



**PLANTA SOSTENIBLE DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES CON
RECUPERACIÓN DE SULFUROS, CROMO Y MATERIA ORGÁNICA**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN INAM – USTA
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN TECNOLOGÍAS AMBIENTALES**

**PROYECTO FINANCIADO POR
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS – TECNOPARQUE SENA – CURTIEMBRES CAMELO**

**INVESTIGADORA
NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS
INGENIERA QUÍMICA, MSc. DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
DOCENTE FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

BOGOTÁ, NOVIEMBRE DE 2016

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



RESUMEN

Las aguas residuales de curtiembres contienen elevadas concentraciones de sulfuros utilizados para el proceso de pelambre, cromo empleado en el proceso de curtido para evitar la degradación de la piel por acción de microorganismos, tintas y materia orgánica.

El tratamiento de este tipo de aguas residuales, genera una de las más altas cantidades de lodos, catalogados como residuos peligrosos por la presencia de cromo que es un metal pesado y de sulfuros que en medio ácido genera ácido sulfhídrico de elevada toxicidad.

La planta de tratamiento propuesta considera la recuperación del cromo y del sulfuro para ser reutilizados en los mismos procesos de curtido y el aprovechamiento del 60% de la materia orgánica para producción de compost, con el fin de minimizar la problemática de la disposición de lodos.

Se redujo la concentración de sulfuros desde concentraciones promedio de 214 mg/L en las aguas mezcladas de vertimientos de curtiembres hasta concentraciones menores a 3 mg/L que es el límite máximo permisible según la resolución 0631 de 2015 para vertimientos generados por industrias de curtiembres. Se alcanzó la extracción total de sulfuros para valores de pH de 2 a 6, tiempo de agitación de 45 a 90 minutos y 120 rpm con recuperación de los mismos en solución de soda cáustica produciendo sulfuro de sodio que es la materia prima utilizada para el pelambre de las pieles, permitiendo su reutilización en este proceso.

Aproximadamente el 60% de la materia orgánica es recuperada por precipitación después del proceso de extracción de sulfuros, por sedimentación durante una hora para alcanzar mayor compactación de la misma. Mediante lavados con agua se realiza la desorción del cromo que aún pueda contener, permitiendo su compostaje. El agua obtenida de la desorción del cromo ingresa al proceso de tratamiento de las aguas residuales.

La concentración de cromo disminuyó desde concentraciones promedio de 680 mg/L hasta niveles menores de 1,5 mg/l que es el límite máximo permisible según la resolución 0631 de 2015 para vertimientos de curtiembres, por precipitación con hidróxido de sodio 3M, formando hidróxido de cromo que puede ser reutilizado en el proceso de curtido después de acidificación con ácido sulfúrico hasta pH aproximado de 3,3-3.6 que es el requerido para curtir las pieles. La precipitación del cromo se obtiene en un período de una hora, menor al obtenido de 24 horas en otros estudios similares, debido a que al precipitar primero la mayor parte de la materia orgánica permite la rápida precipitación de este.

Después de la extracción y recuperación de sulfuros y de cromo, se requiere el uso de coagulantes para precipitar la materia orgánica remanente hasta niveles permisibles y

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



obtener DQO inferior a 1.200 mg/L que corresponde al límite máximo según la resolución 0631. En este proceso de tratamiento de aguas residuales de curtiembres los insumos requeridos, además de coagulantes, son soda cáustica y ácido sulfúrico que tienen menor costo que los subproductos recuperados de sulfuro de sodio y de cromo que pueden ser reutilizados en los procesos de pelambre y curtido de las pieles respectivamente. Además se recupera materia orgánica que puede compostarse para producción de abono.

El agua residual tratada contiene concentraciones de sulfuros (menor de 1 mg/L), cromo (menor de 1 mg/L), DBO (menor de 600 mg/L) y DQO (menor de 1.200 mg/L) por debajo de los límites máximos permisibles según la resolución 0631 de 2015 para vertimientos.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

INTRODUCCIÓN

La industria de curtiembres de los sectores San Benito y Villapinzón, aporta elevadas cargas contaminantes a las aguas de los ríos Tunjuelito y Bogotá, principalmente cromo, sulfuros, materia orgánica y tintas. Allí se encuentran registradas aproximadamente 450 curtiembres, que representan más del 50% de las industrias curtidoras del país. La mayoría no posee tratamiento de aguas residuales, siendo medianas o pequeñas fábricas de origen familiar, con poca tecnificación y personal empírico de escasa capacidad técnica y sin suficiente motivación por mejorar sus procesos y mitigar el impacto ambiental que producen. Esto ha generado cierre por falta de licencia ambiental de muchas de estas industrias.

Para curtir una piel se utilizan cerca de 1.000 litros de agua. En San Benito se producen en promedio 70.000 pieles mensuales y en Villapinzón 30.000. Esto representa caudales aproximados de 27 L/s en San Benito y de 12 L/s en Villapinzón.

Hay muchos trabajos de investigación sobre el tratamiento del agua residual de un proceso de las curtiembres, por ejemplo tratamiento del agua del pelambre, del curtido o del teñido, pero no partiendo de las aguas mezcladas que contienen tipos diferentes de contaminantes. Este trabajo propone procesos de tratamiento con recuperación y reutilización de sulfuros y cromo y parte de la materia orgánica para tratar las aguas residuales mezcladas de las industrias de curtiembres.

Potencialmente hay aproximadamente 450 curtiembres en San Benito y Villapinzón con graves problemas legales por contaminación debida a sus vertimientos no tratados o insuficientemente tratados.

Algunas curtiembres tienen planta de tratamiento no sostenibles porque el uso de floculantes y oxidantes para los sulfuros requeridos es muy alto, lo que genera elevados costos de tratamiento o necesidades de grandes áreas cuando se implementan tratamientos biológicos con microorganismos.

Se propone el diseño y construcción de una planta de tratamiento de las aguas residuales mezcladas de curtiembres, obteniendo un vertimiento tratado con parámetros de calidad

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



dentro de los límites máximos permisibles de acuerdo a la resolución 0631 de marzo de 2015 respecto a sulfuros, cromo, DQO y DBO₅.

Objetivo General

Diseñar y construir una planta compacta para el tratamiento de las aguas residuales mezcladas de las industrias de curtiembres.

Objetivos Específicos

- * Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales mezcladas de las industrias de curtiembres con base en los métodos estándar (SM): sulfuros (4500 E Yodometría), cromo (3500 B Espectrofotometría), sólidos suspendidos (2540 Gravimetría), DBO₅ (5210 B Incubación y electrodo de membrana) y DQO (5220 D Reflujo cerrado).
- * Evaluar para los sulfuros: oxidación catalítica y extracción de ácido sulfhídrico para recuperación como sulfuro de sodio.
- * Evaluar la recuperación del cromo de las aguas residuales mezcladas de curtiembres, como hidróxido y su regeneración con ácido sulfúrico para ser reutilizado en el proceso de curtido.
- * Evaluar la disminución del contenido de materia orgánica en las aguas residuales por sedimentación en el proceso de extracción de sulfuros y en el proceso final de tratamiento por coagulación.
- * Determinar los tiempos de retención para el dimensionamiento de la planta y proporciones de reactivos requeridos para estandarizar el proceso.
- * Diseñar y construir la planta compacta.
- * Tratar los vertimientos mezclados de una curtiembre, en la planta compacta.
- * Determinar la calidad del efluente tratado: cromo, sulfuros, DQO, DBO₅ y sólidos suspendidos.

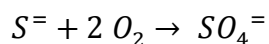
Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se realizaron las siguientes etapas:

- Preparación del agua residual mezclada de los vertimientos de las diferentes etapas de producción de cuero: lavado de pieles (20%), pelambre (25%), desencale (25%), piquelado y curtido (15%), recurtido, teñido y acabados (15%). Esta composición fue obtenida a partir de información de los curtidores (Curtiembres Camelo y otras).
- Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual con base en los métodos estándar (SM): sulfuros (4500E Yodometría), cromo (3500B Espectrofotometría), sólidos suspendidos (2540 Gravimetría), DBO₅ (5210B Incubación y electrodo de membrana) y DQO (5220D Reflujo cerrado).
- Filtración del agua residual en filtro de acero inoxidable de malla 100 código mesh (100 orificios por pulgada lineal).
- Diseño experimental para evaluar en función del tiempo, la oxidación catalítica de sulfuros aprovechando el contenido de hidróxido de cromo en el agua residual como catalizador a pH 9, utilizando como agente alcalino el hidróxido de sodio 3M, tomando muestreos cada hora durante un período de 6 horas. Se realizaron 3 réplicas. Se dosifica oxígeno con un compresor en un tanque cerrado y para disminuir los olores generados en el proceso se conecta un ducto de salida que conduce los gases en exceso a un recipiente con soda cáustica 3M.



- Diseño experimental para evaluar en función del tiempo, la recuperación de sulfuros como sulfuro de sodio a valores ácidos de pH entre 2 y 6 del agua residual ajustado con ácido sulfúrico, con solución de hidróxido de sodio 3M receptora de sulfuros, tomando muestreos cada 15 minutos durante un período de 90 minutos. Cada ensayo se realizó por duplicado.

Se dosifican las aguas residuales de curtiembres de manera separada en un filtro de donde pasan a un homogenizador hermético con tapa. Primero se adicionan las

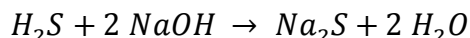
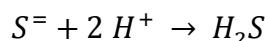
Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

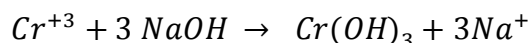


aguas ácidas correspondientes a los procesos de curtido, re-curtido, teñido y acabados. Cuando han salido completamente estas aguas del filtro, se dosifican las aguas alcalinas correspondientes a los procesos de lavado, pelambre y desengale. Cuando el filtro está desocupado, se cierra la válvula que conecta el tanque del filtro con la del homogenizador. Por otra válvula ubicada en la parte superior del tanque de homogenización se dosifica ácido sulfúrico para disminuir el pH hasta obtener suficiente acidez para producir ácido sulfhídrico que emerge en estado gaseoso, succionado por un extractor hacia un tanque que contiene solución de soda cáustica o hidróxido de sodio donde se genera sulfuro de sodio que puede ser reutilizado en el proceso de pelambre de las pieles.

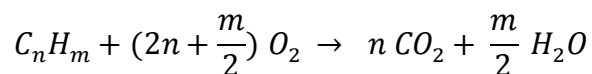
Las reacciones químicas en el tanque de homogenización con agitación y en la solución de soda cáustica receptora de sulfuros son respectivamente las siguientes:



- Diseño experimental para evaluar en función del tiempo, la precipitación de cromo como hidróxido, utilizando como agente alcalino soda cáustica o hidróxido de sodio 3M.



- Diseño experimental para evaluar en función del tiempo, la sedimentación de la materia después del tratamiento para la disminución del contenido de sulfuros. La materia orgánica es parcialmente oxidada durante el tratamiento en medio ácido de la extracción de sulfuros, mediante la siguiente reacción:



- Determinación de la dosis y tipo de coagulante, variando el pH, para obtener DQO y DBO₅ inferiores a 1.200 mg/L y 600 mg/L respectivamente con base en la resolución 0631 de 215.
- Construcción de la planta piloto para un caudal de 700 ml/h.

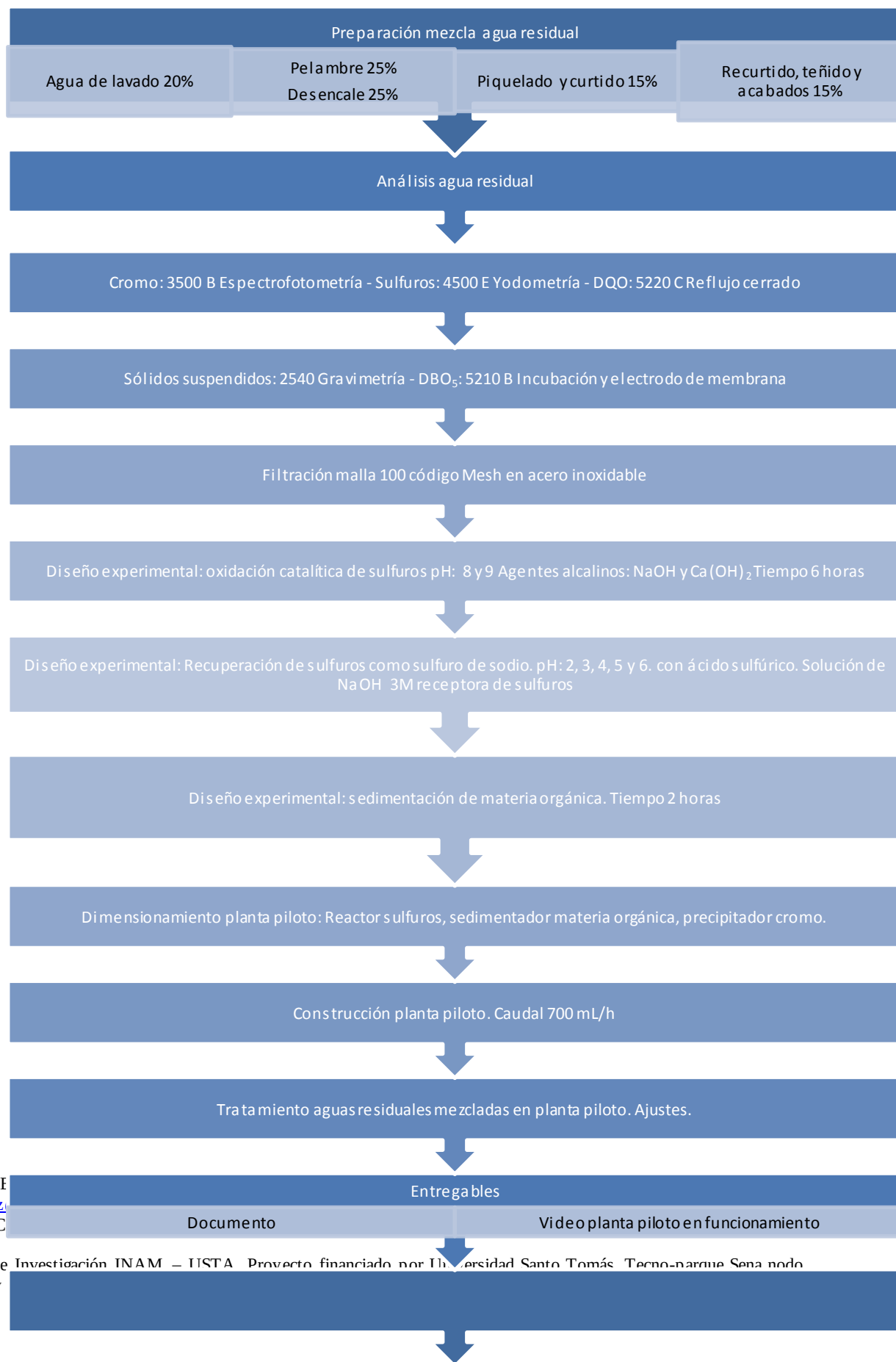
Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



- Tratamiento de las aguas residuales mezcladas de los vertimientos de curtiembres, en la planta piloto construida.
- Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada en la planta piloto: cromo, sulfuros, sólidos suspendidos, DBO_5 y DQO .
- Realización de ajustes necesarios.

El diagrama de flujo es el siguiente:





Determinaciones analíticas en laboratorio:

Se realizaron con base en los métodos estándar para análisis de aguas:

- **Análisis de cromo: SM 3500 B Espectrofotometría**

Preparación de soluciones:

Difenilcarbazida: pesar 250 mg de difenilcarbazida y disolver en 50 ml de acetona. Almacenar en frascos color ámbar con tapa con recubierta de teflón. La solución es transparente al prepararla, después se torna amarilla clara. Descartar la solución cuando comience a decolorarse; conservar refrigerada.

Disolución madre de cromo (500 mg/l): pesar 2 g de $K_2Cr_2O_7$ en horno a 105 °C por una hora, enfriar en desecador. Pesar 141,4 mg de $K_2Cr_2O_7$, disolver con agua y aforar a 100 ml; 1 ml de esta disolución equivale a 500 µg de Cr (VI).

Disolución estándar de Cr (VI) 5 mg/l: adicionar una alícuota de 1 ml de la disolución madre de Cromo (VI) a un matraz de 100 ml y aforar con agua. 1 ml de esta disolución equivale a 5,0 µg de Cr (VI).

Disolución de H_2SO_4 0,2N: Agregar 5,6 ml de H_2SO_4 concentrado a un matraz que contenga 500 ml de agua, mezclar y dejar enfriar a temperatura ambiente. Diluir con agua a 1 litro.

Curva de calibración:

Medir volúmenes de solución estándar de Cr (VI) de 5,0 µg/ml entre 2,0 y 20 ml para obtener estándares en el intervalo de 10 µg a 100 µg de Cromo (VI), en matraces aforados de 100 ml, después transferirlos a matraces Erlenmeyer de 250 ml; agregar H_2SO_4 0,2N hasta pH 1,0 ±0,3 y seguir el procedimiento que se indica a la muestra para desarrollo de color. Transferir una alícuota de cada estándar a la celda de absorción de 1 cm y medir su absorbancia a 540 nm, comenzado con la de menor concentración.

Tratamiento de la muestra:

La alícuota debe estar lo más clara posible por lo que debe filtrarse con papel de poro fino. La alícuota para muestras muy claras debe ser 100 ml.

Desarrollo de color: Ajustar pH a 1 con H_2SO_4 0,2N, tomar una alícuota de 100 ml o una alícuota conveniente de acuerdo al contenido de cromo (VI) en la muestra y aforar con

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



agua a 100 ml. Si la muestra está turbia, tomar una lectura de absorbancia previa a la adición del reactivo de difenilcarbazida, restar la absorbancia medida previamente al valor de la lectura final. Añadir 2 ml de disolución de difenilcarbazida, mezclar y dejar reposar 10 minutos para desarrollar el color completamente.

Ajustar el espectrofotómetro con el blanco de reactivos a cero de absorbancia.

Medir la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro para las muestras y los estándares. Determinar los μg de Cr (VI) presentes en la muestra directamente de la curva de calibración.

Cálculos:

Calcular la concentración de la muestra en μg de Cr (VI) a partir de:

$$y = mx + b$$

Donde y es la absorbancia, x corresponde a los μg de Cr (VI).

La concentración en mg de Cr (VI) se calcula así:

$$\frac{\text{mg Cr}}{l} = \frac{\mu\text{g de Cr obtenidos en la curva}}{\text{ml de muestra original}}$$

Considerar el empleo de los 102 ml de volumen final para los cálculos, ya que si el volumen de muestra está en 100 ml y se adicionan 2 ml de difenilcarbazida no provocará ningún factor de dilución, siempre y cuando los estándares y las muestras sean procesadas de la misma forma.

Reportar los resultados en mg de Cr/l, con la precisión correspondiente.

Las interferencias de color y turbiedad pueden contrarrestarse con un blanco de muestra. Este debe prepararse igual que la muestra pero sin adicionar la 1,5 difenilcarbazida; la absorbancia del blanco de muestra se resta al de la muestra.

Oxidación de Cromo (III) a Cromo (VI):

Diluir la muestra en balón aforado de 10 ml a 100 ml, adicionar 1 g de Na_2O_2 ajustando previamente el pH a 2 con HCl o H_2SO_4 y hervir hasta color naranja.

- **Análisis de sulfuros: SM 4500 E Yodometría**

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



A una muestra de solución de pelambre se añade una solución acuosa de yodo (I_2) disuelto en presencia de yoduro de potasio (KI; este permite que el yodo sea soluble en agua). El yodo, que reacciona con el sulfuro (S^{2-}), se añade en cantidad conocida y en exceso. El exceso de yodo se determina mediante su reacción con tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$), utilizando almidón como indicador (si la solución se torna azul, indica la presencia de yodo en exceso; y, si es incolora, indica ausencia de yodo). La cantidad de sulfuro presente en la solución se calcula con base en la diferencia entre el total de yodo añadido y el exceso de yodo, este determinado por titulación con tiosulfato de sodio. Las reacciones químicas son las siguientes:

- $I_2 + KI \longrightarrow I_3K$ (el yodo con yoduro de potasio forma triyoduro de potasio)
- $I_3K + Na_2S \longrightarrow S + 2NaI + KI$ (reacción del yodo con sulfuro)
- I_3K (exceso) + $2Na_2S_2O_3 \longrightarrow Na_2S_4O_6 + KI + 2I_2Na$ (reacción del exceso de yodo con tiosulfato de sodio)

Preparación de soluciones:

-Yoduro de potasio (KI)/Yodo (I_2), 0.025N: Disolver, en 500 ml de agua, un poco más de 2.075g de yoduro de potasio (peso equivalente $166g \times 0.025/2$) y 1.588 g de yodo (peso equivalente $127g \times 0.025/2$). El pequeño exceso de yoduro de potasio se añade para asegurar que el yodo sea soluble en su totalidad.

-Tiosulfato de sodio pentahidratado ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$), 0.025 N: Disolver, en 500 ml de agua, 3.1 g de tiosulfato de sodio (peso equivalente $248g \times 0.025$).

-Almidón en agua (como indicador): Disolver unos gramos de almidón en agua caliente hasta saturar la solución. Filtrar la solución en caliente usando papel filtro. Luego de enfriarse, utilizar la solución filtrada.

Procedimiento:

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



- Tomar una muestra de 10 ml, previamente filtrada, y diluir a 100 ml con agua destilada (dilución de 1:10 o mas según se necesite para entrar en el rango de detección del método).
- Tomar 10 ml de la solución de yodo/yoduro en un frasco Erlenmeyer de 250 ml. Añadir 2 ml de HCl 6N y un par de gotas de solución de almidón como indicador (color azul en presencia de yodo).
- Mediante una pipeta, y con constante agitación, añadir 10mL de la muestra diluida (1:10) a la solución de yodo/yoduro (introducir la pipeta conteniendo la muestra de sulfuro por debajo de la superficie de la solución de yodo). Si desapareciera el color azul del yodo, añadir más solución de yodo/yoduro hasta que permanezca el color azul (indica que el yodo/yoduro está en exceso), midiendo, exactamente, el volumen total de la solución de yodo/yoduro (V_1) añadido.
- Titular la solución que contiene el exceso de yodo/yoduro, con un volumen de la solución de tiosulfato (V_2), hasta que se desaparezca el color azul (punto equivalente), si el color fuera ligeramente amarillo agregar más gotas de la solución de almidón.

Calcular la concentración de sulfuro en la descarga del baño del pelambre con la fórmula:

$$\text{Sulfuro, } S^{2-} \left[\frac{mg}{L} \right] = (V_1 * C_1 - V_2 * C_2) * 16000 * \frac{F}{V_m}$$

V_1 = volumen de solución del yodo/yoduro (ml).

C_1 = Normalidad de la solución yodo/yoduro (según la receta, $C=0.025$)

V_2 = Volumen de la solución de tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$), (según la formulación, $C=0.025$)



C_2 = Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$), (según la formulación, $C=0.025$)

F = Factor de dilución de la muestra (según la formulación 1:10, es decir $F=10$)

V_m = Volumen de la muestra (ml) (según la formulación, 10 ml de la descarga del baño de pelambre)

- **Análisis de sólidos en suspensión: 2540 Gravimetría**

La determinación de los sólidos totales permite estimar los contenidos de materias disueltas y suspendidas presentes en un agua. Para determinar la cantidad de sólidos totales presentes en las muestras de agua residual se realiza una medición cuantitativa del incremento de peso que experimenta un erlenmeyer previamente tarado tras la evaporación de una muestra de 1ml de agua y secado a peso constante a 103-105°C.

Para determinar sólidos disueltos en mg/L, por medio de un conductímetro se determina la conductividad del agua, para después convertir la conductividad en ppm TDS (Sólidos Disueltos Totales).

Para determinar los sólidos suspendidos sólo se realiza la diferencia de los sólidos totales con los sólidos disueltos.

- **Análisis de DBO₅: SM 5210 B Incubación y electrodo de membrana**

Principio: El método consiste en colocar un pequeño volumen de muestra, entre 1 y 10 ml, y llenar con agua que contiene nutrientes y ha sido previamente oxigenada durante 30 minutos, hasta rebosar, un frasco hermético de tamaño especificado, incubarlo a la temperatura de 20 °C durante 5 días. El oxígeno disuelto se mide antes y después de la incubación, y el DBO se calcula mediante la diferencia entre OD inicial y el final. Debido a que el OD se determina inmediatamente después de hacer la dilución, toda la captación de oxígeno, incluida la que ocurre durante los primeros 15 minutos, se incluye en la determinación del DBO.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

Materiales y reactivos:

- Botellas Winkler de incubación.
- Incubador para control de temperatura de 20 °C.
- Fosfato diácido de potasio, KH_2PO_4 : 8,5 g
- Agua destilada.
- Fosfato ácido dipotásico, K_2HPO_4 : 21,75 g
- Fosfato ácido disódico, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 33,4 g
- Cloruro de amonio, NH_4Cl : 1,7 g
- Sulfato de magnesio, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 22,5 g
- Cloruro de calcio, CaCl_2 : 27,5 g
- Cloruro férrico, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 0,25 g
- Ácido sulfúrico 1N
- Hidróxido de sodio 1N

Procedimiento:

Preparación de agua para dilución:

Solución amortiguadora de fosfatos: disolver 8,5 g de KH_2PO_4 ; 21,75 g de K_2HPO_4 ; 33,4 g de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 1,7 g de NH_4Cl en 500 ml de agua destilada y diluir a 1 litro. El pH debe ser 7,2 sin ajuste alguno.

Solución de sulfato de magnesio: disolver 22,5 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y diluir a 1 litro.

Solución de cloruro de calcio: disolver 27,5 g de CaCl_2 en agua destilada y diluir a 1 litro.

Solución de cloruro férrico: disolver 0,25 g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y diluir a 1 litro.

Solución de álcali y ácido sulfúrico 1N: para la neutralización de las muestras de los desechos cáusticos o ácidos.

Se agrega 1 ml de cada una de las cuatro primeras soluciones a 1 litro de agua destilada. Esta es el agua que se oxigena durante 30 minutos, con la que se llenan los frascos Winkler, después de adicionar entre 1 y 10 ml de muestra problema. Se deben hacer varias diluciones para la misma muestra de agua y cada una por duplicado. Se prepara un blanco sin muestra problema, sólo con agua de dilución.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Se determina el OD inicial.

Se incuba a 20°C durante 5 días.

Se determina el OD final.

Cálculo:

Cuando el agua de dilución no está sembrada

$$DOB_5 \text{ mg/l} = (D_1 - D_2) * \frac{V_1}{V_2}$$

Donde:

D₁: OD de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación, mg/l.

D₂: OD de la muestra diluida después de 5 días de la incubación a 20°C, mg/l

V₁: volumen del frasco Winkler

V₂: volumen de muestra

- **Análisis de DQO: 5220 C Reflujo cerrado**

Preparación de soluciones:

Solución de digestión de dicromato de potasio patrón 0,0167M: disolver 10,216 g de K₂Cr₂O₇ calidad reactivo primario en 500 ml de agua destilada, 167 ml de H₂SO₄ y 33,3 g de HgSO₄. Diluir a 1 litro.

Reactivo de H₂SO₄: Disolver proporcionalmente 5,5 g de Ag₂SO₄ en 1 kg de H₂SO₄ concentrado.

Solución patrón de DQO de ftalato ácido de potasio: disolver 425 mg de ftalato ácido de potasio en agua destilada y diluir a 1 litro. Este reactivo seco tiene un DQO teórico de 1,176 mg de O₂ por mg y esta solución tiene un DQO teórico de 500 mg O₂/ml. Es estable hasta 3 meses si se congela en ausencia de crecimiento biológico visible.

Preparación tubos de digestión para las muestras y para curva de calibración:

Tamaño tubo	Volumen	Solución de	Reactivo	Volumen total
-------------	---------	-------------	----------	---------------

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

de digestión	Muestra (ml)	digestión (ml)	H ₂ SO ₄ (ml)	final (ml)
16*100 mm	2,5	1,5	3,5	7,5
20*150 mm	5,0	3,0	7,0	15,0
25*150 mm	10,0	6,0	14,0	30,0
Ampollas 10 ml	2,5	1,5	3,5	7,5

Procedimiento:

Colocar la muestra en el tubo de digestión, adicionar la solución digestora y verter con cuidado la solución de ácido sulfúrico. Tapar bien los tubos y mezclar bien antes de aplicar calor para evitar calentamiento del fondo de los tubos y posible reacción explosiva. Para la curva de calibración preparar mínimo 5 patrones de la solución de ftalato ácido de potasio con DQO equivalentes que oscilen entre 20 y 900 mg/l diluyendo la solución patrón con agua destilada para obtener las concentraciones deseadas; utilizar los mismos tubos de digestión y las mismas proporciones de reactivos que se utilizan para el tratamiento de las muestras. Preparar también un blanco con agua destilada y con reactivos. Colocar los tubos en sistema de calentamiento previamente precalentado hasta que alcance la temperatura de 150 °C para realizar reflujo durante 2 horas. Enfriar a temperatura ambiente colocando los tubos en rejilla para tubos de ensayo.

Determinación de la absorbancia:

Invertir los tubos de la digestión varias veces y esperar que se depositen los sólidos antes de medir la absorbancia. Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a 600 nm.

Fundamentación para cálculos de DQO:

El cromo se reduce de estado hexavalente a trivalente. Ambas especies exhiben color y absorben luz en el rango visible del espectro. A 400 nm el ion dicromato absorbe mucha

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

luz y el ion crómico o cromo trivalente absorbe muy poco. A 600 nm el ion crómico absorbe bastante y el ion dicromato presenta absorbancia prácticamente nula. Este método cubre rangos de 0 a 15.000 mg/l de O₂:

420 nm: de 0 a 150 mg/l de O₂

600 nm: 0 a 15.000 mg/l de O₂

Cálculos a 600 nm:

$$DQO = \frac{\text{mg O}_2 \text{ en el volumen final}}{\text{volumen de muestra en ml}} * 1.000$$

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual.

Las aguas residuales mezcladas de los procesos de curtiembres fueron analizadas en los laboratorios de Tecno-parque Sena nodo Bogotá con base en los métodos estándar (SM): sulfuros (4500E Yodometría), cromo (3500B Espectrofotometría), sólidos suspendidos (2540 Gravimetría), DBO₅ (5210B Incubación y electrodo de membrana) y DQO (5220D Reflujo cerrado).

Se realizaron todos los análisis por triplicado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Promedios de los parámetros fisicoquímicos iniciales de las aguas mezcladas de curtiembres

Parámetro	Sulfuros mg/L	Cromo mg/L	DQO mg/L	DBO ₅ mg/L	Sólidos suspendidos mg/L
	214	680	10.600	4.500	4.750

Se observan los parámetros en concentraciones elevadas comparados con los límites permisibles con base en la resolución 0631 para vertimientos, que establece 3 mg/L como nivel máximo para sulfuros, 1,5 mg/L para cromo, 1.200 mg/L para DQO y 600 mg/L de DBO₅.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

2. Diseño experimental para evaluar la oxidación catalítica de sulfuros a pH 9 ajustado con hidróxido de sodio 3M.

Se dosificó oxígeno con un compresor en un tanque cerrado y para disminuir los olores generados en el proceso se conectó un ducto de salida para conducir los gases en exceso a un recipiente con soda cáustica 3M. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentración de sulfuros en medio básico (mg/l) en las aguas residuales mezcladas de curtiembres

Tiempo min	0	15	30	45	60
sulfuros mg/L	215	146	79	32	0
	213	145	81	31	0
	215	147	78	33	0
Promedio	214	145	79	32	0

Se suponía inicialmente que suministrar oxígeno a las aguas residuales mezcladas de los diferentes procesos de curtición mediante un compresor, se oxidarían los sulfuros contenidos en las aguas, produciendo sulfatos. Sin embargo, los sulfuros no fueron oxidados por suministro de oxígeno, sino que el suministro de oxígeno y la conexión de los gases de salida con solución de soda cáustica, ejercieron una función de arrastre de vapor o de gases de los sulfuros formándose sulfuro de sodio en la solución receptora de gases. Esto permitió liberar el contenido de sulfuros de las aguas residuales y obtener sulfuro de sodio que puede ser reutilizado en el proceso de pelambre de pieles.

A pesar de que este diseño experimental reportó buenos resultados respecto a la reducción de sulfuros, técnicamente se generan problemas por producción excesiva de espuma que rebosa los tanques e invade las tuberías de salida de los gases.

3. Diseño experimental para evaluar la recuperación de sulfuros en medio ácido con formación de sulfuro de sodio en solución de soda cáustica 3 M receptora de sulfuros

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

Cada ensayo fue realizado por duplicado. Los resultados de la concentración de sulfuro obtenida en función del tiempo, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentración de sulfuros (mg/l) en medio ácido en las aguas residuales mezcladas de curtiembres

pH	Réplicas y promedio	Tiempo (minutos)						
		0	15	30	45	60	75	90
2	Réplicas	213	80	22	0	0	0	0
		215	83	23	0	0	0	0
	Promedio	214,0	81,5	22,5	0	0	0	0
3	Réplicas	212	86	25	5	0	0	0
		213	87	27	6	0	0	0
	Promedio	212,5	86,5	26,0	5,5	0	0	0
4	Réplicas	218	91	29	8	0	0	0
		215	90	27	7	0	0	0
	Promedio	216,5	90,5	26,5	7,5	0	0	0
5	Réplicas	215	102	37	16	3	0	0
		213	100	34	14	2	0	0
	Promedio	214,0	101,0	35,5	13,0	2,5	0	0
6	Réplicas	213	112	46	22	6	1	0
		216	113	48	23	7	1	0
	Promedio	214,5	112,5	47,5	22,5	6,5	1,0	0

Se observa el contenido inicial de sulfuros en concentración elevada con promedio de 214 mg/L comparado con los límites permisibles con base en la resolución 0631 para vertimientos, que establece 3 mg/L como nivel máximo para vertimientos de curtiembres.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

De los resultados de este diseño experimental se observa que se alcanzó la extracción de sulfuros de las aguas residuales mezcladas de curtiembres para todos los valores de pH ácidos ensayados. Sin embargo a pH 2 se extraen completamente los sulfuros durante 45 minutos, mientras que a valores de pH menos ácidos se requiere más tiempo, necesitando 75 minutos para el mayor pH ensayado de 6. El ajuste de pH se realizó con ácido sulfúrico concentrado. La velocidad de agitación fue constante de 120 rpm.

Técnicamente este método es más apropiado que el de extracción de sulfuros en medio alcalino, debido a que en este caso no se genera espuma y no se perciben olores externos de sulfuro siempre y cuando el tanque de homogenización esté debidamente cerrado. La solución receptora de sulfuros debe tener un ducto de salida o puede estar abierta a la atmósfera porque se conecta un extractor para conducir los gases de ácido sulfhídrico hasta la solución de soda cáustica introduciendo el ducto dentro de la solución receptora y el exceso de aire debe tener salida. En este proceso no se perciben olores, lo que sugiere que la reacción entre el ácido sulfhídrico y el hidróxido de sodio es efectiva.

4. Diseño experimental para evaluar la sedimentación de la materia orgánica, después del tratamiento de extracción de sulfuros en medio ácido.

El agua libre de sulfuros, después del tratamiento a pH 2, 60 minutos y 120 rpm, se llevó por un ducto a un sedimentador graduado donde se precipita la materia orgánica. Se midió el volumen precipitado y se dividió entre el volumen total del contenido de agua y precipitado, para obtener el porcentaje en volumen de materia orgánica precipitada. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje en volumen de materia orgánica precipitada (%)

	Tiempo (minutos)			
	15	30	45	60
Réplicas	12,3	9,4	6,6	6,1
	12,4	9,7	6,7	6,5
Promedio	12,35	9,55	6,65	6,30

Durante el tratamiento en medio ácido para la extracción de sulfuros, la materia orgánica es parcialmente oxidada por acción del ácido sulfúrico, que puede degradar parte de los compuestos aromáticos.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Se observa que en un tiempo de 15 minutos se sedimenta la materia orgánica y que en los últimos 15 minutos de los ensayos, entre 45 y 60 minutos, la compactación es relativamente baja.

5. Diseño experimental para evaluar el porcentaje de hidróxido de cromo precipitado con hidróxido de sodio 3M a pH inicial 9.

El agua residual libre de sulfuros y después de precipitar el cromo, se pasa a un segundo sedimentador donde se dosifica hidróxido de sodio 3M y se ajusta el pH a 9. Se agita durante unos segundos para homogenizar y se deja en reposo para la precipitación del hidróxido de sodio. Se determinó el porcentaje en volumen de hidróxido de cromo obtenido en función del tiempo, respecto al volumen total del agua y el precipitado contenidos en el sedimentador. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Tabla 5. Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo precipitado (%)

	Tiempo (minutos)			
	15	30	45	60
Réplicas	86,0	62,5	46,0	32
	88,0	63,0	47,0	35
Promedio	87,0	62,8	47,5	33,5

Se observa que en 60 minutos se obtiene la mayor compactación ensayada para el precipitado de hidróxido de cromo. Sin embargo, se recomienda dejar sedimentar 2 horas para obtener aún mayor compactación de este.

El pH del agua sobrenadante es neutro, debido a que el exceso de hidroxilos suministrado por el hidróxido de sodio, es utilizado por el cromo para formar a su vez su propio hidróxido, si el pH inicial es ajustado aproximadamente a 9.

El hidróxido de cromo precipitado se puede reutilizar para el proceso de curtido por adición de ácido sulfúrico concentrado hasta ajustar pH 3,3-3,6 que es el requerido en los procesos de curtido. Se produce la sal sulfato básico de cromo, CrOHSO_4 que es la materia prima utilizada para el curtido de las pieles. Los resultados del estudio de la regeneración y reutilización del cromo pueden ser consultados en el siguiente video realizado por la autora de este trabajo:

<http://www.youtube.com/watch?v=8scejokLS-c>

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

6. Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada.

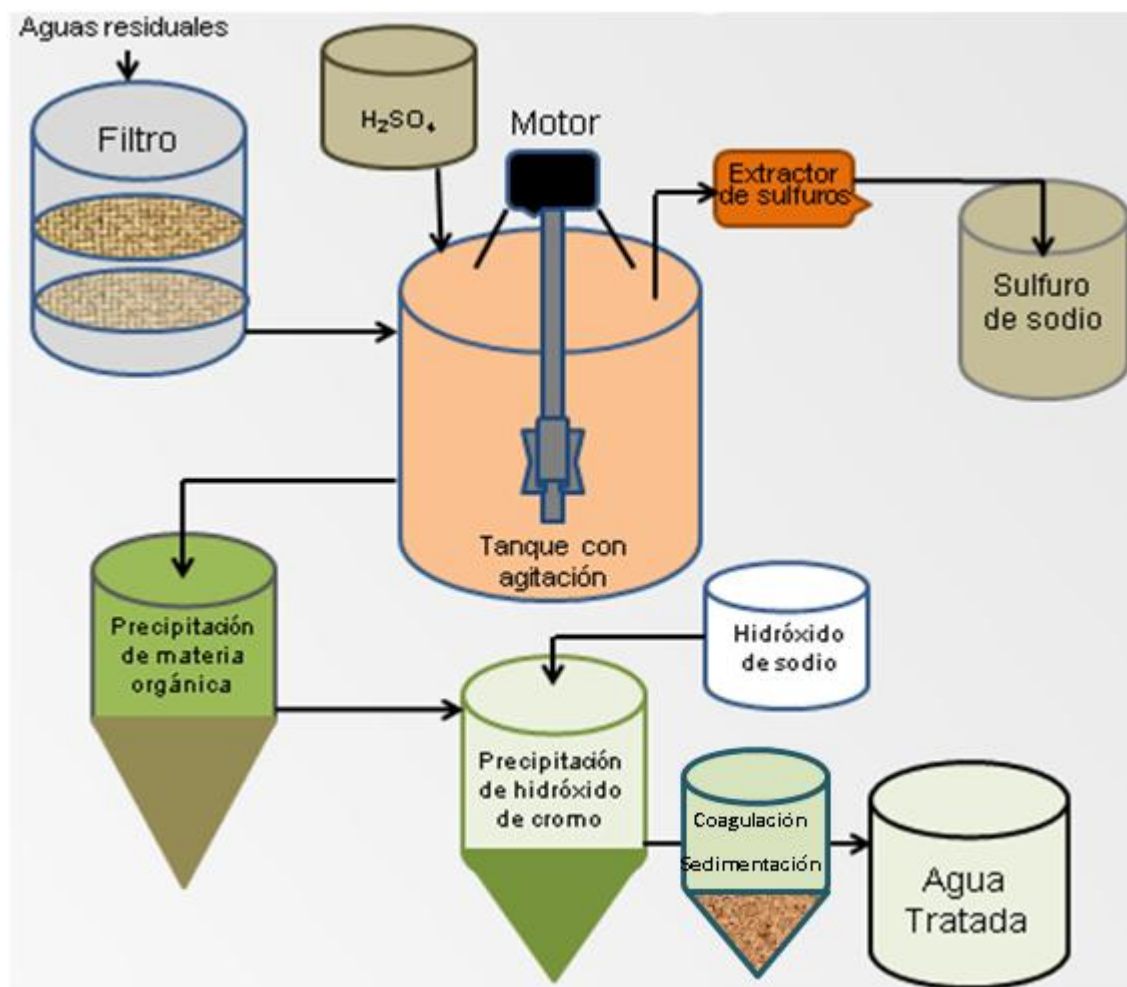
Al agua tratada a pH 2, tiempo de agitación 60 minutos y 120 rpm para la extracción de sulfuros, tiempo de sedimentación de materia orgánica 60 minutos y tiempo de precipitación de hidróxido de cromo 60 minutos, se le determinaron los parámetros concentración de sulfuros, cromo, DQO y DBO₅ en los laboratorios de Tecno-parque Sena nodo Bogotá. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Promedios de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada

Parámetro	Sulfuros mg/L	Cromo mg/L	DQO mg/L	DBO ₅ mg/L	Sólidos suspendidos mg/L	pH
	0	0,5	<1.200	<600	<20	7,0

7. Planta piloto requerida

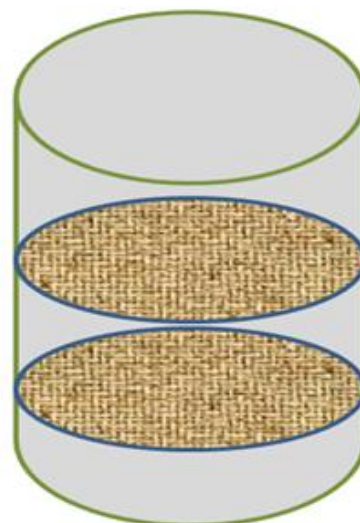
El esquema del proceso se muestra a continuación y algunos registros fotográficos:



Los sulfuros recuperados como sulfuro de sodio son reutilizados para el proceso del pelambre y el cromo recuperado se reutiliza en el proceso de curtido.

PROCESO DE FILTRACIÓN

Las aguas residuales se filtran a través de mallas de mayor a menor tamaño de orificio. Las mallas pueden ser de acero inoxidable o de polipropileno.



PROCESO DE EXTRACCIÓN Y RECUPERACIÓN DE SULFUROS

Recuperación de Sulfuros como sulfuro de sodio. Se reutiliza en el proceso de pelambre



Las aguas residuales filtradas pasan a un tanque de homogenización que contiene un agitador mecánico con sistemas de aspas. Se ajusta el pH en un rango de 2 a 3, para esto se dosifica un poco de ácido, que puede ser sulfúrico. Se agita durante 2 horas para extraer el ácido sulfhídrico formado que es recogido en una solución de hidróxido de sodio, donde se forma sulfuro de sodio que es la misma materia prima utilizada para el proceso del pelambre. De esta manera se extraen y recuperan los sulfuros para su reutilización en el proceso de pelambre.

¡ATENCIÓN! Cuidar que el tanque de homogenización permanezca con la tapa sellada y sin fugas para evitar escapes de gas tóxico de ácido sulfhídrico.

PRECIPITACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Durante el proceso de extracción de sulfuros, la materia orgánica se torna insoluble debido al pH ácido de la agua. Posteriormente el agua pasa a un sedimentador para separar la materia orgánica que precipita.

Decantación de la Materia Orgánica. A nivel industrial se requiere un sedimentador



La materia orgánica sedimenta en menos de 10 minutos. Sin embargo, se recomienda dejar en el sedimentador durante 2 horas para obtener mayor compactación de ésta

SEDIMENTACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA



Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

PRECIPITACIÓN DE CROMO COMO HIDRÓXIDO

El agua residual que contiene cromo, se pasa a un reactor sedimentador donde se dosifica hidróxido de sodio 3 M hasta ajustar pH en un rango de 9 a 10. Se requiere agitación con un motor conectado a un agitador con aspas. La agitación solamente se requiere por el tiempo en que se ajusta el pH. Después se deja el sistema en reposo, para permitir la sedimentación del hidróxido de cromo.

Agua tratada sobrenadante y sedimentación del hidróxido de cromo



Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

El cromo sedimenta en menos de 10 minutos. Sin embargo, se recomienda dejar en el sedimentador durante 2 horas para obtener mayor compactación de éste

SEDIMENTACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CROMO



Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



PLANTA REQUERIDA PARA UNA INDUSTRIA QUE PROCESA 500 PIELES MENSUALES

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Para curtir una piel se utilizan aproximadamente 1.000 litros de agua. Para una planta que procesa **500 pieles mensuales**, se requiere tratar 500 metros cúbicos de aguas residuales al mes. Esto representa un caudal aproximado de **0,8 L/s** operando **8 horas diarias**, durante **22 días al mes**.

EQUIPOS REQUERIDOS

TIEMPO DE RETENCIÓN EN CADA PROCESO: 2 HORAS.

VOLUMEN MÍNIMO DE CADA EQUIPO: 5.760 LITROS MÁS VOLUMEN EXCEDENTE PARA OPERACIONES DE AGITACIÓN Y ESPACIO LIBRE PARA EVITAR REBOSES.

MATERIAL DE LOS TANQUES Y SEDIMENTADORES: POLIÉSTER O POLIETILENO O POLIPROPILENO DE ALTA DENSIDAD.

EQUIPOS REQUERIDOS: FILTRACIÓN

TANQUE DE FILTRACIÓN DE 1000 LITROS CON 2 O 3 MALLAS DE MAYOR A MENOR TAMAÑO DE ORIFICIO DE 2 METROS CÚBICOS DEBIDO A QUE EL AGUA VA LLENANDO EL HOMOGENIZADOR SIMULTÁNEAMENTE CON LA FILTRACIÓN.

MALLAS 20 Y 50 CÓDIGO MESH (NÚMERO DE ORIFICIOS POR PULGADA LINEAL)

HOMOGENIZACIÓN Y EXTRACCIÓN DE SULFUROS

TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN DE 10 METROS CÚBICOS.

MOTOR DE 2 HP DE POTENCIA PARA SISTEMA DE AGITACIÓN CON ASPAS.

AGITADOR CON ASPAS Y EXTRACTOR.

TANQUE DOSIFICADOR DE ÁCIDO DE 20 LITROS.

TANQUE PARA RECUPERACIÓN DE SULFUROS DE 5 METROS CÚBICOS.

SEDIMENTACIÓN, PURIFICACIÓN Y COMPOSTAJE DE MATERIA ORGÁNICA

SEDIMENTADOR SIMPLE DE 7 METROS CÚBICOS PARA LA PRECIPITACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



SEDIMENTADOR DE 2 METROS CÚBICOS PARA DESORCIÓN DE CROMO DE LA MATERIA ORGÁNICA.

COAGULADOR SEDIMENTADOR DE 5 METROS CÚBICOS PARA PRECIPITACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA REMANENTE.

SEDIMENTADOR SIMPLE DE 7 METROS CÚBICOS PARA LA PRECIPITACIÓN DEL CROMO.

PRECIPITACIÓN Y REGENERACIÓN DE CROMO PARA SU REUTILIZACIÓN EN EL PROCESO DE CURTIDO:

TANQUE DE 5 METROS CÚBICOS PARA EL CROMO Y REGENERACIÓN DEL SULFATO BÁSICO DE CROMO QUE SE REUTILIZARÁ PARA EL PROCESO DE CURTIDO.

MOTOR DE 0.25 HP DE POTENCIA PARA SISTEMA DE AGITACIÓN CON ASPAS.

AGITADOR CON ASPAS.

TANQUE DOSIFICADOR DE SODA CÁUSTICA DE 50 LITROS.

CONECTORES, DUCTOS, VÁLVULAS, ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LOS SEDIMENTADORES EN ACERO INOXIDABLE

MATERIALES Y EQUIPOS REQUERIDOS

EQUIPO/MATERIAL
TANQUE FILTRACIÓN 2000 LITROS
MALLAS FILTRACIÓN
TANQUE HOMOGENIZACIÓN 10000 LITROS
MOTOR 2 HP Y AGITADOR CON ASPAS
COMPRESOR O EXTRACTOR SULFUROS ACERO INOX O PLÁSTICO ½ HP
TANQUE PLÁSTICO DOSIFICADOR DE ÁCIDO 20 LITROS
TANQUE PLÁSTICO DOSIFICADOR DE SOLUCIÓN DE SODA O DE CAL 20 LITROS
TANQUE PARA RECUPERACIÓN DE SULFUROS 5000 LITROS
SEDIMENTADOR DE MATERIA ORGÁNICA 7000 LITROS
SEDIMENTADOR PARA DESORCIÓN DE CROMO DE MAT ORG 2000 LITROS
SEDIMENTADOR DE CROMO 7000 LITROS
TANQUE PARA REGENERACIÓN Y OBTENCIÓN DE SAL DE CROMO 5000 LITROS
MOTOR 1/4 HP Y AGITADOR CON ASPAS
CONECTORES, DUCTOS, VÁLVULAS
TOTAL

Además se debe tener en cuenta la estructura requerida para generar los desniveles necesarios para cada proceso de la PTAR.

INSUMOS REQUERIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEZCLADAS DE CURTIEMBRES

ACIDO SULFÚRICO PARA EXTRACCIÓN DE SULFUROS:

Se recomienda ajustar el pH a 6 para que se genere ácido sulfhídrico que se extrae y recoge en solución de soda cáustica.

El ácido sulfúrico requerido para disminuir el pH desde un rango alcalino de las aguas residuales mezcladas de todos los procesos de una curtiembre hasta pH 6 es aproximadamente $1,5 \text{ L/m}^3$ de agua a tratar. La densidad del ácido sulfúrico concentrado es de $1,84 \text{ kg/m}^3$, entonces la masa de ácido sulfúrico requerido es:

$$\begin{aligned}
 \text{masa de ácido sulfúrico} &= \frac{1,5 \text{ litros de ácido}}{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{1,84 \text{ kg de ácido}}{\text{litro de ácido}} \\
 &= \frac{2,76 \text{ kg de ácido}}{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}}
 \end{aligned}$$

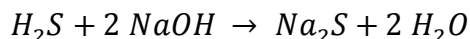
SODA CÁUSTICA O HIDRÓXIDO DE SODIO PARA RECIBIR LOS GASES DE ÁCIDO SULFHÍDRICO Y PRODUCIR SULFURO DE SODIO:

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Se obtienen en promedio 214 mg/L de sulfuros en las aguas residuales mezcladas de curtiembres. La reacción entre los gases de ácido sulfhídrico y soda cáustica es:



Por consiguiente la soda cáustica requerida es:

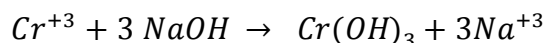
$$\begin{aligned} \text{masa de soda cáustica} &= \frac{214 \text{ gramos de sulfuro}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{2 * 40 \text{ gramos de NaOH}}{32 \text{ gramos de sulfuro}} \\ &= \frac{535 \text{ gramos de NaOH}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} \end{aligned}$$

Esto representa aproximadamente medio kilogramo de soda cáustica requerida por cada metro cúbico de agua a tratar para recibir los gases de ácido sulfhídrico.

Esta soda cáustica puede colocarse en una caneca de 200 litros disuelta en 100 litros de agua. Se puede colocar en los mismos 100 litros de agua en la caneca una cantidad mayor de soda cáustica para tratar mayores volúmenes de agua. Por ejemplo se pueden colocar en la caneca, disueltos en 100 litros de agua, 2 kilogramos y medio de soda cáustica para tratar 5 metros cúbicos de agua.

SODA CÁUSTICA O HIDRÓXIDO DE SODIO PARA PRECIPITAR EL CROMO DESPUÉS DE EXTRAER SULFUROS Y PRECIPITAR LA PRIMERA PARTE DE LA MATERIA ORGÁNICA:

El contenido promedio de cromo en las aguas residuales mezcladas de curtiembres es de 680 mg/L. La reacción química entre la soda cáustica y el cromo, para formar el precipitado de hidróxido de cromo es:



Entonces, la cantidad de hidróxido de sodio o soda cáustica requerida, tomando 20% de exceso hallado experimentalmente para ajustar pH, es:

$$\begin{aligned} \text{masa de soda cáustica} &= \frac{680 \text{ gramos de cromo}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{3 * 40 \text{ gramos de NaOH}}{52 \text{ gramos de cromo}} * 1,2 \\ &= \frac{1883 \text{ gramos de NaOH}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} = \frac{1,9 \text{ kg de NaOH}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} \end{aligned}$$

COAGULANTE:

FERRATO DE POTASIO, K_2FeO_4 , O CLORURO FÉRRICO, $FeCl_3$:

La cantidad se obtiene por prueba de jarras. Se recomienda utilizar entre 200 y 300 mg/L de uno de estos dos coagulantes a pH entre 5 y 6.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



La cantidad de coagulante requerida por metro cúbico de agua a tratar es:

$$\text{masa de coagulante} = \frac{300 \text{ gramos de coagulante}}{m^3 \text{ de agua a tratar}}$$

COADYUVANTE DE FLOCULACIÓN CATIÓNICO:

Para mejorar la formación del floc se recomienda utilizar entre 1 y 5 mg/L.

$$\text{masa de coadyuvante de floculación catiónico} = \frac{5 \text{ gramos de coadyuvante}}{m^3 \text{ de agua a tratar}}$$

SEGUNDO COAGULANTE:

POLICLORURO DE ALUMINIO:

La cantidad se obtiene por prueba de jarras. Se recomienda utilizar entre 20 y 50 mg/L de uno de este coagulante a pH entre 7 y 8.

La cantidad de coagulante requerida por metro cúbico de agua a tratar es:

$$\text{masa de coagulante} = \frac{50 \text{ gramos de coagulante}}{m^3 \text{ de agua a tratar}}$$

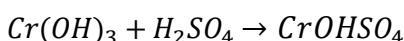
COADYUVANTE DE FLOCULACIÓN ANIÓNICO:

Para mejorar la formación del floc se recomienda utilizar entre 1 y 5 mg/L.

$$\text{masa de coadyuvante de floculación aniónico} = \frac{5 \text{ gramos de coadyuvante}}{m^3 \text{ de agua a tratar}}$$

ÁCIDO SULFÚRICO PARA REGENERAR Y REUTILIZAR CROMO PRECIPITADO:

El cromo precipitado como hidróxido se puede reutilizar en el proceso de curtido adicionando ácido sulfúrico concentrado, para obtener sulfato básico de cromo que es la sal utilizada para curtir las pieles, con base en la siguiente reacción:



La cantidad requerida de ácido sulfúrico es:

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.

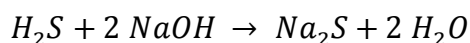
$$\begin{aligned} \text{masa de ácido sulfúrico} &= \frac{680 \text{ gramos de cromo}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{100 \text{ gramos de } H_2SO_4 \text{ del 98\%}}{52 \text{ gramos de cromo}} \\ &= \frac{1.307,7 \text{ gramos de } H_2SO_4 \text{ del 98\%}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} = \frac{1,3 \text{ kg de } H_2SO_4 \text{ del 98\%}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} \end{aligned}$$

INSUMOS REQUERIDOS EN LA PTAR POR CADA METRO CÚBICO DE AGUA A TRATAR

INSUMO	CANTIDAD
ÁCIDO SULFÚRICO PARA EXTRAER SULFUROS	2,76 Kg
SODA CÁUSTICA PARA REACCIONAR CON SULFUROS Y FORMAR SULFURO DE SODIO	0,5 Kg
SODA CÁUSTICA PARA PRECIPITAR CROMO	1,9 Kg
PRIMER COAGULANTE: CLORURO FÉRRICO O FERRATO DE POTASIO (UNO DE LOS DOS)	0,3 Kg
COADYUVANTE DE FLOCULACIÓN CATIÓNICO	5 gramos
SEGUNDO COAGULANTE: POLICLORURO DE ALUMINIO	50 gramos
COADYUVANTE DE FLOCULACIÓN ANIÓNICO	5 gramos
ÁCIDO SULFÚRICO PARA REGENERAR SAL DE CROMO PARA CURTIR	1,3 Kg

MATERIAS PRIMAS OBTENIDAS PARA REUTILIZAR**SULFURO DE SODIO:**

El sulfuro de sodio se produce con base en la reacción entre los gases de ácido sulfhídrico y soda cáustica:



Por consiguiente el sulfuro de sodio que puede reutilizarse para el proceso del pelambre de las pieles es:

$$\begin{aligned} \text{masa de sulfuro de sodio} &= \frac{214 \text{ gramos de sulfuro}}{m^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{78 \text{ gramos de } Na_2S}{32 \text{ gramos de sulfuro}} \\ &= \frac{521,6 \text{ gramos de } Na_2S}{m^3 \text{ de agua a tratar}} \end{aligned}$$

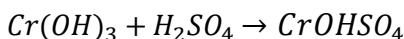
SAL DE CROMO OBTENIDA A PARTIR DEL CROMO PRECIPITADO:

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, ndiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



El cromo precipitado como hidróxido se puede reutilizar en el proceso de curtido adicionando ácido sulfúrico concentrado, para obtener sulfato básico de cromo que es la sal utilizada para curtir las pieles, con base en la siguiente reacción:



La cantidad de sal de cromo obtenida, sulfato básico de cromo, CrOHSO_4 que puede reutilizarse para el proceso del curtido de las pieles es:

$$\begin{aligned} \text{masa de sal de cromo} &= \frac{680 \text{ gramos de cromo}}{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}} * \frac{165 \text{ gramos de } \text{CrOHSO}_4}{52 \text{ gramos de cromo}} \\ &= \frac{2.157,7 \text{ gramos de } \text{CrOHSO}_4}{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}} = \frac{2,1 \text{ kg de } \text{CrOHSO}_4}{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}} \end{aligned}$$

MATERIAS PRIMAS OBTENIDAS PARA REUTILIZAR EN LOS PROCESO DE PELAMBRE Y CURTIDO DE LAS PIELES POR CADA METRO CÚBICO DE AGUA A TRATAR

PRODUCTO OBTENIDO	CANTIDAD
SULFURO DE SODIO	0,5 Kg
SAL DE CROMO SULFATO BÁSICO DE CROMO	2,1 Kg

BIBLIOGRAFÍA

Ortiz, Nidia. Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. Revista Luna Azul. ISSN 1909-2474. No. 40 pp. 117-126. 2015. Disponible en:
<http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=1003>

Ortiz, Nidia. Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales de curtiembres de San Benito, Bogotá. Revista Intekhnia. ISSN 1900-7612. Vol. 7 No. 2 pp. 143-161. 2013. Disponible en:
<http://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/intekhnia/article/view/452>

Ortiz, Nidia. Video: Tecnología para recuperar cromo y agua de vertimientos de curtiembres. Producción audiovisual departamento de Comunicaciones y Mercadeo Universidad Santo Tomás. 2013. Disponible en:
<http://www.youtube.com/watch?v=8scejokLS-c>

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.



Ortiz, Nidia. Guía para el fomento de la implementación de tecnologías limpias y el desarrollo sostenible en el sector de las industrias curtidoras. Ediciones Universidad San Tomás. ISBN 978-958-631-838-9. 2013.

Carrillo, Sergio; Muñoz, Cristian. Reutilización del agua residual de la operación de pelambre en el proceso productivo del cuero. Ingeniería Ambiental Universidad Santo Tomás. 2014.

Bello, Viviana. Tratamiento y reutilización del agua residual del proceso de desengale de curtiembres. Ingeniería Ambiental Universidad Santo Tomás. 2015.

Nidia Elena Ortiz Penagos: Ingeniera Química, MSc. Desarrollo sostenible y medio ambiente, nidiaortiz@usantotomas.edu.co, docente Facultad Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 51-11, Bogotá.

Grupo de Investigación INAM – USTA. Proyecto financiado por Universidad Santo Tomás, Tecno-parque Sena nodo Bogotá y Curtiembres Camelo. Fecha de inicio: abril 20 de 2016, fecha de finalización: noviembre 28 de 2016.