales de aluminio.

Las principales reacciones de sulfato de aluminio con la alcalinidad del agua cruda son:





En la EPA San Mateo se utiliza el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ que es el coagulante más utilizado normalmente, siendo el que le sigue el sulfato de hierro, al adicionar estas sales al agua crean reacciones químicas provocando productos de hidrólisis que son más eficaces que los iones del coagulante.

El coagulante utilizado tiene la siguiente composición química. (Véase fig. 20)

Sulfato de Aluminio solido granulado TIPO A

- Fórmula Química: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
- Color: Blanco hueso
- Peso Molecular: 600
- Concentración de Oxido de Aluminio: 17,22 % Al_2O_3 . Min 17 %
- Basicidad (% Al_2O_3 libre): 0.73 % Min 0,05 %
- Hierro Total (% Fe_2O_3): 0,0003 % Max 0,01 %
- Residuo Insoluble (%): 0.044 % Max 0,5 %
- Granulometría: Malla # 4 100 %

Figura 15. Sulfato Ferroso.



Características de los Lodos

Los aspectos físicos y químicos de los lodos siempre van a depender de una planta u otra, de la calidad de agua cruda, de las estaciones del año y sobre todo del tratamiento recibido sin embargo estos tienen características semejantes.

De la utilización de sulfato de aluminio podemos obtener un lodo de aspecto gelatinoso, color marrón, compuesto en su mayoría por agua, hidróxido de aluminio, coloide, partículas inorgánicas, residuos activos químicos agregados durante el tratamiento y materia orgánica.

Es fundamental conocer las características del lodo a tratarse para evaluar el tratamiento a efectuarse y la recuperación de su coagulante.

Entre los aspectos principales que se determinan para caracterizar a los lodos tenemos:

- PH
- Turbiedad
- Alcalinidad
- Densidad
- Rangos de dosis de coagulantes utilizados
- Sólidos totales en suspensión
- Aluminio residual
- Sulfatos
- Hierro total

Recuperación de sulfato de aluminio

Estados Unidos en 1903, fue el primer país que patentó el proceso de recuperación de aluminio en forma de sulfato a partir de lodos residuales del tratamiento de agua potable mediante la adición de ácido sulfúrico, siendo practicada posteriormente esta técnica en Japón, Inglaterra y Polonia.

Cornwell en el año de 1987 realizó en ensayos para recuperar el sulfato de aluminio a partir de lodos provenientes de potabilizadoras, pero estos tratamientos se los ha realizado en la industria para los tratamientos de eliminación de fósforo en efluentes secundarios.

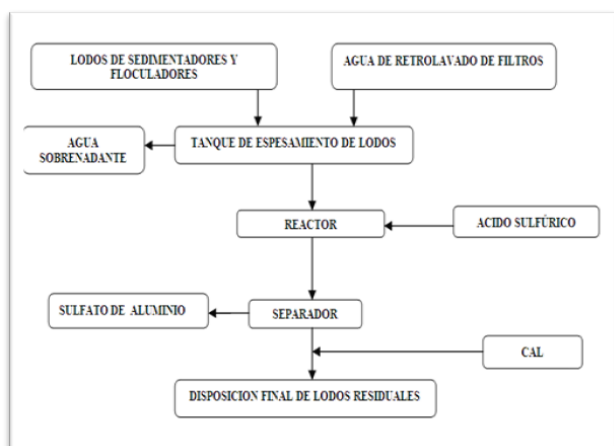
El aluminio al ser un elemento anfótero, puede disolverse el hidróxido de este metal en un medio ácido o básico por lo que la recuperación de sulfato de aluminio se realiza con un ácido o una base.

La recuperación en condiciones alcalinas tiene la ventaja de disolver una cantidad apreciable de hidróxido de aluminio y no hacer lo mismo con los demás metales presentes, no obstante, el carbón orgánico disuelto aumenta considerablemente, lo que limita las posibilidades de reutilizar el aluminio recuperado como coagulante (Westerhoff, 1973).

Existen varios métodos para la recuperación de sulfato de aluminio entre ellos están la utilización de base y ácidos como hidróxido de sodio o calcio y ácido clorhídrico.

Una de las mejores alternativas para la recuperación de sulfato de aluminio es a través de la acidificación por medio de ácido sulfúrico H_2SO_4 , pues permite la reducción de volumen de lodos, mejora las propiedades de deshidratación y el costo del ácido sulfúrico es bajo en relación a otros ácidos.

Figura 16. Esquema del proceso normal de recuperación de sulfato de aluminio con ácido sulfúrico.



Fuente: (Nuñez, & Zarur, 2000)

Con este proceso de recuperación se estima recuperar entre el 60 y 80% del coagulante usado en el proceso de potabilización, mientras que el lodo reducido en su volumen se lo dispondrá en un cauce natural previo a un tratamiento.

Reutilización de la disolución de sulfato de aluminio recuperado

La calidad del sulfato de aluminio recuperado se evaluará midiendo los siguientes parámetros.

- Concentración de aluminio
- Contenido de materia orgánica
- Turbiedad
- Color
- Manganeso y hierro

El sulfato de aluminio recuperado es más diluido, pero menos eficiente que el utilizado en la planta.

Tratamiento de Lodos residuales

Los lodos residuales de plantas potabilizadoras de agua contienen menos materia orgánica que los provenientes de aguas servidas por ende su tratamiento es mucho más sencillo.

El proceso de tratamiento de estos lodos tiene como finalidad producir un lodo de fácil manejo y disposición. Para alcanzar un mínimo costo en el tratamiento de lodos se debe reducir el volumen de estos o mejorar las propiedades de manejo y deshidratación. Existen algunas alternativas para reducir el volumen de un lodo.

Tabla 2. Alternativa para Lodos Residuales.

Alternativas			
Acondicionamiento Químico	Tanques de espesamiento	Deshidratación Lechos de Secado Lagunas Filtro de prensa Filtros a vacío Centrifugación Congelamiento	Disposición Final Descargas a aguas superficiales Relleno sanitario Incineración

Fuente: Sandoval, et al 1997

Disposición final de lodos Residuales

La descarga final de lodos de una planta potabilizadora plantea problemas importantes, estos lodos no son considerados como residuos peligrosos, pero al disponerlos en corrientes naturales de agua forman depósitos o "bancos de fangos" en los tramos lentos del cauce y a la vez aumenta la turbiedad y el color de las aguas receptoras.

Según la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental existen límites permisibles de descarga a un cauce. (Véase tabla 3)

Tabla 3. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl ⁻	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		Rem. > al 99,9 %
Color real	Color real	u.de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅	mg/l	100
Dem. Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidro. Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitratos + Nitritos	Expr. Nitrógeno (N)	mg/l	10,0
Nitrógeno Total Kjédahl	N	mg/l	15
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados totales	Conc. organofosforados totales.	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Sedimentables		ml/l	1,0
Sol. Suspendidos Totales	S.s.t.	mg/l	100
Sólidos totales	s.t.	mg/l	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁻	mg/l	1000
Sulfitos	SO ₃	mg/l	2,0
Sulfuros	S	mg/l	0,5
Temperatura	°C		< 35
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0
Vanadio		mg/l	5,0
Zinc	Zn	mg/l	5,0

Fuente: Tulas, Libro VI Anexo

METODOLOGIA

Metodología utilizada para la recuperación de sulfato de aluminio a nivel de laboratorio.

En el presente trabajo se desarrollaron dos tipos de investigación experimental y evaluativa:

La parte experimental se dio a conocer que variables como el pH y el tiempo de mezcla tienen un efecto directo sobre el porcentaje de recuperación de sulfato de aluminio en los lodos producidos en la Planta de Tratamiento de Agua Potable EAPA San Mateo.

También se evaluó desde la perspectiva técnica y económica la posible implementación de un sistema de recuperación de sulfato de aluminio a partir del método tratado en el procedimiento experimental.

Diseño Experimental

También fue creado un diseño experimental factorial categórico, por medio del programa STATGRAPHICS Centurión.

Diseño Base

Nº de factores experimentales: 2

Nº de niveles experimentales: 3 y 4

Nº de respuestas: 1

Nº de corridas: 12

Tabla 4. Diseño experimental factorial realizado por el programa STATGRAPHICS Centurión

Factores	Niveles	Unidades
Tiempo	3 (15, 30 y 60)	minutos
Dosis acido	3, 6, 9 y 12	ml

Respuesta	Unidades
Aluminio	mg/L

Entorno de la Investigación

El estudio fue realizado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable EAPA "San Mateo" en la época de invierno. Las muestras de lodos fueron tomadas en el mes octubre del 2013 de los floculadores y sedimentadores para ser mezclados con el agua de retro lavado de los filtros. Posteriormente se realizó la caracterización de los lodos en el laboratorio de la planta, luego se hizo la recuperación del coagulante través de la acidificación de lodo dando como resultado un sobrenadante al cual se le analizó su porcentaje de aluminio.

Intervenciones

Para el desarrollo experimental se utilizaron los laboratorios de control de calidad de la Planta de Tratamiento de Agua Potable EAPA "San Mateo" y se manipularon los equipos disponibles en este.

Para los ensayos de tratamiento se determinaron a partir de las técnicas utilizadas en el laboratorio las cuales están regidas por la norma ISO IEC 17025.

Para la determinación del contenido de sulfatos y aluminio residual en la mezcla de lodo se emplearon las técnicas de absorción atómica a partir del espectrofotómetro HACH DR 2800.

Procedimiento experimental

Mediante la agregación de una solución de ácido sulfúrico al 25% se estima recuperar el coagulante (sulfato de aluminio) contenido en los lodos de la planta EAPA San Mateo.

Esta investigación se la realizó a nivel de laboratorio y está compuesta por cuatro etapas: 1) Toma de las muestras. 2) Caracterización fisicoquímica de los lodos. 3) Ensayo de tratamiento y 4) Caracterización fisicoquímica del sobrenadante.

Toma de las muestras

Es la obtención de una pequeña cantidad de material la cual sea homogénea y representativa, cuyo volumen sea lo suficientemente pequeño para ser manipulado en el laboratorio, manteniendo sus propiedades físicas y químicas de donde procede.

Para la toma de muestras se aprovecharon los mantenimientos de los floculadores y sedimentadores de la planta, este mantenimiento es realizado un módulo por día, cada 15 días por los operadores a cargo.

Una vez parado el módulo se iniciaron el procedimiento de evacuación de agua, concluido este podemos darnos cuenta del lodo depositado en el fondo de los floculadores y sedimentadores. La mayor parte de lodos se encuentran en los sedimentadores, mientras que en los floculadores es muy poco.

Figura 17. Lodos en floculadores.



El muestreo en los floculadores fueron realizados a través de la introducción a este y extrayéndolo desde el fondo de la cámara. (Véase fig. 18)

El muestreo en los sedimentadores fue a partir de la tubería de descarga del módulo, se recogió 1 litro cada 5 minutos desde el inicio de la descarga y de ahí periódicamente hasta que se obtenga la cantidad requerida (20 litros). Los recipientes recomendables para la toma de muestras son de vidrio, pero también se pueden utilizar de plástico.

Figura 18. Extracción del lodo en floculadores



Se recolectaron 20 litros de lodo en los floculadores y sedimentadores, los cuales fueron almacenados en un recipiente a estos se le añadió agua del retro lavado de los filtros y se obtuvo una mezcla homogénea, todo este procedimiento se lo realizo con el fin de recuperar un porcentaje más alto del coagulante. (Véase fig. 19)

Una vez obtenidas las muestras de lodo, estas no deben contaminarse ni deteriorarse antes de llegar al laboratorio para su análisis, siendo necesario que antes de receptarla el recipiente debe estar limpio y se lo debe enjuagar dos o tres veces con la sustancia a analizar, si efectuamos correctamente la toma de muestras garantizaremos nuestros análisis y reduciremos al mínimo el porcentaje de error.

Figura 19. Homogenización de lodos.



La recolección de la muestra debe ser con mucho cuidado para garantizar el resultado de los análisis. Es importante que al tomar la muestra se llene completamente el envase sin dejar cámara de aire y taponarla.

Para identificar la muestra recogida se la debe rotular con una etiqueta que debe incluir: nombre de la persona que toma la muestra, tipo de análisis, lugar y fecha de la muestra. (Véase fig. 20)

Figura 20. Rotulación de muestras.



Caracterización fisicoquímica de los lodos.

Para estudiar la calidad de aguas y sus subproductos es necesario conocer parámetros físicos y químicos a partir de métodos normalizados para evaluar si estos valores se encuentran entre los máximos y mínimos permitidos.

En nuestro caso estos parámetros los analizaremos en los lodos que son residuos del proceso de potabilización y se utilizara la metodología referenciada en el Standar Methods, con el fin de determinar la calidad y composición de los lodos.

Se tomó un litro de la mezcla homogénea y se le realizo el análisis de los siguientes parámetros con el fin de conocer sus características fisicoquímicas que serán de vital importancia en nuestra investigación.

Turbidez, pH, color, conductividad, sulfatos (mg/L), aluminio residual (mg/L) y sólidos suspendidos totales.

Turbidez

Es un parámetro físico que se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas como materia orgánica e inorgánica en el agua.

Para medir este parámetro se utilizó tradicionalmente la fotometría, la cual se define como una expresión de la propiedad óptica mediante la cual la luz se dispersa y absorbe en lugar de transmitirse en línea recta a través del agua.

Para la determinación de la turbidez en el lodo se utilizó un turbidímetro "**Micro 1000 IR Turbidimeter**". (Véase fig. 21)

Como el instrumento esta calibrado para medición de aguas claras se hizo una dilución de la muestra del lodo a un 10%, por lo tanto, el resultado será la medición multiplicada por 10.

Figura 21. Turbidímetro Micro 1000 IR Turbidimeter



El método de medida de turbidez utilizado en el equipo corresponde a la norma EN ISO 7027, basado en la

dispersión de 90° que sufre el rayo de luz que atraviesa un fluido con partículas en suspensión. Las unidades de turbidez empleadas son NTU (Nephelometric Turbidity Units).

La ISO 7027 Turbidez técnica se utiliza para determinar la concentración de partículas en suspensión en una muestra de agua mediante la medición de la luz incidente dispersada en ángulos rectos.

La luz dispersada es capturada por un fotodiodo, que produce una señal electrónica que se convierte a un valor de turbidez como se ilustra en la Figura, turbidímetros modernos utilizan nefelométrica medición de directores en lugar de transmitancia debido a la dispersión frontal de la luz es dependiente de la forma y tamaño de la partícula. Por lo tanto, la medición de la transmitancia puede ser difícil a turbiedades bajas o altas debido a la variabilidad de la luz transmitida a través de la muestra.

La nefelometría es el método cuantitativo más comúnmente utilizado para la determinación de la turbidez con mayor precisión. Muchos investigadores utilizan nefelómetros porque son insensibles a pequeños cambios en el diseño.

PH

Este parámetro es muy útil en nuestra investigación debido a que nos indica el grado acidez o alcalinidad que tiene el lodo a partir de la concentración de iones H^+ .

La técnica establecida para el análisis de este parámetro está especificada en la norma internacional UNE-NE ISO 10523 la cual describe un método para la determinación de pH en aguas potables, superficiales, subterráneas, minerales, residuales y lodos líquidos, cuando el pH se encuentre en el rango de 2 a 12.

El equipo que utilizamos es el Thermo scientific orion 4 star (véase Fig. 22) el cual trabaja con temperaturas de 0 a 50 °C.

Figura 22. Phmetro y conductímetro Thermo scientific orion 4 star



Conductividad

Es la capacidad de una sustancia para conducir la corriente eléctrica. En medios líquidos y lodos la conductividad se asocia con las sales en solución en la cual se genera iones positivos y negativos (cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio) hábiles de transmitir la energía eléctrica.

La unidad básica para la conductividad es el siemens por centímetro y para medir este parámetro lo hice través de la norma ISO UNE-EN 27888:1994 en la cual se describe la determinación directa de la conductividad eléctrica en soluciones acuosas a partir de equipos adecuados.

La determinación de este parámetro puede ser realizada en el campo o en el laboratorio y la realice a través de el mismo equipo que utilice para medir el pH, el Thermo Scientific Orion 4 Star (véase Fig. 22).

El conductímetro genera una diferencia de voltaje entre dos electrodos sumergidos en el lodo para lo cual es necesario una solución estándar de estándar ($KCl_{ac} = 0,01M$) para calibrar el conductímetro. Si la conductividad supera el rango del instrumento, diluimos la muestra de lodo en agua destilada en un porcentaje de 50 – 50.

Color

El color de un lodo no tiene ninguna relación con su grado de contaminación debido a que este es regido por sustancias coloreadas las que pueden degradarse con el tiempo.

Para determinar el color de un lodo se realizó el análisis en las 24 horas posteriores de obtenida la muestra, la cual

permaneció en refrigeración.

Este parámetro fue analizado mediante la norma ISO UNE-EN 7887:1995 la cual especifica un método para la determinación del color a través del sentido visual y se emplea el equipo Colorímetro Orbeco 711 Nesslerizer System.

Sulfatos

El ion sulfato (SO_4^{2-}) es uno de los que se ostenta en mayor cantidad en aguas naturales y residuales.

Obtenidas las muestras de lodo de los sedimentadores y floculadores estas deben ser tratadas cuidadosamente y almacenadas a una temperatura de 4 °C para evitar alteraciones en las lecturas o mediciones.

Existen diferentes métodos para determinar el contenido de sulfato en lodos, de los cuales tenemos el gravimétrico, el nefelométrico y espectrofotométrico este último es el más apto para nuestra investigación.

Esta determinación se la realizo por el procedimiento de Sulfatos (Método 8051) a través de un instrumento llamado espectrofotómetro HACH DR 2800 previo a una calibración.

Antes de realizar el procedimiento se diluirá la muestra al 25% debido a que el espectrofotómetro está en un rango menor al de la medición requerida.

Aluminio residual

Este parámetro depende mucho del coagulante utilizado y su dosis suministrada en el tratamiento de potabilización, y es muy importante porque establece la eficacia del proceso de clarificación del agua.

Si la concentración de aluminio residual es muy alta en el agua tratada provoca problemas en esta como color y turbidez no deseables las cuales son características organolépticas que pueden hacer un agua inaceptable para el consumidor.

En nuestra investigación es muy relevante este parámetro porque identificamos cual es porcentaje del aluminio residual en las muestras del lodo, la determinación se llevará a partir del procedimiento de Aluminio (Método 8051) a través del espectrofotómetro HACH DR 2800.

Al igual que en la determinación de sulfatos se diluyo la muestra al 25% para que la medición requerida este en el rango del espectrofotómetro.

Sólidos Suspendidos Totales S. S. T.

En aguas dulces este parámetro permite estimar la cantidad de materia disuelta y en suspensión que esta contiene debido a que si es muy alto puede ser por lo general es de mal agrado para el paladar y trae reacciones adversas en el consumidor.

Como la base de nuestro estudio es el lodo, los sólidos suspendidos totales serán muy altos, pero es muy relevante conocer su concentración para mi investigación.

Para la determinación de los sólidos suspendidos totales en el lodo se utilizó un método sencillo utilizando la medida de la conductividad de este, debido a que existe una correlación directa entre la conductividad y la concentración de s.s.t. por lo cual podemos utilizamos esta expresión:

$$S. S. T. = K * C$$

Dónde:

S. S. T. = Sólidos suspendidos totales.

K = Coeficiente de correlación establecido a una temperatura estándar.

C = Conductividad expresada en uS.

Ensayo de tratamiento

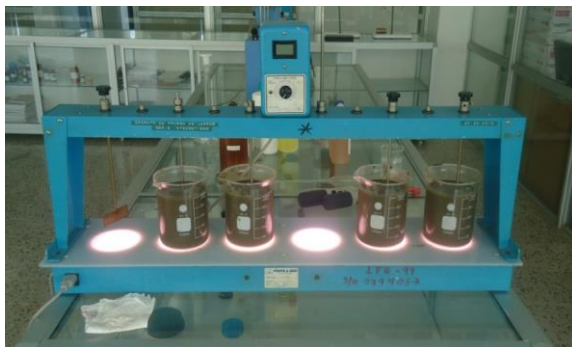
Para nuestro estudio el objetivo será conocer las condiciones óptimas para el proceso de recuperación de sulfato de aluminio, donde se evaluara variables como: dosis del ácido y tiempo de agitación.

Este ensayo se adaptó a una Prueba de Jarras. El ensayo de tratamiento se realizó en un equipo llamado "Jar Test" y consta de un sistema de agitación con un regulador de diferentes velocidades (0 – 180 rpm).

El procedimiento se realizó con 4 jarras con un volumen de 1 litro de la mezcla del lodo a cada una (véase Fig. 25) y se le añadió ácido sulfúrico diluido al 25% a distintas dosis con el fin de regular el pH de la muestra (1.5, 2, 2.5 y 3.5) a una velocidad de agitación constante de 100 rpm y distintos tiempos de mezcla (15, 30 y 60 minutos).

Transcurrido el tiempo de mezcla se dejó sedimentar el lodo acidificado por un tiempo de 60 minutos y se recolecto muestras del sobrenadante el cual contiene el coagulante recuperado.

Figura 23. Jar Test.



Terminado el ensayo se realizó una evaluación para determinar el tiempo de agitación óptimo y la dosis del ácido para establecer un equilibrio en la reacción del hidróxido de aluminio y el ácido sulfúrico.



PH del lodo y dosis del ácido

Estas son dos variables dependientes, son inversamente proporcionales quiere decir si el pH del lodo es muy bajo (ácido) este va a requerir menos ácido que un lodo que tenga un pH neutro o mayor a 7.

Como se estima que los valores de pH están entre 1 y 4 se establecieron rangos de dosis del ácido (3, 6, 9 y 12) mg/L al 25%.

Tiempo de mezcla

Es una de las variables más importantes para la recuperación de sulfato de aluminio, por lo tanto, se determinó el porcentaje de aluminio recuperado dejando como constantes: la dosis del ácido (3, 6, 9 y 12) y la velocidad de agitación de 100 r.p.m.

Para determinar el tiempo óptimo de mezcla se combinó en un intervalo de tiempo entre 15 y 60 minutos, en este rango se evaluó el punto de la reacción del lodo (hidróxido de sodio) con el ácido (H_2SO_4) establecido por la máxima recuperación de sulfato de aluminio.

Caracterización fisicoquímica del sobrenadante

El sobrenadante obtenido será sometido a una caracterización fisicoquímica con el fin de establecer la cantidad del coagulante recuperado. Se identificará los siguientes parámetros:

Turbiedad, pH, color conductividad, sulfatos (mg/L), aluminio residual (mg/L) y sólidos suspendidos totales.

Estos parámetros se determinaron con los métodos utilizados en la caracterización fisicoquímica de los lodos.

Una vez obtenidos estos datos, se evaluó la reutilización del sulfato de aluminio recuperado al proceso de potabilización a través una prueba de jarra con agua cruda, con el fin de establecer si el coagulante recuperado es idóneo para el proceso de potabilización de agua.

Comparación de eficiencia del sulfato de aluminio Tipo A y el sulfato de aluminio recuperado.

El día tres de octubre del 2013 se realizó los ensayos de tratamiento en los laboratorios de control de calidad de la planta EAPA SAN MATEO.

Se realizaron los análisis físico-químicos al agua cruda que ingresa a tratamiento a la planta ese día, entre los parámetros principales a analizados tenemos: PH, turbidez, conductividad, sulfatos, aluminio residual, hierro total, sólidos totales disueltos, etc.

Se tomó una solución de sulfato de aluminio Tipo A y se realizó una prueba de jarra con el agua cruda de la planta con el fin de obtener una dosis óptima del coagulante.

Luego se realizó otra prueba de jarras con la solución de sulfato de aluminio recuperado de los lodos y se determinó una dosis óptima del coagulante recuperado, tomando en cuenta que este ensayo se realizó con el sobrenadante que presento mejor resultado en el proceso de acidificación.

También se realizó la comparación de los resultados obtenidos en las dos pruebas de jarras con el fin de establecer

que tan eficiente es el sulfato de aluminio recuperado y si cumple con los requerimientos de la operatividad de la planta.

RESULTADOS

Características fisicoquímicas de los lodos, concentraciones de recuperación de sulfato de aluminio y factibilidad económica de su reutilización.

Se tomó la muestra en el mes de octubre del 2013, época de invierno, en la que la región costa presenta muchas lluvias. En el laboratorio de control de calidad de la EAPA San Mateo fueron sometidas a un análisis de caracterización fisicoquímica las muestras del lodo sin acidificar. Estos datos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Caracterización Fisicoquímica de lodos de la EAPA San Mateo.

Propiedad físico química	Valor	Unidad
Turbiedad	385	NTU
PH	6.5	
Color	4800	UPC
Conductividad	344.3	
Sulfatos	50	(mg/L)
Aluminio residual	0.397	(mg/L)
Sólidos suspendidos totales	168.707	PPM

Las características de los lodos dependen del tipo de agua cruda que ingresa a la planta y del sistema de tratamiento para producir agua potable, según los análisis tenemos que la turbiedad está en 385 NTU, su pH es de 6.5 un poco ácido y su color en 4800 UPC.

Estos lodos son considerados residuos no peligrosos, se compara estos valores con la tabla 3 del libro VI Anexo 1 del tulas "Límites permisibles de descarga a un cauce", se observa en la tabla 5, que el valor de sulfatos está en 50 mg/L, aluminio residual 0.397 mg/L y los sólidos suspendidos totales en 168.707 ppm, todos estos valores se encuentran por debajo de los valores de la tabla 3, por lo que no representa un peligro depositarlos en el río Esmeraldas, pero si presenta molestias como olores desagradables y degradación del paisaje del cauce.

La conductividad es de 344.3 ohmios considerando agua no muy buena conductora de la electricidad debido a su concentración de sólidos.

Ensayos de tratamiento y Caracterización Fisicoquímica del sobrenadante

Los ensayos de tratamiento fueron realizados como lo establecido en el capítulo dos, se dejó reposar cada muestra durante una hora para sedimentar el lodo residual y poder extraer el sobrenadante el cual contiene la solución de sulfato de aluminio.

Una vez realizados los ensayos se procedió a una segunda caracterización fisicoquímica pero ahora del sobrenadante producto de este proceso. Los resultados del sobrenadante lo presentamos en la tabla 6.

Optimización del proceso de acidificación

A través de las pruebas de jarras se recuperó el sulfato de aluminio en lodos, donde se buscó optimizar este proceso considerando variables como pH, dosis del ácido y tiempo de mezcla, encontrando las más óptimas condiciones, con la finalidad de obtener un alto porcentaje del alumbre.

Concentración y porcentajes de aluminio recuperado

Para el proceso de recuperación se estableció 4 dosificaciones del ácido H_2SO_4 (3, 6, 9 y 12) mg/L para alcanzar niveles de pH del lodo entre 1 y 4. En la tabla 6, podemos observar la cantidad y porcentaje de aluminio recuperado.

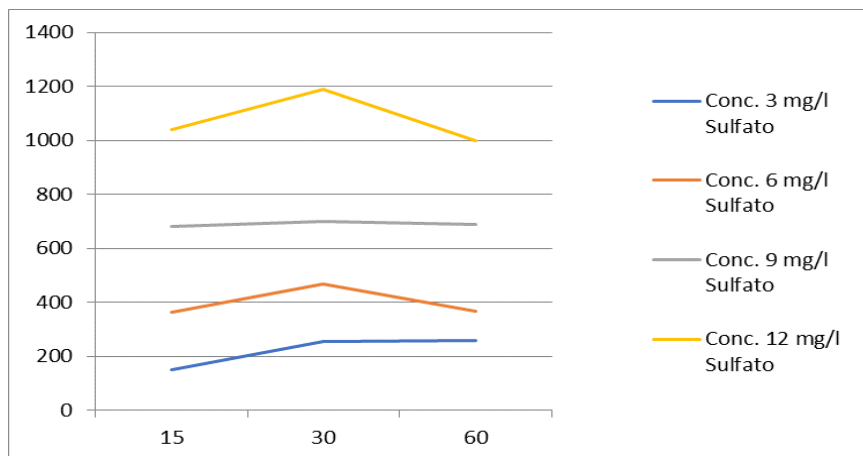
Tabla 6. Concentración y porcentaje de aluminio recuperado en 1000ml tratamiento en lodos de la EAPA San Mateo.

Dosis del ácido 25% (mg/L)	Tiempo de mezcla (min)	Parámetro	
		Aluminio (mg/L)	Aluminio (%)
3	15	149.3	13.4
	30	255.3	16.8
	60	258.5	17.9
6	15	363.2	23.5
	30	467.5	24.3
	60	366.1	20.8
9	15	680.1	36.9
	30	700.4	41.2
	60	690.5	44.3
12	15	1038.5	53.5
	30	1190.2	69.3
	60	998.62	58.4

Se realizaron tres pruebas de jarras con distintas dosis de ácido y distintos tiempos de mezclas. En la primera prueba de jarras el tiempo de mezcla fue de 15 minutos y se obtuvo el mayor porcentaje de sulfato de aluminio 1038.5 mg/l al agregarse 12 mg/l de ácido. En la segunda prueba de jarras siendo 30 minutos el tiempo de mezcla se obtuvo 1190.2 mg/l, la cual es la mayor recuperación de todos los ensayos de tratamiento al agregar 12 mg/l del ácido.

Por último, la tercera prueba de jarras siendo 60 minutos el tiempo de mezcla y al agregar 12 mg/l de ácido se obtuvo 998.62 mg/l de sulfato de aluminio, este valor no sobrepasa el de la segunda prueba de jarras.

Figura 24. Concentración y porcentaje de aluminio recuperado en 1000ml tratamiento en lodos de la EAPA San Mateo



Porcentajes de reducción de lodo

Se evaluó el porcentaje de reducción de lodo, midiendo el volumen del lodo después de la acidificación, con el fin de relacionar el porcentaje de reducción en volumen de lodo con el porcentaje de recuperación de alumbre

A partir de la tabla 6 se puede deducir la dosificación y tiempo de mezcla óptimos (12 ml y 30 min), en aquellos valores en los que se obtuvo el mayor porcentaje de recuperación de aluminio (69,3%), se alcanzó un porcentaje de reducción de lodo del 31% condición que le da mejores características de manejo al lodo.

En la tabla 7 se observa que existen porcentajes mayores en reducción del lodo (43.2%), pero para dimensionar los equipos en el diseño del proceso y para la evaluación económica del mismo, solo se tendrá en cuenta las mejores condiciones en porcentaje de recuperación del aluminio, la reducción del volumen de lodo al aumentar la recuperación de aluminio se presenta porque este tiene a complejadas moléculas de agua atrapadas en el lodo que son liberadas al solubilizarse el metal (deshidrata el lodo), así mismo aumenta la tasa de filtración y finalmente la compactación y sedimentación del lodo se logra más rápidamente bajo condición ácida (Nuñez Zarur, Peña Castro, 2011).

Otros trabajos encuentran mayores porcentajes de reducción, como Sandoval, et al (1997) con una reducción del volumen de lodo de 91.12% y Sandoval, et al. (1998), que mediante la conjunción de un acondicionamiento con polímero y una acidificación, se puede obtener una reducción del volumen del lodo de hasta un 97%.

Tabla 7. Porcentajes de reducción de lodo.

Dosis del ácido 25% (mg/L)	Tiempo (min)	Al recuperado (%)	Lodo reducido (%)
3	15	13.4	22.7
	30	16.8	23.9
	60	17.9	26.7
6	15	23.5	31.3
	30	24.3	36.4
	60	20.8	35.8
9	15	36.9	41.1
	30	41.2	43.2
	60	44.3	39.1
12	15	53.5	33.0
	30	69.3	31.0
	60	58.4	35.0

Comparación entre el sulfato de aluminio tipo A y sulfato de aluminio recuperado.

Como paso primordial se realizó el análisis físico químico del agua cruda del día 3 de octubre del 2013 a través de técnicas utilizadas en el laboratorio de control de calidad de la EAPA San Mateo.

Tabla 8. Análisis físico químico de agua cruda.

ANÁLISIS FÍSICOS	AGUA CRUDA	UNIDAD
Temperatura	25,8	°C
pH	7,13	
Color	15	U.C.
Turbiedad	13,48	N.T.U.
Conductividad	229,4	Umhos/cm
ANÁLISIS QUÍMICOS	AGUA CRUDA	UNIDAD
Cloro residual	0,8	mg/l
Anhidrido Carbónico libre	7,64	mg/l
Carbonatos	0	mg/l
Bicarbonatos	143,96	mg/l
Cloruros	50	mg/l
Hierro Total	0,34	mg/l
Manganeso	0	mg/l
Alcalinidad Total	130	mg/l
Dureza Total	50	mg/l
Dureza carbonatada	50	mg/l
Dureza no carbonatada	0	mg/l
Aluminio residual	0,245	mg/l
Calcio	16	mg/l
Magnesio	1,21	mg/l
Sulfato	28	mg/l
Amoniaco	0,36	mg/l
Fosfatos	0,10	mg/l
Nitratos	1,1	mg/l
Nitritos	0,078	mg/l
Cobre	0,38	mg/l
Cromo	0,06	mg/l
Sólidos totales disueltos	112,406	mg/l

Según los análisis fisicoquímicos que se realizaron al agua cruda, se obtuvo 13,48 N.T.U. de turbiedad y 15 U.C. de color, por lo tanto, no es agua muy turbia, el pH en 7,13 y la conductividad en 229,4 umhos/cm.

En los análisis químicos se obtuvo 7,64 mg/l de CO₂ libre, 143,96 mg/l de bicarbonatos, 0,34 mg/l de hierro total, 0,245 mg/l de aluminio residual, 28 mg/l de sulfatos y así mismo una baja cantidad de sólidos totales disueltos 112,406 mg/l.

Prueba de jarras del sulfato de aluminio tipo A

Se realizó una prueba de jarras con una solución de sulfato de aluminio tipo A con el agua cruda de la planta, luego

se realizó el análisis de la turbiedad y pH de las distintas jarras.

Tabla 9. Prueba de jarras sulfato de aluminio tipo A.

N° JARRAS	Conc. Al ₂ (SO ₄) ₃	Turbidez	PH	Dosis optima
	mg/l	NTU		mg/l
1	30	3,72	6,40	40
2	35	3,10	6,34	
3	40	1,92	6,31	
4	45	1,25	6,28	
5 (DOSIFICADA)	35	1,54	6,56	

Se obtuvo como mejor resultado la jarra # 4, agregándole 45 mg/l del coagulante se obtiene una turbiedad de 1,25 NTU y un pH de 6,28, pero se establece como dosis optima 40 mg/l (jarra #3) que se obtiene una turbiedad de 1,92 y un pH de 6,31, debido a que el resultado del agua dosificada (35 mg/l) es de 1,54 de turbiedad y 6,56 de pH estando dentro de los límites permisibles de calidad de agua potable.

Prueba de jarras del sulfato de aluminio recuperado

Se realizó una prueba de jarras con una solución de sulfato de aluminio recuperado, luego se realizó el análisis de la turbiedad y pH de las distintas jarras.

Tabla 10. Prueba de jarras sulfato de aluminio recuperado.

N° JARRAS	Conc. Al ₂ (SO ₄) ₃	Turbidez	PH	Dosis optima
	mg/l	NTU		mg/l
1	30	4,57	6,56	45
2	35	4,13	6,44	
3	40	2,98	6,38	
4	45	2,41	6,31	
5 (DOSIFICADA)	35	1,54	6,56	

Se obtuvieron como mejor resultado la jarra # 4, agregándole 45 mg/l del coagulante se obtiene una turbiedad de 2,41 NTU y un pH de 6,31, por lo tanto, esta se establece como dosis optima del coagulante.

Teniendo en cuenta que se utilizó el mismo tipo de agua cruda para las dos pruebas de jarras, se determinó que se adiciona 40 mg/l de sulfato de aluminio tipo A para obtener una turbidez deseable en el agua tratada mientras que al adicionarse 45 mg/l de sulfato de aluminio recuperado no se logra la turbidez recomendable para el agua tratada. Por lo tanto, la calidad del sulfato de aluminio ha disminuido notablemente.

Análisis Económico de la recuperación de sulfato de aluminio

Producción de lodos

La EAPA San Mateo opera las 24 horas del día durante todo el año, esta planta está compuesta de tres módulos donde se producen lodos, los cuales entran a mantenimiento cada 15 días, por lo tanto, para este análisis se tomó como base 30 días, quiere decir la acumulación de la generación de lodos durante dos mantenimientos.

En una planta de tratamiento de agua potable la producción de lodos es igual al 0,7 % del agua tratada, por lo tanto, se tomó el mes de octubre del 2013, para conocer la cantidad de lodos en la planta.

Tabla 11. Producción de lodos octubre 2013.

Agua tratada	Turbiedad	Lodos producidos
M ³ /d	NTU	mg/l
54180	3,75	379,26
72756	3,64	509,292
63468	3,85	444,276
68112	4,12	476,784
51858	3,21	363,006
67338	2,8	471,366
69660	2,96	487,62
61146	2,83	428,022
61920	3,28	433,44
60332	2,59	422,324
57276	3,5	400,932
61920	3,19	433,44
55728	2,83	390,096
61146	3,07	428,022
59856	3,49	418,992
74304	4,25	520,128
74304	3,81	520,128
74304	4,39	520,128
55728	4,53	390,096
65016	4,45	455,112
74304	4,22	520,128
74304	3,98	520,128
83592	3,38	585,144
80460	4,37	563,22
74304	4,57	520,128
65016	4,88	455,112
58824	4,24	411,768
2709	4,3	18,963
61920	4,65	433,44
74304	4,51	520,128
74304	4,75	520,128
1994393		13960,751

Durante el mes de octubre se produjo 1994393 m³ de agua tratada por lo tanto el lodo producido durante ese mes es de 13960,751 m³ (13,96 x 10⁶ litros).

Consumo de sulfato de aluminio

El consumo de sulfato de aluminio en una planta potabilizadora depende de la turbiedad del agua cruda que ingresa a la planta y esta depende de las condiciones climáticas, se tomó el mes antes mencionado para conocer la dosis de coagulante aplicada diariamente y conocer su consumo durante 30 días.

Tabla 12. Consumo de sulfato de aluminio octubre 2013.

Dosificación Sulfato	Turbiedad agua cruda	Consumo Sulfato
mg/l	NTU	Kg/d
33,71	10,15	1869,12
35,00	10,18	2605,68
36,70	13,38	2386,92

51,12	15,37	3570,2
38,66	12,38	2057,13
35,40	12,38	2439,36
40,00	11,5	2851,2
39,75	12,7	2493,62
36,25	11,2	2303,5
35,42	10,97	2176,83
33,64	10,42	1961,22
34,55	10,13	2191,4
35,00	10,76	2001,84
35,00	10,66	2192,88
31,59	11,4	1610,76
44,33	15,47	3389,46
50,00	28,26	3801,6
43,33	26,93	3294,72
44,44	35,69	2534,4
50,00	33,51	3326,4
49,58	62,84	3769,92
26,88	45,65	2043,36
3,54	22,11	2582,34
35,00	19,15	2577,96
35,00	19,05	2661,12
39,27	25,2	2661,12
46,31	26,19	2794,2
91,84	21,81	2549,5
40,00	23,12	2534,4
40,00	20,84	3041,3
35,21	17,22	2676,9
Total		80950,36

Durante el mes de octubre la dosis de coagulante varia constantemente, el valor promedio es 39,57 mg/l, y se obtuvo un consumo total de 80950,36 kg de sulfato de aluminio (80,9 ton).

Evaluación económica de reutilizar el coagulante recuperado

Como paso primordial evaluamos el gasto que la planta realiza por la compra de coagulante, tomando en cuenta el consumo de sulfato de aluminio mensual y el costo de este en el mercado para conocer el costo de sulfato de aluminio durante 30 días.

$$80950,36 \text{ kg} \times 0.30 \text{ \$ / Kg} = \$ 24285,108$$

En el mes de octubre se gastó aproximadamente \$ 24285,108 en consumo de coagulante.

Tomando como base 30 días, se conoce que el mes de octubre se produjo 13960,751 m³ de lodos, según los datos de nuestra investigación se obtuvo una recuperación máxima de 1190,2 mg/l con lo cual podemos obtener cuanto de sulfato de aluminio podemos recuperar en el tiempo base.

$$13960,751 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ l/m}^3 \times 1190,2 \text{ mg/l} \times 0,000001 \text{ kg/mg} = 16616,085 \text{ kg}$$

En nuestro estudio se puede recuperar hasta 16616,085 kg de sulfato de aluminio.

Comparando el sulfato de aluminio recuperado en el mes se obtiene una recuperación del 20% del sulfato consumido.

Para conocer el costo de este sulfato de aluminio recuperado tomaríamos en cuenta el costo de este en el mercado.

$$16616,085 \text{ kg} \times 0.30 \text{ \$ / Kg} = \$ 4.984.82$$

Si se pondría en práctica el proceso de recuperación se debe implementar una planta de acidificación de lodos,

iniciando desde la captación de estos hasta su disposición final.

Los lodos que se producen en las etapas de sedimentación y floculación se recogen en una cámara rectangular que se encuentran en la cota – 15,0 m.

Para captar estos lodos y llevarlos hasta un tanque de almacenamiento necesitaríamos una estación de bombeo, con bombas de desplazamiento positivo para transportar fluidos viscosos con altos contenidos de sólidos (bombas de tornillos). Estas bombas están en el mercado entre \$ 30000 y \$ 50000 según las especificaciones requeridas para nuestro proceso.

Además, la implementación de una planta de recuperación de lodos basándose en el diseño del proceso de acidificación de estos comprende tres fases: homogenización, acidificación y separación de fases. Para esto se necesita cuatro equipos: Tanque Ácido Sulfúrico, Tanque homogeneizador, Reactor de agitación, Separador de fases.

Por lo tanto, del coagulante recuperado en la planta se ahorraría mensualmente \$ 4.984.82 que vendría a ser el 20% de lo gastado en el mes antes mencionado, pero debido a las condiciones de la planta potabilizadora por no contar con un espacio físico para la implementación de una planta de recuperación de sulfato de aluminio y a sus altos costos de construcción y mantenimiento resulta más conveniente comprar el sulfato de aluminio y no recuperarlo

CONCLUSIONES

En la planta de tratamiento de la EAPA San Mateo, según registros el caudal promedio con el que trabaja es de 880 litros por segundo, de este proceso se genera lodo como residuo, los mismos que no recibe ningún tratamiento, previo a su disposición final al río Esmeraldas, ocasionando contaminación al ambiente.

La recuperación de aluminio se llevó a cabo con un método a nivel de laboratorio (ensayos de tratamiento) a partir de lodos de la planta de tratamiento de aguas de la EAPA San Mateo, donde se consideró tiempo y concentraciones de H_2SO_4 . Las condiciones óptimas para la recuperación de aluminio al acidificar con H_2SO_4 son: 12 mg/L con un tiempo de reacción (tiempo de mezcla) de 30 min, en época de invierno, con un volumen de 1000 ml de lodo, donde se recuperó 1190,2 mg/L de aluminio, alcanzando un porcentaje de 69,3%.

La calidad del sulfato de aluminio recuperado se ha degradado notablemente en comparación con la del sulfato de aluminio Tipo A. El análisis beneficio/costo de nuestra investigación muestra que implementar el proceso de recuperación en la planta no es recomendable debido a que la cantidad de lodos generados por la planta es poca en comparación al gasto de sulfato de aluminio y le implementación de una planta de ese tipo es demasiado costosa en comparación al sulfato de aluminio que puede recuperarse.

REFERENCIAS

- Barba Luz E., E. Mesa & M. Rosero. (2007). RECUPERACION DE SULFATO DE ALUMINIO DE LODOS GENERADOS DURANTE EL PROCESO DE POTABILIZACION DEL AGUA. Universidad del Valle. Santiago de Cali. EMCALI E.I.C.E. Empresa de Acueducto y Alcantarillado S.A. E.S.P.
- Cabezas Yáñez Lucia. (2011). Diseño de un Sistema de Tratamiento de lodos provenientes de EPMAPA-Santo Domingo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- López Espinoza J., Rivas Cevallos J. (2013). Estabilización de los lodos generados en la planta potabilizadora de agua EMAARS-EP en la Estancilla medio compostaje. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí. Calceta.
- Martínez Cordero M., Blanca E. Jiménez, & Vaca Mier M. (2000). Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento primario avanzado. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Núñez Zarur J., Peña Castro M. (2011). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización de la empresa aguas de Cartagena S.A E.S.P y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante. Universidad de Cartagena. Cartagena D. T Y C.
- Ortega Mafla J., Carvajal Ruiz A. (2014). Gestión de lodos producto de la potabilización de agua utilizada en el lavado de filtros y sedimentadores en la planta de tratamiento de Puengasí de la Empresa Pública Metropolitana de agua potable y Saneamiento Quito.
- ORTIZ-HERNÁNDEZ Ma. Laura, Margarita E. GUTIÉRREZ-RUIZ~ y Enrique SANCHEZ-SALINAS. (2007). Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del Valle' de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. Universidad Autónoma de Morelos. México, D.F.
- Raigosa Restrepo M. (2012). Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de Risaralda mediante el análisis costo-beneficio. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Sandoval Yoval L., & Motellano Palacios L. (1998). Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Zhindón Arévalo C. (2011). Tratamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora de Mahuaray mediante el uso de un lecho de secado. Universidad de Cuenca