

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE BORRA DE CAFÉ PARA LA  
REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN EFLUENTES DE LA INDUSTRIA  
GALVANICA.

**Presentado por:**

ANGYE VANESSA BENAVIDES BARRERA

[Abenavi67910@universidadean.edu.co](mailto:Abenavi67910@universidadean.edu.co)

SEBASTIAN CAMILO BARRIOS RAMIREZ

[sbarrio62190@universidadean.edu.co](mailto:sbarrio62190@universidadean.edu.co)

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ D.C

COLOMBIA

DICIEMBRE 2024

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE BORRA DE CAFÉ PARA LA  
REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN EFLUENTES DE LA INDUSTRIA  
GALVANICA.

*UNA OPCIÓN SOSTENIBLE PARA REMOVER EL CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS  
RESIDUALES INDUSTRIALES COLOMBIANAS UTILIZANDO BIOADSORBENTES DE  
BAJO COSTO*

**Tesis para optar al título de:**

INGENIERIA QUÍMICA

**Presentado por:**

ANGYE VANESSA BENAVIDES BARRERA

[Abenavi67910@universidadean.edu.co](mailto:Abenavi67910@universidadean.edu.co)

SEBASTIAN CAMILO BARRIOS RAMIREZ

[sbarrio62190@universidadean.edu.co](mailto:sbarrio62190@universidadean.edu.co)

**Profesor:**

LINA MARÍA CHACÓN RIVERA

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ D.C

COLOMBIA

SEPTIEMBRE 2024

Contenido	
<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
Objetivo general:.....	7
Objetivos específicos:.....	7
<b>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>8</b>
Antecedentes: .....	8
Normatividad .....	9
Formulación del problema .....	11
Problema principal.....	11
Problemas Específicos .....	11
<b>JUSTIFICACIÓN:</b> .....	<b>12</b>
<b>ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS</b> .....	<b>13</b>
Diseño y Construcción:.....	14
<b>MARCO TEORICO</b> .....	<b>16</b>
<b>ANÁLISIS DE RESTRICCIONES</b> .....	<b>18</b>
<b>METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN</b> .....	<b>19</b>
<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b> .....	<b>34</b>
Análisis de viabilidad: .....	35
Propuesta de valor .....	36
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
<b>PLAN DE IMPLEMENTACIÓN</b> .....	<b>45</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>46</b>

## RESUMEN

La contaminación por cromo en los recursos hídricos de Bogotá, principalmente derivada de las industrias de recubrimientos y curtiembres, representa una grave amenaza para el

medio ambiente y la salud pública. Este metal pesado, utilizado en diversos procesos industriales, se libera al medio ambiente a través de aguas residuales, contaminando ríos, lagos y acuíferos. Ante esta problemática, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar una solución innovadora y sostenible mediante el uso de residuos agrícolas, específicamente la borra de café, para la remoción de cromo en aguas contaminadas.

La borra de café, un subproducto abundante en la ciudad y comúnmente desechado, ha demostrado poseer una alta capacidad de adsorción de metales pesados. A través del diseño de un filtro basado en este material, se espera alcanzar una eficiencia de remoción de cromo superior al 90%. Este desarrollo no solo implica un avance tecnológico, sino que ofrece una solución económicamente viable y sostenible para la industria, con beneficios como la protección de los recursos hídricos, la promoción de la economía circular y la reducción de costos en el tratamiento de aguas residuales.

Además de aprovechar materiales de bajo costo y fácil disponibilidad, este proyecto busca contribuir a la sostenibilidad ambiental y económica de la ciudad. No obstante, se reconocen desafíos como la optimización del proceso de regeneración del filtro y la evaluación a largo plazo de su rendimiento. A pesar de estas limitaciones, los resultados preliminares son prometedores y abren nuevas perspectivas para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados en Bogotá, con un potencial impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la salud pública.

## **ABSTRACT**

Chromium contamination in Bogotá's water resources, primarily caused by the coating and tanning industries, poses a serious threat to both the environment and public health. This heavy metal, widely used in various industrial processes to enhance material properties, is

released into the environment through wastewater, polluting rivers, lakes, and aquifers. In response to this issue, the present project aims to develop an innovative and sustainable solution by utilizing agricultural waste, specifically coffee grounds, to remove chromium from contaminated water.

Coffee grounds, an abundant byproduct in the city that is commonly discarded, have been shown to possess a high capacity for heavy metal adsorption. Through the design of a filter based on this material, it is expected to achieve a chromium removal efficiency of over 90%. This development not only represents a significant technological advancement, but also offers a cost-effective and sustainable solution for industry, with benefits such as protecting water resources, promoting the circular economy, and reducing wastewater treatment costs.

In addition to utilizing low-cost and readily available materials, this project seeks to contribute to the environmental and economic sustainability of the city. However, challenges such as optimizing the filter regeneration process and assessing its long-term performance are recognized. Despite these limitations, preliminary results are promising and open new avenues for the treatment of water contaminated with heavy metals in Bogotá, with potential positive impacts on both the environment and public health.

## **INTRODUCCIÓN**

El Cromo Hexavalente (Cr (VI)), es un contaminante altamente tóxico, móvil y cancerígeno que se encuentra comúnmente en aguas residuales industriales provenientes de varios sectores como: la metalurgia, el curtido de cueros y la galvanoplastia. A diferencia del Cr (III), que es menos tóxico y móvil, el (Cr (VI)) ha impulsado la evolución de mecanismos de resistencia en diversos organismos, incluyendo microorganismos y plantas. Estos

mecanismos, tales como biosorción, bioacumulación reducida, precipitación, reducción enzimática de (Cr (VI)) a (Cr (III)) y sistemas de eflujo, permiten a estos organismos sobrevivir en ambientes contaminados con cromo. La comprensión de estos procesos biológicos ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías de biorremediación, las cuales aprovechan la capacidad de los microorganismos y plantas para remover y estabilizar el (Cr (VI)) en suelos y aguas contaminadas.

En Colombia diversos estudios gubernamentales indican que la contaminación por (Cr (VI)), en Colombia es un problema persistente. Se realizaron experimentos de adsorción para evaluar la capacidad de remoción de (Cr (VI)) por parte de la borra de café. Los parámetros estudiados incluyeron el pH, la concentración inicial de (Cr (VI)), el tiempo de contacto y la dosis de adsorbente y se utilizaron técnicas de caracterización como espectroscopía infrarroja (FTIR).

Los resultados mostraron que la borra de café posee una alta capacidad de adsorción de (Cr (VI)), con eficiencias de remoción superiores al 95% bajo condiciones óptimas. La borra de café demostró una mayor capacidad de adsorción, atribuida a su mayor superficie específica y presencia de grupos funcionales activos. El pH óptimo para la adsorción fue de 2,0, y el equilibrio de adsorción se alcanzó en 60 minutos. Por este motivo se creó un filtro capaz de ayudarnos a la remoción del cromo hexavalente y para ello se recomienda la implementación del filtro a escala piloto para evaluar la viabilidad práctica de estos bioadsorbentes en sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales. La borra de café es un adsorbente efectivo y sostenible para la remoción de (Cr (VI)) del agua. Su uso no solo contribuye a la mitigación de la contaminación por metales pesados, sino que también promueve la valorización de residuos agroindustriales.

La presente investigación aborda la problemática de la contaminación por cromo hexavalente mediante una propuesta innovadora y sostenible. Se evaluó la capacidad de

adsorción de la borra de café como residuo agroindustrial de bajo costo y amplia disponibilidad. Los resultados obtenidos demuestran que este material, a través de mecanismos como el intercambio iónico y la formación de complejos, es altamente eficiente en la remoción de (Cr (VI)). En comparación con métodos tradicionales, como la precipitación química, esta técnica ofrece ventajas económicas y ambientales. Además, su implementación a gran escala podría generar empleos y reducir los costos de tratamiento de aguas, contribuyendo al desarrollo sostenible.

## **OBJETIVOS**

Objetivo general:

- Construir un filtro para remover cromo hexavalente de aguas residuales de la industria galvánica a partir de borra de café.

Objetivos específicos:

- Investigar las diferentes alternativas para remover el cromo hexavalente en aguas residuales industriales con residuos agrícolas bioadsorbentes de bajo costo.
- Desarrollar un filtro hecho a partir de borra de café para remover el cromo hexavalente
- Evaluar el rendimiento del filtro de borra de café estableciendo parámetros definidos a condiciones óptimas.
- Realizar un análisis de mercado para determinar la viabilidad del proyecto.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Antecedentes:

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

La producción industrial en Bogotá ha mostrado un crecimiento significativo. En 2022, la producción industrial en la ciudad creció un 22.8% en comparación con el año anterior. Las ventas reales de la industria en Bogotá crecieron un 23.8% entre enero de 2021 y enero de 2022. (DANE., 2024)

Este crecimiento refleja la recuperación y expansión de la actividad industrial en la ciudad, incluyendo el sector galvánico. El uso extendido de (Cr (VI)) en procesos industriales, como la galvanoplastia y el cromado, ha llevado a la liberación de este metal pesado a cuerpos de agua, suelos y sedimentos. La alta solubilidad y movilidad del (Cr (VI)) en el medio ambiente facilitan su dispersión y bioacumulación en la cadena trófica, representando un riesgo para la salud humana y la biodiversidad. Trabajadores de industrias como la galvanoplastia y poblaciones que residen en zonas adyacentes a estas instalaciones están expuestas a concentraciones elevadas de este potente carcinógeno. La inhalación de aerosoles o el contacto dérmico con compuestos de cromo hexavalente pueden inducir una serie de efectos adversos para la salud, incluyendo enfermedades respiratorias crónicas, dermatitis y un mayor riesgo de desarrollar cáncer pulmonar y otros tipos de neoplasias.

Los efluentes galvánicos contaminan ríos, lagos y acuíferos, afectando la calidad del agua y poniendo en riesgo la biodiversidad acuática. Los residuos sólidos y líquidos de las plantas galvánicas, al ser depositados en suelos o vertederos, contaminan los horizontes edáficos, reduciendo su capacidad de

uso agrícola y poniendo en riesgo la salud de las plantas y los organismos del suelo. La industria galvánica en Bogotá tiene un impacto significativo en la salud de las personas, las comunidades, el medio ambiente y los animales. La contaminación por cromo hexavalente es particularmente problemática debido a su alta toxicidad y capacidad para causar mutaciones y cáncer.

#### Normatividad

Derivado de esta situación, se construye un marco normativo que establece:

- **LEY 1333 DE 2009** “Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. "Esta ley proporciona un marco legal sólido para abordar la contaminación por cromo en Colombia. Al establecer un procedimiento claro para sancionar a los infractores, esta ley contribuye a proteger el medio ambiente y la salud de las personas.
- **RESOLUCIÓN 0883 DE 2018** “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones.”
- **RESOLUCIÓN 0889 de 2018** juega un papel fundamental en la protección de los ecosistemas marinos al establecer límites estrictos para la descarga de cromo y otros contaminantes. Al cumplir con esta normativa, se contribuye a garantizar la calidad del agua y la salud de los ecosistemas marinos.
- **DECRETO 3180 DE 2008** “Por la cual se adopta el formulario de registro de vertimientos en el Distrito Capital”.
- **DECRETO 3108 DE 2008** se complementa con la resolución 0883 de 2018 porque juega un papel importante en la gestión de este al exigir el registro detallado de los vertimientos. Esta información es fundamental para que las autoridades ambientales

puedan monitorear la calidad de las aguas y tomar las medidas necesarias para proteger el medio ambiente.

- **LEY 99 DE 1993** “por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.”

Proporcionando un marco legal general para la gestión y control de la contaminación en Colombia. Este marco legal es fundamental para garantizar la protección del medio ambiente y la salud humana frente a los riesgos asociados a la exposición al cromo.

- **LEY 253 DE 1996** “Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.”

Establecen un marco normativo sólido para garantizar que el cromo, al ser considerado un desecho peligroso, sea manejado de manera responsable y segura, minimizando así los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

- **DECRETO 1609 DE 2002** “Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.”

Establece un marco regulatorio que tiene una interacción directa con el manejo y transporte del cromo al tratarse de una sustancia peligrosa, se encuentra clasificado como mercancía peligrosa.

- **RESOLUCION 1362 DE 2007** “por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos.”

Esta resolución juega un papel fundamental en el control y seguimiento del cromo como residuo peligroso. Ya que exige un registro de los generadores y una

caracterización de los residuos que generan, de este modo se garantiza un manejo adecuado para el cromo, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública.

- **DECRETO 1076 DEL 2015** “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.

Establece un marco regulatorio completo que garantiza el manejo adecuado para el cromo hexavalente, desde su generación hasta su disposición final. Esto contribuye a proteger el medio ambiente y la salud pública.

### Formulación del problema

#### *Problema principal*

La contaminación por cromo hexavalente en las industrias galvánicas de Bogotá representa un grave problema ambiental y de salud pública. Este metal altamente tóxico, utilizado en los procesos de galvanizado, es liberado en los cuerpos de agua a través de los efluentes industriales, contaminando fuentes hídricas como el río Bogotá (Castiblanco & Perilla 2019). Para abordar esta problemática, las tecnologías de bioadsorción se presentan como una solución prometedora y sostenible. Estas tecnologías aprovechan la capacidad de diversos materiales biológicos, como biomasa de algas, cáscaras de frutas y bacterias, para capturar y retener el cromo hexavalente presente en el agua. La elección de la tecnología más adecuada depende de factores como la concentración inicial del contaminante, las características del efluente y el costo de implementación. Al ser una alternativa de bajo costo y alta eficiencia, la bioadsorción ofrece una vía viable para la descontaminación de aguas residuales industriales y la protección del medio ambiente.

#### *Problemas Específicos*

Las descargas industriales y mineras han convertido al río Bogotá y sus afluentes en focos de contaminación por cromo hexavalente. Este metal pesado, altamente soluble y móvil, se infiltra en acuíferos y suelos, poniendo en riesgo la salud humana y los ecosistemas. La complejidad y el costo de los procesos de remediación tradicionales limitan las opciones para descontaminar estas fuentes de agua. Ante este escenario, el uso de filtros innovadores, como aquellos que emplean borra de café como adsorbente, surge como una solución viable y sostenible. La borra de café, un residuo abundante y de bajo costo, presenta una alta capacidad para retener metales pesados, lo que la convierte en un material prometedor para el tratamiento de aguas contaminadas por cromo.

## **JUSTIFICACIÓN**

La contaminación por metales pesados, en particular el cromo hexavalente (Cr (VI)), en los cuerpos de agua representa una problemática ambiental de gran relevancia a nivel mundial. En el caso específico de la ciudad de Bogotá, las descargas industriales provenientes de sectores como el curtido de cueros y los recubrimientos metálicos han contribuido significativamente a la contaminación por Cr (VI) de los ríos y acuíferos locales (Ramírez-Rodríguez, 2023). Este metal pesado, debido a su alta toxicidad y movilidad en el medio ambiente, representa un grave riesgo para la salud humana y los ecosistemas acuáticos.

Ante esta problemática, la presente investigación propone una alternativa innovadora y sostenible para la remoción de Cr (VI) de aguas residuales industriales, basada en el aprovechamiento de materiales de bajo costo y alta disponibilidad como la borra de café. Estos residuos agroindustriales, ricos en compuestos orgánicos y con una alta superficie específica, han demostrado una notable capacidad de adsorción de metales pesados (Gupta et al., 2011).

La selección de estos materiales como adsorbentes se fundamenta en su carácter renovable y su potencial para reducir la huella ambiental asociada a la generación de residuos. Además, la modificación química de estos materiales podría mejorar aún más su capacidad de adsorción, lo que permitiría optimizar el proceso de remoción de Cr (VI) (Ho et al., 2000).

El desarrollo de un sistema de filtración basado en estos adsorbentes naturales permitiría alcanzar una alta eficiencia de remoción de Cr (VI), tal como se ha demostrado en estudios previos (Crini, 2006). Asimismo, este sistema podría ser escalado para su aplicación a nivel industrial, lo que representa una alternativa viable y económicamente atractiva a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales.

En este sentido, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de filtro para la remoción de Cr (VI) utilizando borra de café como adsorbente. A través de una serie de experimentos de laboratorio, se buscará determinar los parámetros óptimos de operación del sistema, tales como la dosis de adsorbente, el pH, el tiempo de contacto y la temperatura. Además, se evaluará la capacidad de regeneración del adsorbente y su reusabilidad en ciclos de adsorción-desorción.

Los resultados obtenidos en esta investigación permitirán evaluar la viabilidad técnica y económica de esta tecnología para su aplicación a escala real, contribuyendo así al desarrollo de soluciones sostenibles para la remediación de aguas contaminadas por metales pesados.

## **ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS**

Alcance de ingeniería

### *Diseño y Construcción:*

- Diseñar un filtro prototipo con dimensiones y materiales adecuados para el proceso de filtración.
- Seleccionar y caracterizar la borra de café como material adsorbente principal.
- Evaluar la influencia de variables como el tamaño de partícula de la borra de café, la velocidad de flujo y el pH en la eficiencia de remoción.
- Construir el prototipo del filtro, incluyendo sistemas de alimentación, colector y control de flujo.

### *Evaluación del Rendimiento:*

- Determinar la capacidad máxima de adsorción de cromo hexavalente por gramo de borra de café en condiciones óptimas.
- Analizar la influencia de la concentración inicial de cromo hexavalente en la eficiencia de remoción.
- Evaluar la regeneración del adsorbente y su reutilización en múltiples ciclos de adsorción-desorción.

### *Análisis Económico y Ambiental:*

- Realizar un análisis de costo-beneficio del sistema de filtración propuesto.
- Evaluar el impacto ambiental de la implementación de esta tecnología a escala industrial.
- Entregables
- Diseño detallado del filtro, incluyendo planos y diagramas.
- Prototipo funcional del filtro.
- Informe técnico con los resultados de las pruebas experimentales.
- Análisis económico y ambiental del proyecto.

- Manual de operación y tratamiento del filtro.

#### *Criterios de Aceptación*

- El filtro debe alcanzar una eficiencia de remoción de cromo hexavalente superior al 90%.
- El costo de operación y mantenimiento del filtro debe ser tener un precio competitivo en el mercado a comparación con las tecnologías convencionales.
- El filtro debe ser fácil de operar y mantener.
- El proceso de regeneración del adsorbente debe ser eficiente y económicamente viable.

#### *Restricciones*

- Presupuesto: Establecer un presupuesto máximo para el desarrollo del proyecto.
- Tiempo: Definir un plazo máximo para la finalización del proyecto.
- Materiales: Utilizar principalmente materiales de bajo costo y fácil adquisición.
- Normatividad: Cumplir con la normativa ambiental vigente.
- Alcance Excluido
- Estudios a gran escala de implementación del filtro en plantas industriales.
- Análisis detallado del ciclo de vida del producto.
- Desarrollo de un sistema de control automatizado para el filtro.
- Consideraciones Adicionales
- Escalabilidad: Evaluar la posibilidad de escalar el diseño del filtro para su aplicación en plantas industriales a mayor escala.
- Optimización: Continuar investigando y optimizando el proceso de adsorción y regeneración del adsorbente.
- Sinergias: Explorar la posibilidad de combinar la borra de café con otros materiales adsorbentes para mejorar el rendimiento del filtro.

## MARCO TEORICO

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados, como el cromo hexavalente (Cr (VI)), representa una seria amenaza para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Debido a su alta toxicidad y movilidad en el medio ambiente, se han desarrollado diversas tecnologías para su remoción. Entre ellas, la bioadsorción ha emergido como una alternativa prometedora debido a su bajo costo y eficiencia.

La composición química del café está compuesta principalmente por:

- Carbohidratos: 39-45.5%
- Proteínas: 10-11%
- Lípidos: 10-16%
- Ácidos clorogénicos: 2.7-3.1%
- Minerales: 4.2-4.4%
- Cafeína: 1.2-2.2%
- Trigonelina: 0.7-1%

La borra de café, un subproducto abundante de la industria cafetera ha demostrado ser un bioadsorbente eficaz para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas (Ahalya et al., 2010). Su estructura porosa y la presencia de grupos funcionales, como hidroxilos y carboxilos, le confieren una alta capacidad de adsorción. Estos grupos funcionales interactúan con los iones de Cr (VI) a través de mecanismos como el intercambio iónico y la formación de complejos (Zhang et al., 2011).

Diversos estudios han evaluado el efecto de diferentes parámetros en el proceso de adsorción, como el pH, el tiempo de contacto, la concentración inicial de Cr (VI) y la dosis

de biomasa (Kumar et al., 2001). Se ha encontrado que el pH es un factor crítico, ya que influye en la ionización de los grupos funcionales de la cáscara de café y en la especiación del Cr (VI) en solución.

Los modelos de isotermas de adsorción, como el de Langmuir y Freundlich, se han utilizado para describir la capacidad de adsorción de la cáscara de café. El modelo de Langmuir asume una monocapa de adsorción y una energía de adsorción constante, mientras que el modelo de Freundlich es más aplicable a sistemas heterogéneos y multicapa (Ho et al., 2000).

Una vez que el Cr (VI) es adsorbido en la cáscara de café, puede ser desorbido utilizando soluciones alcalinas o ácidos. La eficiencia de la desorción depende de varios factores, como el tipo de agente desorbente, la concentración y el tiempo de contacto (Gupta et al., 2011).

Los granos de café, un subproducto abundante de la industria cafetera, han demostrado ser un biosorbente eficaz para la remoción de metales pesados. Sin embargo, (Cuban et al., 2021). Propone una modificación innovadora: la magnetización de los granos de café. Esta modificación permite una fácil separación del adsorbente de la solución después del proceso de adsorción, utilizando campos magnéticos.

En este estudio, se caracterizaron los granos de café modificados magnéticamente mediante técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), el análisis BET y la resonancia de espín electrónico (ESR). Estas técnicas permiten evaluar la morfología, área superficial y propiedades magnéticas del material, respectivamente.

Un aspecto fundamental en el uso de bioadsorbentes es la posibilidad de regenerar el material y reutilizarlo en múltiples ciclos de adsorción-desorción. (Gómez et al., 2022). Evaluó la eficiencia de diferentes agentes eluyentes (HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y EDTA) para

desorber el Cr (III) y Cr (VI) adsorbidos en pulpa de café. Los resultados mostraron que el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) fue el agente desorbente más efectivo, logrando una desorción significativa tanto de Cr (III) como de Cr (VI).

La desorción es un proceso crucial, ya que permite recuperar el metal adsorbido y regenerar el bioadsorbente. Sin embargo, es necesario optimizar las condiciones de desorción para maximizar la eficiencia y minimizar la generación de residuos. Estudios futuros podrían explorar el efecto de variables como la concentración del agente desorbente, el tiempo de contacto y la temperatura en el proceso de desorción.

(Cubides & Ramírez., 2014). Realizó un estudio comparativo de la adsorción de Cr (VI) utilizando carbón activado comercial, carbón activado obtenido de residuos de café y residuos de café. Los resultados indicaron que el residuo de café mostró el mejor rendimiento de adsorción, con una remoción superior al 95%. Además, se observó que la adsorción seguía un modelo de isoterma de tipo Freundlich, sugiriendo una adsorción heterogénea en múltiples capas. La cinética de la adsorción fue de segundo orden con respecto a Cr (VI), lo que indica que el proceso de adsorción podría estar controlado por la quimisorción.

## **ANÁLISIS DE RESTRICCIONES**

Para la ejecución del proyecto se contempla afrontar una diversidad de problemas ambientales, económicos, sociales y salud y legales, en los cuales tenemos los siguientes:

- Problemas ambientales: La contaminación por cromo es una problemática que se presenta en la industria de curtiembre o la galvánica, siendo esta una contaminación directa no solo para los recursos hídricos, también en la cadena trófica en la ciudad de Bogotá. La contaminación por parte de la industria del café también representa

un gran problema ya que se desechan más de 108'000.000 toneladas al año de borra de café, siendo este un residuo que se puede utilizar en muchas industrias, por ejemplo: Tratamiento de aguas residuales, industria cosmética e industria agrícola.

- Problemas económicos: Al presentar una propuesta sostenible para remover cromo hexavalente en aguas residuales de la industria galvánica y de curtiembre, se precisa de una inversión inicial de 595 millones de pesos colombianos para implementar la idea a escala industrial y producir mensualmente 528 filtros, lo cual no solo puede representar un problema para la idea por falta de recursos e inversionistas, también por parte de la industria puede existir una preocupación económica al considerar las adaptaciones físicas en las plantas para la remoción del cromo hexavalente. Estos costos asociados como medida de remediación son altos y pueden generar resistencia por parte de aquellos que no están dispuestos o no pueden asumir dichos gastos.
- Problemas sociales y de salud: La falta de conciencia sobre los riesgos asociados con cromo hexavalente puede llevar a la desinformación en las comunidades. Esto puede resultar en una percepción errónea para no adoptar las medidas necesarias para su remoción, lo que dificulta la implementación de soluciones efectivas. La falta de participación y colaboración entre las partes interesadas, incluyendo comunidades, clientes, empresas y gobiernos, puede generar obstáculos en la implementación de soluciones. La falta de diálogo y cooperación puede dificultar la toma de decisiones y la implementación de acciones.
- Problemas legales: no cumplir con la normatividad vigente Colombia implica en las empresas fuertes multas o incluso en el cierre permanente de las empresas.

## **METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN**

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar y evaluar un filtro utilizando borra de café para la remoción de cromo hexavalente (Cr (VI)) de aguas residuales de la industria galvánica. Se llevaron a cabo experimentos de adsorción para determinar la capacidad de estos materiales como bioadsorbentes de bajo costo y alta disponibilidad.

Muestreo:

#### **1. Recolección de Borra de Café:**

Se recolectó borra de café de la cafetería de la Universidad Ean, ubicada en el cuarto piso del edificio Legacy. Se estima que se desechan aproximadamente 2.5 kg de borra de café por día, lo que equivale a 720 kg anuales. Estos residuos no están siendo aprovechados, generando un desecho orgánico que puede producir lixiviados y enfermedades en las comunidades cercanas, además de contribuir a la acumulación en los rellenos sanitarios.

#### **2. Recolección de Agua residual de baño de Cromo decorativo en Bycsa S.A:**

Bycsa es una compañía colombiana con más de 50 años de experiencia en la industria, pionera en la producción química para el sector metalmecánico y en desarrollos integrales para diversas industrias. Su tecnología se enfoca en la fabricación de productos ambientalmente sostenibles en áreas como galvanización, fosfatos, lubricantes industriales y automotrices, empaques (cling y stretch film) y productos especiales de desinfección. Además, importan y comercializan metales como níquel, cobre, plomo, zinc y latón, entre otros. Bycsa también ofrece plantas y equipos para el pretratamiento y tratamiento de superficies con pintura electrostática, y es representante exclusivo en Colombia de los equipos GEMA de Suiza. La empresa cuenta con un laboratorio en su planta de producción en Barbosa, Antioquia, y en Bogotá, complementado con unidades móviles para realizar pruebas en las instalaciones de los clientes. En el laboratorio de Bogotá, se

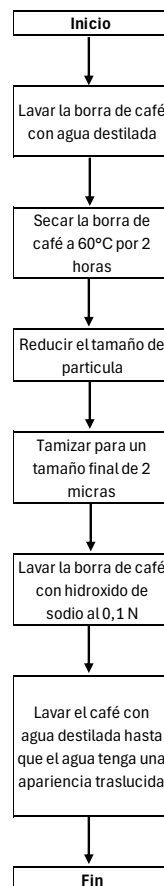
realizan análisis de muestras de cromo decorativo, cromo duro y Mordentado, generando residuos de baños galvánicos de cromo y aguas residuales contaminadas con cromo después de los enjuagues de las piezas metálicas. (Bycsa S.A,2024).

La muestra de agua residual contaminada con cromo fue recolectada en el laboratorio de Bycsa en Bogotá. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de remoción utilizando un filtro en las instalaciones de Bycsa. Durante el proceso, se tomaron muestras en intervalos de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora y 2 horas para evaluar la eficiencia del filtro a lo largo del tiempo.

## Preparación de Materiales:

### 1. Preparación de la borra de café:

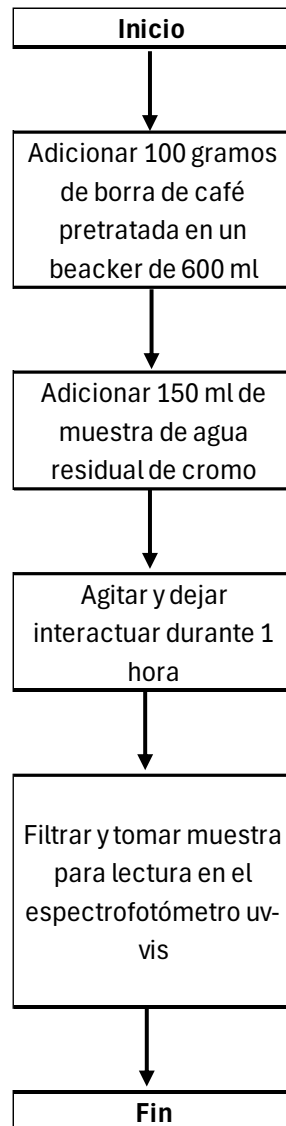
Figura 1. Pretratamiento de la Borra de café



Nota: Fuente Propia.

2. Contaminación de la borra de café con agua residual que contenía cromo.

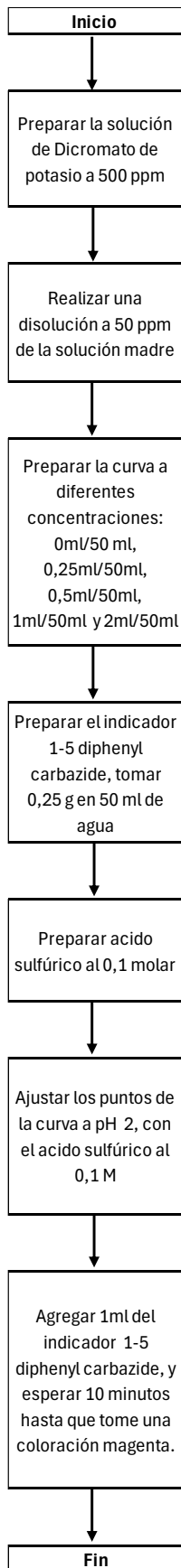
Figura 2. Contaminación de la borra.



Nota: Fuente Propia.

3. Curva de calibración para lectura en el espectrofotómetro UV-VIS.

Figura 3. Preparación de la curva.

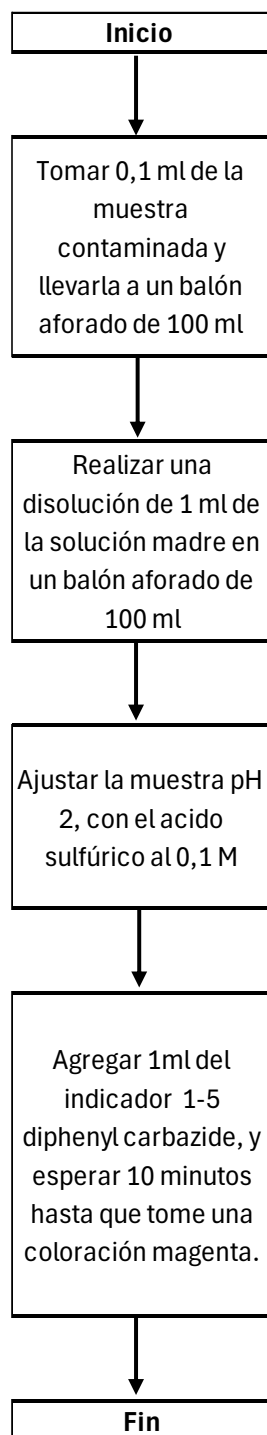


Nota: Fuente Propia.

Pruebas de adsorción:

4. Preparación de la muestra contaminada para lectura en el espectrofotómetro UV-VIS.

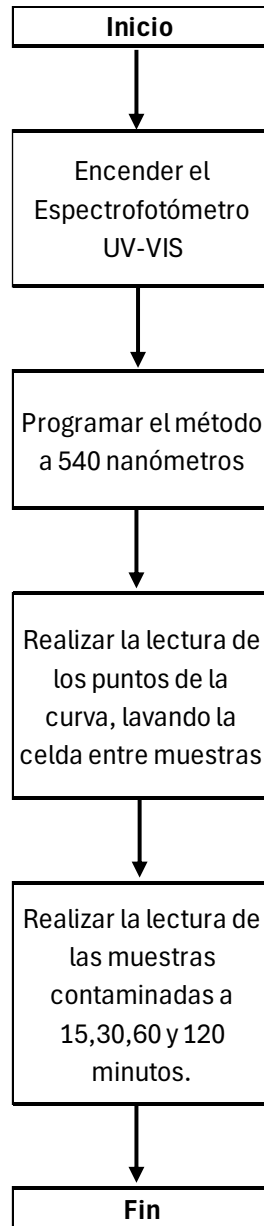
Figura 4. Preparación de la muestra para lectura.



Nota: Fuente Propia.

## 5. Lectura de los puntos de la curva y muestras en el espectrofotómetro UV-VIS

Figura 5. Lectura de las muestras.



Nota: Fuente Propia.

Diseño del filtro

Se diseño un filtro a escala industrial utilizando los siguientes materiales:

1. Cilindro de polipropileno ya que es resistente a una amplia gama de productos químicos y es adecuado para aplicaciones que requieren resistencia química y durabilidad.

2. Acero Inoxidable (304 y 316)

Utilizado en la carcasa del filtro ya que Ofrece una excelente resistencia a la corrosión, especialmente el acero inoxidable 316, que es más resistente a los ácidos y productos químicos agresivos en comparación con el 304. Sirve para asegurar la integridad estructural y la compatibilidad química.

3. Monofilamento de nylon es resistente a la abrasión y tiene una buena resistencia química. Es adecuado para aplicaciones donde se requiere una alta resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

La ventaja de utilizar estos materiales son la resistencia química en una amplia gama de productos químicos, incluyendo ácidos y bases. La durabilidad de estos materiales asegura que el filtro mantenga su integridad estructural y funcionalidad durante un período prolongado, incluso en condiciones operativas exigentes y la compatibilidad en donde la combinación de estos materiales permite que el filtro sea compatible con diversos tipos de fluidos y contaminantes.

4. Borra de café pretratada para mejorar su rendimiento en adsorción.

#### Análisis de datos

Se utilizó espectrofotometría UV-Vis para medir la concentración de Cr (VI) en las muestras y se calcularon las eficiencias de remoción y la capacidad de adsorción de los materiales.

#### Alternativa de solución

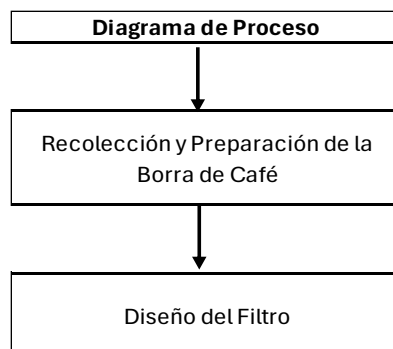
El desarrollo ingenieril propuesto consiste en diseñar y construir un filtro utilizando borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo hexavalente (Cr (VI)) de aguas

residuales procedentes de la industria galvánica. Este filtro se caracteriza por su alta eficiencia de adsorción, alcanzando una remoción superior al 95% bajo condiciones óptimas. El proceso incluye la selección y caracterización de la borra de café, la evaluación de variables críticas como el tamaño de partícula, el pH y la velocidad de flujo, y la construcción de un prototipo funcional con sistemas de alimentación y control de flujo. Además, se contempla la regeneración del adsorbente para su reutilización en múltiples ciclos, asegurando así la sostenibilidad y viabilidad económica del proyecto.

Desarrollar un filtro para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales es crucial por varias razones. Primero, aborda un problema ambiental significativo, ya que el cromo hexavalente es altamente tóxico y cancerígeno, afectando tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos. Segundo, el uso de borra de café como material adsorbente no solo es innovador, sino también sostenible y económico, aprovechando un residuo abundante y de bajo costo. Este enfoque promueve la economía circular y la valorización de residuos agroindustriales. Además, el diseño y construcción del filtro implican un proceso de ingeniería detallado que incluye la selección de materiales, la optimización de variables operativas y la evaluación de la eficiencia del sistema, asegurando así una solución efectiva y viable a largo plazo.

Diagrama de proceso

Figura 6. Diagrama de proceso del proyecto



Nota: Fuente Propia.

1. Recolección de la borra de café:

Recoger los residuos de borra de café generados por la universidad y utilizarlos para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales en BYCSA es una solución innovadora y sostenible para el proyecto de grado. Este enfoque no solo aprovecha un residuo abundante y de bajo costo, promoviendo la economía circular, sino que también contribuye significativamente a la mitigación de la

contaminación por metales pesados. Implementar esta tecnología en BYCSA permite reducir los costos asociados al tratamiento de aguas residuales, mejorar la calidad del agua y fomentar prácticas ambientales responsables. Además, esta solución refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y ofrece una oportunidad práctica para aplicar los conocimientos adquiridos en ingeniería química, beneficiando tanto a la comunidad universitaria como al medio ambiente.

Preparación de la borra de café:

La preparación de la borra de café es fundamental para garantizar la efectividad del proceso de adsorción de cromo hexavalente. En primer lugar, el secado de la borra de café elimina la humedad, previniendo la formación de moho y facilitando su manejo y almacenamiento. Este paso es crucial para mantener la integridad del material adsorbente. En segundo lugar, el triturado de la borra de café a partículas de tamaño uniforme aumenta significativamente la superficie específica disponible para la adsorción, lo que mejora la eficiencia del filtro. Además, la caracterización del material, que incluye el análisis de su superficie y la identificación de grupos funcionales, permite optimizar las condiciones de operación del filtro, como el pH y la velocidad de flujo. Estos ajustes son esenciales para maximizar la capacidad de adsorción de Cr (VI). En resumen, una preparación adecuada de la borra de café asegura que el material esté en las mejores condiciones para actuar como un bioadsorbente efectivo, garantizando así la eficiencia y sostenibilidad del proceso de tratamiento de aguas residuales.

Figura 7. Secado a 60°C por 2 horas de la borra de café



Nota. Fuente propia.

Figura 8. Reducción de tamaño de partícula



Nota. Fuente propia.

## 2. Diseño del filtro:

El diseño de un filtro como solución ingenieril es crucial para abordar problemas críticos de contaminación y calidad del agua de manera eficiente y sostenible.

Los filtros permiten la remoción de contaminantes específicos, como metales pesados, partículas y compuestos orgánicos, mejorando así la salud pública y protegiendo los ecosistemas. El desarrollo de filtros que utilizan materiales

reciclados o de bajo costo, puede reducir significativamente los costos operativos y de mantenimiento, haciendo que las soluciones de tratamiento de agua sean más accesibles y sostenibles.

- Materiales: Polipropileno (PP) Seleccionado por su resistencia química, durabilidad y bajo costo, el acero Inoxidable (304 o 316), utilizado para aplicaciones que requieren una mayor resistencia a la corrosión y durabilidad y el nylon, utilizado en la malla filtrante por su alta resistencia a la abrasión y estabilidad dimensional ya que la remoción del cromo.

- Dimensiones del cilindro interno:

Diámetro Interno:4 cm

Diámetro externo: 4.3 cm

Espesor:0.3 cm

Longitud:17.5 cm

Figura 9. Cilindro Externo.



Nota: Fuente propia.

Figura 10. Cilindro.



Nota. Fuente propia

- Malla de monofilamento de nylon

Espesor: 0.2 micras

Longitud: 4 metros

Altura: 1.7 metros

Figura 11. Monofilamento de Nylon.



Nota: Fuente Propia

- Ensamblaje del filtro:

Llenar el cilindro de polipropileno cerrado interno con el café pretratado, posterior a ello insertar en el cilindro abierto externo y luego colocar el sello hermético para asegurar el filtro y evitar el bypass de líquidos.

Figura 12. Producto terminado.



Nota: Fuente propia.

- Pruebas de validación:

Se tomaron muestras del agua residual después de su contacto con el filtro de borra de café en intervalos de 15, 30, 60 y 120 minutos. Posteriormente, se prepararon las muestras para su análisis mediante espectrofotometría UV-VIS. Se realizó un análisis detallado de los resultados para evaluar el rendimiento de adsorción del filtro y se verificó físicamente la interacción de los materiales bajo condiciones de agua residual tratada con un pH ácido.

Figura 13. Muestras a diferentes intervalos.



Nota. Fuente propia.

## ANÁLISIS DE COSTOS

La implementación del filtro de borra de café para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales de la industria galvánica a escala industrial implica una serie de costos fijos y variables. Los costos fijos incluyen la nómina, el alquiler de la bodega y los servicios públicos. Por otro lado, los costos variables abarcan las materias primas necesarias para la fabricación del filtro y el mantenimiento directo de los equipos utilizados. La distribución de estos costos se detalla a continuación:

- 70'500.000,00 utilizados para pagar la nómina de los empleados necesarios para la operación de la planta, distribuida de la siguiente manera:

Tabla 1. Tabla de costos fijos, nomina

NUMERO	PERFIL	SALARIO NOMINAL
1	OPERARIOS TECNICOS O TECNOLOGOS EN PROCESOS QUÍMICOS	\$ 1.300.000,00
1	CONTADOR	\$ 4.000.000,00
2	GERENTE	\$ 12.500.000,00
1	SECRETARIAS	\$ 1.300.000,00
1	INGENIERO DE MANTENIMIENTO	\$ 4.000.000,00
1	JEFE DE COMPRAS	\$ 4.000.000,00
2	VENTAS	\$ 2.400.000,00
1	SERVICIOS GENERALES	\$ 1.300.000,00

2	VIGILANCIA	\$ 2.000.000,00
---	------------	-----------------

Fuente: propia

- 10'000.000,00 utilizados para pagar el arriendo de la bodega, esta estará ubicada en el sector Niza Alhambra, Bogotá D.C. contando con 450 metros cuadrados.
- 1'440.000,00 utilizados para pagar todos los servicios públicos de la planta, siendo el más costoso el servicio de la luz con un consumo de 4095.52 kW al mes.
- 13'800.000,00 utilizados para comprar todas las materias primas para fabricar 528 unidades.
- 2'200.000,00 utilizados para el mantenimiento de los equipos, estos serán preventivos y se realizarán dos veces por año.

#### Análisis de viabilidad

La presente investigación se enfoca en la implementación de una estrategia de venta directa para un filtro innovador fabricado a partir de la borra de café. Este filtro será comercializado a un precio de 200.000 pesos colombianos, un valor cuidadosamente establecido para ser competitivo en el mercado actual. Los filtros predominantes en el mercado están fabricados mayoritariamente con carbón activo y presentan un rango de precios entre 120.000 y 280.000 pesos colombianos.

Al fabricar anualmente 6336 filtros de borra de café destinados a la remoción de cromo hexavalente y venderlos en su totalidad a un precio de 200,000 pesos colombianos, se espera generar ingresos por un total de 1.203'840.000 pesos colombianos. Los costos operativos asociados a esta producción ascienden a 1.119'377.516 pesos colombianos. Esto implica que, al lograr la venta completa de los 6336 filtros, se obtendrían ganancias netas de 84'462.484 pesos colombianos. Estas ganancias se invertirán en proyectos de

ingeniería y desarrollo con el objetivo de mejorar los procesos actuales e implementar una nueva línea de negocio centrada en los recubrimientos metálicos.

En el ámbito del mercado, competiremos con varias empresas consolidadas. Distriambiental es una de las principales empresas que se especializa en la fabricación de filtros con carbón activo, reconocidos por su alta calidad y durabilidad. Por otro lado, PureWater produce filtros de carbón activo en diferentes tamaños y formas, principalmente en cartuchos, lo que les ha permitido ocupar un nicho significativo en el mercado. Finalmente, Aquaboom se dedica a la fabricación de filtros con bloques de carbón de diferentes tamaños, destacándose por su capacidad de innovación y eficiencia en sus productos.

#### Propuesta de valor

La propuesta de valor de nuestra empresa radica en el uso de la borra de café, un recurso reciclado y ecológico, que no solo promueve la sostenibilidad, sino que también garantiza un rendimiento comparable al de los filtros tradicionales de carbón activo. Al utilizar un recurso renovable y abundante como la borra de café, no solo reducimos costos de producción, sino que también contribuimos a la reducción de residuos, alineándonos con las tendencias globales hacia la sostenibilidad y la economía circular. Este enfoque nos permite ofrecer un producto que no solo es eficiente, sino también ambientalmente responsable, diferenciándonos significativamente de nuestros competidores y fomentando una ventaja competitiva en el mercado.

La remoción del cromo hexavalente es fundamental para garantizar la salud humana y la protección del medio ambiente. Al eliminar esta sustancia tóxica de las aguas residuales provenientes de la industria galvánica, se previene un amplio rango de enfermedades y se conserva la biodiversidad. Sin embargo, la implementación de soluciones efectivas se enfrenta a diversos desafíos.

- La falta de conciencia sobre los riesgos del cromo hexavalente y la desinformación existente pueden generar una percepción errónea sobre la necesidad de tomar medidas. Además, las preocupaciones económicas y la falta de percepción de urgencia pueden obstaculizar la adopción de soluciones. Ante este panorama, se propone una solución innovadora y sostenible con el uso de filtros elaborados con borra de café para remover el cromo hexavalente de las aguas residuales provenientes de la industria galvánica, esta tecnología ofrece múltiples beneficios ya que es amigable con el medio ambiente al reutilizar un residuo como la borra de café, se reduce la generación de desechos y se promueve la economía circular y los beneficios para las empresas que adoptan esta tecnología.

Para garantizar la efectividad de esta solución, es necesario:

1. Capacitar a las empresas Brindando información detallada sobre el impacto ambiental del cromo y las ventajas de utilizar los filtros de borra de café.
2. Ofrecer análisis de cromo antes y después del tratamiento para verificar la eficiencia del proceso.
3. Informar a la comunidad sobre los riesgos del cromo hexavalente y las acciones que se están tomando para combatirlo.

El presente trabajo de grado se centra en satisfacer las necesidades de las empresas del sector galvánico mediante la introducción de filtros elaborados a partir de la borra de café para remover el cromo hexavalente, este innovador producto no solo promueve la sostenibilidad ambiental también aporta a la demanda creciente de prácticas industriales sostenibles que han impulsado la adopción de soluciones ecológicas.

Para la obtención de la borra de café, se estableció una alianza estratégica con la cafería de la universidad Ean, se plantea en un futuro establecer alianzas con empresas cafeteras como Juan Valdez, Oma y Tostao. Estos aliados suministrarán la borra de café el cual es el recurso clave en la fabricación de los filtros. Este enfoque colaborativo no solo favorece el reciclaje de residuos, sino que también fortalece la cadena de suministro, garantizando la disponibilidad constante de materiales de alta calidad para la producción.

La relación con el cliente se fundamenta en la venta directa del filtro, lo cual permite mantener una comunicación cercana y personalizada con los clientes. Los principales generadores de costos se derivan de la producción y distribución de los filtros, mientras que las fuentes de ingreso provienen exclusivamente de la venta de estos productos. Este modelo permite que la planta se enfoque en la excelencia operativa y en satisfacer las necesidades específicas de los consumidores del sector galvánico.

#### Anexo1. Costos Café

##### Análisis de sostenibilidad

##### *Ambiental*

La implementación de un filtro de remoción de cromo hexavalente utilizando borra de café presenta varios beneficios ambientales significativos. En primer lugar, la reutilización de la borra de café, un subproducto orgánico, contribuye a la reducción de residuos sólidos en vertederos, promoviendo una economía circular y disminuyendo la huella de carbono asociada con la gestión de desechos. Este enfoque no solo aprovecha un recurso abundante y de bajo costo, sino que también minimiza la necesidad de materiales vírgenes. Además, la eficiencia del filtro en la adsorción de cromo hexavalente se debe a las propiedades químicas y físicas de la borra de café, que incluyen una alta superficie específica y la presencia de grupos funcionales activos que facilitan la captura de

contaminantes. Este método de tratamiento de aguas residuales es particularmente eficaz en la reducción de concentraciones de cromo hexavalente, un contaminante altamente tóxico y carcinogénico, mejorando así la calidad del agua y protegiendo los ecosistemas acuáticos.

La utilización de borra de café para la creación de filtros de remoción de cromo hexavalente no solo ofrece una solución técnica viable y eficiente, sino que también promueve prácticas sostenibles y de bajo impacto ambiental, alineándose con los principios de la ingeniería ambiental y la gestión sostenible de recursos.

La presencia de cromo hexavalente (Cr (VI)) en los residuos de café plantea una problemática ambiental significativa debido a su alta toxicidad y persistencia en el medio ambiente. Su persistencia en suelos y cuerpos de agua agrava la situación, ya que puede permanecer activo durante décadas. Además, la gestión inadecuada de estos residuos puede resultar en la contaminación cruzada de otros materiales y áreas, exacerbando el problema ambiental. Por lo tanto, es crucial implementar estrategias efectivas para la disposición final de estos residuos, minimizando su impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública.

- Generación de residuos peligroso: La borra de café, cuando se deposita en vertederos o directamente en el suelo, puede descomponerse y liberar nutrientes en exceso, provocando la eutrofización de cuerpos de agua cercanos y alterando los ecosistemas. Además, puede atraer plagas como roedores e insectos, generando problemas de higiene y potenciales enfermedades. La descomposición también produce malos olores, afectando la calidad de vida de las comunidades vecinas. La disposición en rellenos sanitarios ocupa espacio valioso y contribuye a la saturación de estos sitios y a la generación de lixiviados contaminantes. La gestión

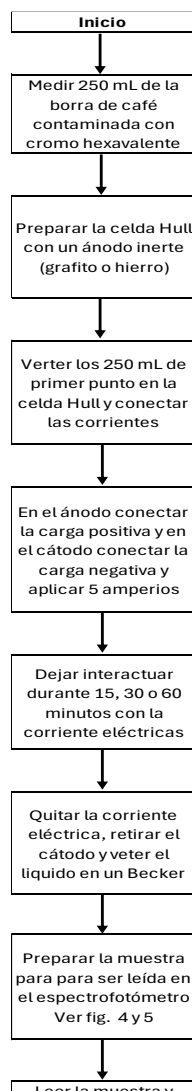
inadecuada de la borra de café no solo afecta al medio ambiente, sino también a la salud humana, ya que el polvo generado puede causar alergias respiratorias y, en lugares húmedos, puede convertirse en un criadero de bacterias y hongos. Sin embargo, la borra de café es un recurso valioso, rico en nutrientes como nitrógeno y fósforo, que puede ser aprovechado para mejorar la calidad del suelo mediante compostaje, producción de biocombustibles, productos cosméticos y otros materiales. Para minimizar los impactos negativos y aprovechar sus beneficios, es fundamental promover prácticas de gestión sostenible como el compostaje, la reutilización en jardinería y la producción de biogás. Además, la borra de café es un material sostenible y accesible con gran potencial como bioadsorbente de cromo hexavalente (Cr (VI)), siendo una solución económica y ecológica para la remediación de aguas contaminadas. No obstante, su uso implica riesgos si no se maneja adecuadamente, ya que la borra de café contaminada con Cr (VI) puede generar impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente, resultando en la bioacumulación del cromo en organismos y la alteración de la cadena trófica. Por ello, es crucial implementar métodos de tratamiento y disposición seguros para evitar que este bioadsorbente se convierta en una nueva fuente de contaminación. (Barrios., Benavides.,2024)

- Como alternativa de remediación ambiental ante dicho residuo peligroso se llevará a cabo un enfoque con resultado cualitativo para obtener datos experimentales medibles sobre la remoción de cromo hexavalente de la borra de café mediante electrodeposición. Se controlarán variables como pH, tiempo, amperaje y temperatura para determinar las condiciones óptimas de electrodeposición. La muestra de borra de café contaminada se colocará en

un vaso precipitado, y se prepararán los elementos necesarios para la electrodeposición del cromo en una pieza metálica, utilizando un ánodo inerte de grafito o metal y una celda Hull. Se aplicarán 5 amperios durante 15 minutos, 30 minutos y 60 minutos, conectando la corriente positiva al ánodo y la negativa a la pieza metálica, permitiendo que el cromo se electrodeposite en la pieza metálica. Posteriormente, la muestra se preparará para su análisis con un espectrómetro, determinando la absorbancia y calculando la concentración final de cromo.

- Metodología para la remoción de (Cr (VI)) presente en el café:

Figura 14. Diagrama de remoción (Cr (VI)) en café.



Fuente: (Barrios., Benavides.,2024)

Figura 15. Electrodeposición de cromo en lámina de hierro.



Fuente: (Barrios., Benavides.,2024)

### *Social*

La reutilización de la borra de café para la creación de filtros de remoción de cromo hexavalente contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono y ofrece beneficios sociales importantes. Al desviar estos residuos orgánicos de los vertederos, se disminuyen las emisiones de metano, un gas de efecto invernadero generado durante la descomposición anaeróbica. Además, el reciclaje de la borra de café reduce la necesidad de producir nuevos materiales, disminuyendo así el consumo de energía y las emisiones de carbono asociadas con la extracción y procesamiento de materias primas. Este enfoque también mejora la calidad del suelo a través del compostaje, promoviendo el crecimiento

de plantas que actúan como sumideros de carbono. Socialmente, la mejora de la calidad del agua mediante la eliminación de cromo hexavalente protege la salud pública y previene enfermedades, mientras que la creación de empleos en la producción y gestión de estos filtros impulsa la economía local. Este modelo educativo y de concienciación ambiental demuestra cómo los residuos pueden transformarse en recursos valiosos, fomentando una mayor responsabilidad ambiental en la comunidad.

Anexo 2. Video director nacional comercial de químicos en Bycsa.

## RESULTADOS

Se llevaron a cabo pruebas utilizando la bomba filtro Mefiag de tipo cartucho, proporcionada por la empresa Bycsa SA, con el objetivo de remover el cromo hexavalente presente en las aguas residuales industriales. Para ello, se introdujo el filtro en la bomba y se procedió a tomar muestras del agua tratada a intervalos de tiempo específicos: 15 minutos, 30 minutos, 60 minutos y 120 minutos. Los resultados obtenidos de estas pruebas se detallan a continuación:

Tabla 2. Tabla de resultados de remoción de cromo

MUESTRA INICIAL (g/L)	212	CONCENTRACIÓN (g/L)	% REMOCIÓN	CANTIDAD REMOVIDA
REMOCION DE CROMO	MUESTRA 15 MIN	10,18604	95,19526	201,81396
	MUESTRA 30 MIN	10,15256	95,21106	201,84744
	MUESTRA 60 MIN	10,13583	95,21895	201,86417
	MUESTRA 120 MIN	9,65043	95,44791	202,34957

Fuente: propia

Después de 15 minutos de funcionamiento, el filtro comienza a saturarse, lo que provoca una disminución en su eficiencia para remover el cromo hexavalente. Esto sugiere que, para lograr una remoción completa del 100% del cromo hexavalente, sería necesario implementar una serie de filtros en cascada. En las pruebas realizadas, se observó que una vez que se ha removido el 95% del cromo hexavalente utilizando la borra de café, es necesario desarmar el filtro para extraer la borra de café contaminada.

El material contaminado se someterá a un proceso de electrodeposición, que permitirá separar el cromo de la borra de café. Posteriormente, la borra de café purificada podrá ser utilizada como compostaje. Durante este proceso de remoción, se tomaron muestras a intervalos de tiempo específicos de 15 minutos, 30 minutos y 60 minutos para analizar la eficiencia del filtro en cada etapa. Los resultados obtenidos de estas muestras se detallan a continuación:

Tabla 3. Tabla de resultados de electrodeposición

	CONCENTRACIÓN (g/L)	% ELECTRODEPOSICIÓN	CANTIDAD REMOVIDA (g/L)	CONCENTRACIÓN FINAL (g/L)
MUESTRA 15 MIN	0,2475	99,8774	201,5665	0,2475
MUESTRA 30 MIN	0,1460	99,9277	201,7015	0,1460
MUESTRA 60 MIN	0,1614	99,9201	201,7028	0,1614

Fuente: propia

La electrodeposición logró remover más del 99.85% del cromo presente en la borra de café, depositándolo en un cátodo de sacrificio. Las variables controladas durante este proceso fueron cruciales para su éxito. En primer lugar, el pH se mantuvo por debajo de 2. La temperatura del proceso se estabilizó en 40 °C, y se aplicó un amperaje constante de 5. El tiempo de electrodeposición varió entre 15 y 60 minutos, ajustándose según los requerimientos de eficiencia para cada lote de muestras.

## **PLAN DE IMPLEMENTACIÓN**

Para comenzar, se realizará una serie de visitas exhaustivas a todas las empresas de cromado situadas en la ciudad de Bogotá. Estas visitas tienen como objetivo principal presentar y ofrecer el filtro de borra de café como una solución innovadora y ecológica para el tratamiento de las aguas residuales que se generan posteriormente a los baños de cromo (enjuagues). Durante las visitas, se explicará detalladamente el funcionamiento y los beneficios del filtro, destacando su capacidad para remover el cromo hexavalente de manera eficiente y sostenible.

El propósito de estas visitas no solo será demostrar la efectividad del filtro, sino también establecer una relación de confianza y colaboración con las cromadoras. Se planea realizar presentaciones técnicas y talleres demostrativos en los que se muestre el proceso de instalación y mantenimiento del filtro, así como los resultados de estudios y pruebas realizados previamente. Esta interacción permitirá a las empresas comprender mejor el valor añadido que representa este producto en términos de mejora de la calidad del agua tratada y reducción del impacto ambiental.

El objetivo final es persuadir a las cromadoras para que adopten este filtro innovador, lo que les permitirá realizar cambios en sus sistemas de tratamiento de aguas residuales con mayor frecuencia y eficiencia. Al implementar estos filtros, las empresas podrán mejorar significativamente la calidad final de sus procesos de cromado, asegurando un producto final más limpio y reduciendo los riesgos asociados al uso de cromo hexavalente. Además, se espera que la adopción de esta tecnología promueva una imagen de responsabilidad ambiental y sostenibilidad dentro del sector industrial.

## **CONCLUSIONES**

- Se logro construir un filtro a partir de borra de café para remover cromo hexavalente de las aguas residuales de la industria galvánica ha sido exitoso. La construcción del filtro ha demostrado ser efectiva, logrando remover una cantidad significativa de cromo hexavalente de las aguas residuales tratadas. Este logro no solo subraya la viabilidad técnica del filtro, sino también su potencial como una solución sostenible y económica para el tratamiento de contaminantes en la industria galvánica. El uso de borra de café, un subproducto abundante y de bajo costo, como material base para el filtro, destaca la innovación y el compromiso con la sostenibilidad ambiental. Este avance representa un paso importante hacia la adopción de prácticas más ecológicas en el sector industrial, promoviendo un enfoque más responsable y eficiente en el manejo de residuos tóxicos.
- 

## BIBLIOGRAFÍA

- Alaerts, G. J., Jitjaturunt, V., & Kelderman, P. (1989). Use of Coconut Shell-Based Activated Carbon for Chromium (VI) Removal. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/WST.1989.0148>
- Bajpai, S., Jung, G., & Dey, A. (2009). Batch studies on chromium removal from tannery effluent using cationic exchange resin. *Journal of Environmental Research and Development*.
- Casalegno, C., Schifanella, O., Zennaro, E., Marroncelli, S., & Briant, R. (2015). Collate literature data on toxicity of Chromium (Cr) and Nickel (Ni) in experimental animals and humans. *EFSA Supporting Publications*, 12(2), 478E.

- Cervantes Beyra, R., Castro-Lizazo, I., Mesa Pérez, M. A., Ocampo Ramírez, A., Fernández Valdés, D., & Fernández Valdés, D. (2015). Efecto de la pulpa de *Coffea arabica* L. sobre la microflora de tres unidades de suelos. *Revista de protección vegetal*, 30(2), 115-122.
- Desorption of Coffee Pulp Used as an Adsorbent Material for Cr(III and VI) Ions in Synthetic Wastewater: A Preliminary Study. *Molecules*, doi: 10.3390/molecules27072170
- Dora, Luz, Gómez-Aguilar., Javier, Andrés, Esteban-Muñoz., Juan, Pablo, Rodríguez-Miranda., Deisy, Baracaldo-Guzmán., Octavio, José, Salcedo-Parra. (2022). 19.
- Dessalew, Berihun. (2017). 4. Removal of Chromium from Industrial Wastewater by Adsorption Using Coffee Husk. *Journal of Material Sciences & Engineering*, doi: 10.4172/2169-0022.1000331
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2014). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water. *EFSA Journal*, 12(3), 3595.
- El-Taweel, Y. A., Nassef, E., Elkheriany, I., & Sayed, D. S. (2015). Removal of Cr(VI) ions from waste water by electrocoagulation using iron electrode. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2015.05.011>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - Dirección Investigaciones Económicas. (2024). Informe mensual. In *Federación Nacional De Cafeteros De Colombia - Dirección Investigaciones Económicas*. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2024/11/Informe-mensual-octubre-p.pdf>
- Geng, B., Jin, Z., Li, T., & Qi, X. (2009). Kinetics of hexavalent chromium removal

from water by chitosan-Fe<sub>0</sub> nanoparticles. *Chemosphere*.

<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2009.01.009>

- Hammou, A., Moussout, H., Slimani, M.-Y. S., Boukhlifi, F., & Daou, I. (2014). Bentonite/Chitosan Biocomposite as an Adsorbent for Hexavalent Chromium From Aqueous Solutions. *Journal of Advances in Chemistry*. <https://doi.org/10.24297/JAC.V10I6.883>
- Hamdan, S. S., & El-Naas, M. H. (2014). Characterization of the removal of Chromium(VI) from groundwater by electrocoagulation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2013.11.006>
- Jinling, Liu., Xiang-Rong, Xu., Yi-Yi, Yu., Qing, Hao., An-Na, Li., Sha, Li., Hua-Bin, Li. (2011). 14. Reduction and Removal of Hexavalent Chromium.
- Jurgita, Seniūnaitė., Rasa, Vaiškūnaitė., Violeta, Bolutienė. (2013). 5. Coffee grounds as an adsorbent for copper and lead removal form aqueous solutions. doi: 10.3846/ENVIRO.2014.052
- Kotas, J., & Stasicka, Z. (2000). Chromium occurrence in the environment and its toxicity. *Environmental Pollution*, 108(3), 139-158.
- Kabdaşlı, I., Arslan-Alaton, I., Ölmez-Hancı, T., & Tünay, O. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 2–45. <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>
- Liu, J., Zhang, X., You, S., Wu, Q., Chen, S., & Zhou, K. (2014). Cr(VI) removal and detoxification in constructed wetlands planted with *Leersia hexandra* Swartz. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.07.047>
- Mahmoud, A. E. D., & Mostafa, E. (2023). Nanofiltration Membranes for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions: Preparations and

Applications. *Membranes*, 13(9), 789. <https://doi.org/10.3390/membranes13090789>

- Matuk, V., Puerta, G. I., & Rodríguez, N. (1998). Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo de café.
- Mao, L. J., Wang, Y. Q., & Qiu, Y. R. (2013). Removal of Chromium from Aqueous Solution by Polymer Enhanced Ultrafiltration Using Copolymer of Maleic Acid and Acrylic Acid. *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.668.241>
- N, Ahalya., RD, Kanamadi., T., V., Ramachandra. (2010). 3. Removal of hexavalent chromium using coffee husk. *International Journal of Environment and Pollution*, doi: 10.1504/IJEP.2010.035917
- Núria, Fiol., Carlos, Escudero., Isabel, Villaescusa. (2008). 1. Re-use of Exhausted Ground Coffee Waste for Cr(VI) Sorption. *Separation Science and Technology*, doi: 10.1080/01496390701812418
- Oscar, Fabián, Higuera, Cobos., Luis, Carlos, Flórez, García., Juan, Felipe, Arroyave, Londoño. (2009). 10. Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café.. *Revista Ingenieria E Investigacion*,
- Parlayıcı, Ş., Yar, A., Avci, A., & Pehlivan, E. (2016). Removal of hexavalent chromium using polyacrylonitrile/titanium dioxide nanofiber membrane. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1077349>
- Pablo, Cubides, Guerrero., José, Herney, Ramírez, Franco. (1969). 20. Adsorción de Cr VI sobre residuos de café. *Mutis*, doi: 10.21789/22561498.953
- Resolución 1362 de 2007 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (s. f.). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=26053>
- Roman, M., & German, G. (2019). Efecto del beneficio húmedo centralizado del café (BHCC) en las propiedades físicas y químicas del suelo próximas a la planta en la

CAFE El Palomar.

- Srivastava, S., & Thakur, I. S. (2006). Biosorption potency of *Aspergillus niger* for removal of chromium (VI). *Current Microbiology*. <https://doi.org/10.1007/S00284-006-0103-9>
- Shi, T., Wang, Z., Liu, Y., Jia, S., & Changming, D. (2009). Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by D301, D314 and D354 anion-exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.04.041>
- Sevgi, Çoban., Ivo, Safarik., Adil, Denizli. (2021). Eliminación de metales pesados con granos de café magnéticos. *Revista Turca de Química*, 45(1):157-166. doi: 10.3906/KIM-2006-47
- Wilkinson, J. L., Boxall, A. B., Kolpin, D. W., Leung, K. M., Lai, R. W., Galbán-Malagón, C., ... & Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(8), e2113947119.
- Zhao, J., Zhang, X., He, X., Xiao, M., Zhang, W., & Lu, C. (2015). A super biosorbent from dendrimer poly(amidoamine)-grafted cellulose nanofibril aerogels for effective removal of Cr(VI). *Journal of Materials Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/C5TA03089G>