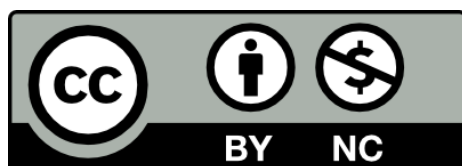


ADSORCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE PRESENTE EN AGUAS DEL RÍO BOGOTÁ
UTILIZANDO CÁSCARA DE CAFÉ



NATALIA ARRIETA RIVERA
CÉSAR AUGUSTO MARTÍNEZ JIMÉNEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2023

ADSORCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE PRESENTE EN AGUAS DEL RÍO BOGOTÁ
UTILIZANDO CÁSCARA DE CAFÉ

NATALIA ARRIETA RIVERA
CÉSAR AUGUSTO MARTÍNEZ JIMÉNEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director
JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO
Ingeniero ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2023

Autoridades Académicas

P. ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. MAURICIO ANDRÉS CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

FRAY RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Seccional Villavicencio

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental Seccional Villavicencio

Dedicatoria

Para mis 6 perros, mi motivación diaria, mi compañía durante todo este trabajo y para quienes siempre trabajaré duro. -N

Agradecimientos

A nuestras familias, por todo el apoyo brindado en nuestra carrera.

A la docente Angélica Bustamante, por instruirnos desde el momento cero e incitarnos a hacer de nuestro trabajo uno cada vez más completo.

A nuestro docente director, Jair Burgos, por su acompañamiento, paciencia y comprensión.

A Juan Pablo García, por el apoyo y acompañamiento que nos brindó mientras realizábamos el muestreo.

Tabla de contenido

Resumen..... 9

1. Introducción..... 11

2. Planteamiento del problema 13

3. Objetivos..... 15

 3.1 Objetivo general 15

 3.2 Objetivos específicos..... 15

4. Justificación 16

5. Alcance 18

6. Antecedentes..... 20

7. Marco de referencia 21

 7.1 Marco teórico 21

 7.2 Marco conceptual 22

 7.3 Marco legal..... 23

Nota: La normativa indicada en este documento corresponde a la normativa vigente para Colombia..... 24

8. Metodología..... 25

9. Resultados y análisis de resultados..... 32

10. Conclusiones 46

11. Recomendaciones 47

Referencias bibliográficas..... 48

Índice de tablas

Tabla 1: Normatividad asociada a la investigación. 24

Tabla 2: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo. 26

Tabla 3: Parámetros del agua..... 27

Tabla 4: Diseño experimental del análisis 29

Tabla 5: Rendimiento del carbón activado según el tamaño de partícula..... 32

Tabla 6: Resultados del análisis a las muestras. 34

Tabla 7: Resultados curva de calibración 38

Tabla 8: Resultados de las mediciones en el punto 1..... 39

Tabla 9: Resultados de las mediciones en el punto 2..... 40

Tabla 10: Resultados de las mediciones en el punto 3..... 40

Tabla 11: Resultados de la capacidad de adsorción por cada tamaño de partícula..... 42

Tabla 12: Datos para la construcción de la isoterma en el punto 1..... 43

Tabla 13: Datos para la construcción de la isoterma del punto 2. 43

Tabla 14: Datos para la construcción de la isoterma del punto 3. 43

Tabla 15: Valores de Q y constante de Langmuir para cada punto 44

Índice de figuras

Figura 1: Sitios de muestreo 19

Figura 2: Diagrama metodológico 25

Figura 3: Cáscara de café utilizada para la elaboración del carbón 33

Figura 4: Carbón activado en sus diferentes tamaños de partícula 33

Figura 5: Sitios de muestreo 34

Figura 6: pH vs concentración de Cr(VI) 35

Figura 7: Conductividad eléctrica vs concentración de Cr(VI) 35

Figura 8: Oxígeno disuelto vs concentración de Cr(VI) 36

Figura 9: Carbón en contacto con las muestras 37

Figura 10: Proceso de filtrado del carbón 37

Figura 11: Curva de Calibración de cromo hexavalente 38

Figura 12: Eficiencia de la remoción según el tamaño de las partículas del carbón activado 41

Figura 13: Capacidad de adsorción según el tamaño de partícula 42

Figura 14: Linealización de las Isotermas 44

Resumen

En este trabajo de grado, se evaluó la eficiencia del carbón activado hecho a partir de cáscara de café para eliminar el cromo hexavalente presente en el río Bogotá. También se investigó cómo el tamaño de las partículas de carbón afecta su capacidad de adsorción. Los pasos clave incluyeron la obtención de cáscaras de café, la activación con hidróxido de potasio, la carbonización, la molienda y la separación en tres tamaños de partículas (0.6 mm, 0.85 mm y 1 mm).

Luego, se tomaron muestras de agua del río Bogotá en 01 tres ubicaciones diferentes y se realizaron análisis fisicoquímicos. Todas las muestras estaban dentro de los límites permitidos. Se llevó a cabo un proceso de espectrofotometría UV-VIS antes y después de agregar el carbón activado a las muestras, utilizando un reactivo para el cromo hexavalente en rangos bajos.

Posteriormente, se construyeron isotermas de adsorción para evaluar el rendimiento del carbón activado en función de su tamaño de partícula. Los resultados fueron satisfactorios en general, ya que ningún tamaño de partícula tuvo una capacidad de adsorción por debajo del 60%. Se observó una relación directamente proporcional entre el tamaño de partícula y la capacidad de adsorción, siendo la partícula más grande (1 mm) la que tuvo la mayor capacidad de adsorción (75.42%), seguida por la partícula de tamaño medio (0.85 mm) con un 65.44%, y finalmente, la partícula más pequeña (0.65 mm) con un 60.57%.

Palabras clave: Café, adsorción, cromo hexavalente, biosorbente

Abstract

In this degree work, the efficiency of activated carbon made from coffee peel to eliminate hexavalent chromium present in the Bogotá River was evaluated. How the size of carbon particles affects their adsorption capacity was also investigated. The key steps include obtaining coffee husks, activation with potassium hydroxide, carbonization, grinding and separation into three particle sizes (0.6 mm, 0.85 mm and 1 mm).

Water samples were then taken from the Bogotá River at three different locations and physicochemical analyzes were performed. All samples were within permitted limits. A UV-VIS spectrophotometry process was carried out before and after adding the activated carbon to the samples, using a reagent for hexavalent chromium in low ranges.

Subsequently, adsorption isotherms were constructed to evaluate the performance of the activated carbon as a function of its particle size. The results were generally satisfactory, since no particle size had an adsorption capacity below 60%. A directly proportional relationship will be observed between the particle size and the adsorption capacity, with the largest particle (1 mm) being the one that had the highest adsorption capacity (75.42%), followed by the medium-sized particle (0.85 mm) with 65.44%, and finally, the smallest particle (0.65 mm) with 60.57%.

Keywords: Coffee, Adsorption, Hexavalent chromium, Bioadsorbent

1. Introducción

Los procesos industriales y las actividades económicas desempeñan un papel esencial en la sociedad contemporánea al brindar sustento a numerosas comunidades y promover el desarrollo económico (Palomino, 2017). Sin embargo, con frecuencia, estos procesos industriales también generan un impacto negativo en el entorno natural, alterando las propiedades físicas y químicas de los cuerpos de agua donde tienen lugar (Moreno, 2017).

Un ejemplo destacado de esta problemática se relaciona con la contaminación derivada de los vertimientos realizados por las curtiembres en el Río Bogotá (Rangel, 2015). Estas descargas directas de efluentes representan un desafío ambiental significativo, ya que afecta directamente a un recurso hídrico crucial para la población local, la cual puede llegar a ingerirla de forma indirecta si es utilizada para riego de cultivos. Y también cuenta con gran importancia para diversas industrias que dependen de él, así como flora y fauna de la zona (Cuesta, 2017).

Dentro de la lista de puntos con mayor concentración de curtiembres en Colombia, se hayan los municipios de Villapinzón y Chocontá, ubicados en el departamento de Cundinamarca, se estima que en el área entre ambos operan más de 100 curtiembres, de las cuales tan solo aproximadamente treinta cuentan con un registro legal (CAR Cundinamarca, 2019).

Uno de los principales contaminantes identificados en los puntos de vertimiento es el cromo hexavalente o Cr (VI), una sustancia altamente tóxica y carcinogénica producida en diferentes actividades industriales, entre las cuales se haya el curtido de cuero (Medina & Pozo, 2013). La exposición continua a esta sustancia conlleva riesgos considerables para la salud humana y el equilibrio ecológico de la región. Además, la acumulación de cromo hexavalente en el agua potable plantea una amenaza significativa para la salud pública.

Debido a las afectaciones causadas por este y otros contaminantes vinculados con el proceso de vertido en cuerpos hídricos, se han buscado estrategias que logren una minimización de las afectaciones generadas a las condiciones físico-químicas del recurso hídrico, principalmente por medio de técnicas para el tratamiento de vertimientos, entre estas se encuentran la desarrollada por Silva, F. & Erazo, R. (2022), la cual se trata de precipitación química, este es un proceso de tratamiento de aguas que implica la adición controlada de reactivos químicos a una solución acuosa para inducir la formación de sólidos insolubles, conocidos como precipitados. Uno de los usos importantes de la precipitación química es la remoción de iones de cromo hexavalente (Cr(VI)),

convirtiéndolo en la forma menos tóxica de cromo trivalente (Cr(III)) mediante la adición de reactivos como el hidróxido de sodio (NaOH) o el sulfuro de hidrógeno (H₂S).

También está la técnica de fotocatalisis, propuesta por Mera, J, et al, (2018). La propuesta se basa en evaluar las alternativas ambientales de para la bioadsorción de Cr(VI), en la fotocatalisis se utiliza luz ultravioleta junto con un catalizador para degradar el cromo hasta reducirlo a su forma trivalente (III).

Para este trabajo de grado se optó por otra estrategia, el uso de bioadsorbentes, esto debido a que se cuenta con amplia documentación que respaldan sus altos índices de rendimiento para la adsorción de metales pesados, entre ellos, el cromo hexavalente. Además de esto, al utilizar bioadsorbentes, se puede hacer aprovechamiento de un residuo orgánico para el tratamiento de aguas, en este caso siendo la cáscara de café. Si bien se han hecho estudios referentes a carbón activado a partir de borra o pulpa de café, no se ha realizado carbonización de la cáscara en si, y en ningún trabajo relacionado se ha estudiado como varía la adsorción dependiendo del tamaño de partícula, además de que se estaría aprovechando de café proveniente del departamento del Meta para el desarrollo de este trabajo. El objetivo de este trabajo es identificar el rendimiento del carbón activado elaborado a partir de cáscara de café para la adsorción de Cr(VI) en muestras de agua del río Bogotá, más concretamente entre los municipios de Villapinzón y Chocontá. Se hará un análisis en 3 tamaños de partícula del carbón activado (0.6 mm, 0.85 mm y 1 mm) para lograr identificar si el rendimiento aumenta dependiendo de si este tamaño es menor o mayor, este estudio será realizado en 3 puntos del tramo del río Bogotá entre los municipios anteriormente mencionados.

2. Planteamiento del problema

Debido a vertimientos realizados luego de diversos procesos industriales, se llega a perjudicar notoriamente el medioambiente a causa de afectaciones en las propiedades físico-químicas del cuerpo hídrico en el cual se haga esta actividad (González, 2019). Entre estos, existe el caso de los vertimientos realizados por curtiembres, donde a través de estas acciones se generan afectaciones directas a los afluentes aledaños, añadiendo una carga contaminante importante al cuerpo hídrico tomando en cuenta que estos vertimientos contienen generalmente piel, sangre, sales, sulfuros, cromo, entre una diversidad más de componentes (Cuesta, 2018). Dentro de las posibles causas de esta situación está el hecho de que se realice un mal seguimiento y haya una ausencia de capacitaciones sobre la realización de actividades industriales de una forma ecológicamente amigable dentro de la empresa o agente que esté realizando el vertimiento, así como también la falta de tecnologías para lograr una reducción de impactos ambientales durante los procesos industriales que deban ser realizados (López, N, 2018).

Entre las sustancias contaminantes vertidas en los procesos de curtiembres, una de las que llega a generar mayores afectaciones es el cromo, el cuál es utilizado para asegurar la duración del cuero con el tiempo (Teshome, 2015) Esta es una sustancia altamente peligrosa para los seres humanos debido a su dificultad para tratar ya que puede ser absorbida por las plantas y de igual modo puede ingresar al cuerpo humano por contacto, ingestión o inhalación. (Borda O. L, 2014), esto puede ocasionar daños severos a la salud humana que van desde tumores estomacales hasta cáncer de pulmón y senos paranasales. Todas estas enfermedades van ligadas a la exposición por actividades industriales, sin embargo, en los últimos años se ha notado una presencia de este material en el agua potable (Wise, 2019), la cual significa una exposición más directa y general al cromo, lo cual puede ocasionar un grave problema sanitario. El cromo (VI) o hexavalente es un contaminante particularmente nocivo para la salud tanto humana como sistémica, debido a su alta capacidad oxidante, y también a su gran presencia producto de actividades industriales, y como logra persistir tanto en organismos como en el ambiente, siendo gran causante de condiciones carcinogénicas y mutagénicas (Patiño J. 2016).

La cuenca alta del Río Bogotá contiene niveles altos de metales pesados, sin embargo, se ha logrado evidenciar que sus aguas se utilizan para el riego de diferentes cultivos, principalmente hortalizas (Pinzón, 2019). Mediante el consumo de estos alimentos, dichos metales se bioacumulan

en el organismo humano, lo cual puede representar grandes problemáticas de salud debido a la alteración de los procesos biológicos y químicos de los organismos. (Londoño et al., 2016). Concretamente, en la zona entre Villapinzón y Chocontá existen más de 100 curtiembres de las cuales sólo 30 se encuentran registradas de manera legal (CAR, 2019), la operación indiscriminada y sin monitoreo de todas estas empresas contribuye de manera significativa a la contaminación del Río Bogotá, ya que los vertimientos son realizados directamente al agua sin ningún tipo de tratamiento, lo cual representa una gran problemática debido a que muchas comunidades se abastecen de este río, de igual forma muchas industrias realizan la captación de este para la fabricación de insumos, por tanto, si no se realiza un proceso de tratamiento que ayude a eliminar el cromo introducido por las curtiembres, se puede contribuir a una acelerada acumulación de este metal en los organismos y hacer parte del problema sanitario mencionado con anterioridad (Semana, 2017).

Una vez identificada la problemática de la zona, surge la pregunta problema y a su vez las respectivas hipótesis para la investigación: ¿Cuán eficiente es el carbón activado elaborado a partir de cáscara de café para la adsorción de cromo hexavalente presente en el río Bogotá, y cómo esta eficiencia se relaciona según el tamaño de partícula del carbón?

2.1. Hipótesis de la investigación

H₀= Ninguno de los tamaños de partículas elaboradas a partir de cáscara de café funciona como bioadsorbente de cromo hexavalente en muestras de aguas residuales del Río Bogotá tomadas del tramo del río Bogotá.

H₁=Al menos uno de los tamaños de partículas elaborados a partir de la cáscara de café adsorbe el cromo hexavalente presente en muestras de aguas residuales del Río Bogotá.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de adsorción de cromo hexavalente presente en aguas del Río Bogotá que posee el carbón activado elaborado a partir de la cáscara de café, de 3 diferentes tamaños de partículas.

3.2 Objetivos específicos

- Obtener a partir de la cáscara de café tres diferentes tamaños de partículas de carbón activado
- Determinar mediante el modelo de Langmuir la capacidad de adsorción de cromo hexavalente que poseen los diferentes tamaños de partículas elaborados a partir de la cáscara de café.
- Identificar mediante Isotermas de adsorción el comportamiento que posee el carbón activado elaborado con respecto a la adsorción de cromo hexavalente

4. Justificación

Debido a las altas cargas de contaminantes presentes en los vertimientos de empresas de curtido en las aguas del río Bogotá, es pertinente buscar alternativas de mitigación y control para los niveles de metales pesados que son liberados al río y realizarlos directamente en la fuente productora para así mitigar también el daño ecosistémico que estos pueden ocasionar.

Colombia es un país caficultor, y en este proceso productivo se generan diferentes tipos de residuos, los cuales representan el 95% del peso del fruto, y el resto son comúnmente desechados (Cortés et al., 2020), entre ellos la cáscara del café, la cual según bioensayos realizados para evaluar la adsorción de metales pesados ha mostrado tener una eficiencia de al menos el 90% (Carvajal & Marulanda, 2020). Mediante este residuo, se puede elaborar un bioadsorbente que permita reducir las concentraciones de cromo hexavalente en los efluentes de estas curtiembres. Se escogió el uso de carbón activado como bioadsorbente de mi por medio de carbón activado como técnica de tratamiento de vertimientos debido a que es un método con una cantidad de documentos relacionados bastante amplia, gracias a esto pudieron evidenciarse diferentes resultados de estudios de adsorción para tener una base en cuanto a funcionalidad. Además, existe una alta versatilidad en esta técnica, en cuanto a las opciones que se pueden elegir al momento de escoger la materia prima para la elaboración del carbón, cómo lo pueden ser café, yuca, plátano, entre otros (Acosta et al, 2017).

Teniendo en cuenta esto, la implementación de este bioadsorbente no sólo implica un mejoramiento en las condiciones de cuerpos hídricos, sino también que elementos como la cáscara de café podrían tener un valor comercial en el mercado para la fabricación del carbón, por lo cual se estaría generando aprovechamiento y un ingreso extra a partir de estos residuos. Se realizó una activación química del carbón, esta luego de carbonizar la cáscara de café, y dejarla en contacto con hidróxido de potasio (KOH). Se consideró importante el estudio de diferentes tamaños de partícula de carbón activado debido a que se pueden evaluar efectos significativos en su capacidad de adsorción. El estudiar varios tamaños permite determinar cuál de ellos ofrece el mejor rendimiento en términos de adsorción de contaminantes, en este caso siendo Cr(VI). Esto puede ser crucial para garantizar que se esté utilizando el material más eficiente en una aplicación particular.

En esta investigación se va a hacer uso de cáscaras de café orgánico de tipo arábico proveniente de la Orinoquia colombiana, específicamente en el sector de Puente Abadía en el municipio de Villavicencio. Por medio de este se buscará relacionar cómo el uso de diferentes tamaños de partículas del café carbonizado puede llegar a afectar la eficiencia de adsorción de contaminantes, centrándonos en este caso en cromo hexavalente, también se buscará lograr identificar qué tamaño de partícula presenta una tasa de remoción más alta y dejar esta información accesible de forma investigativa para quién desee conocer sobre el tema o para futuros proyectos relacionados.

5. Alcance

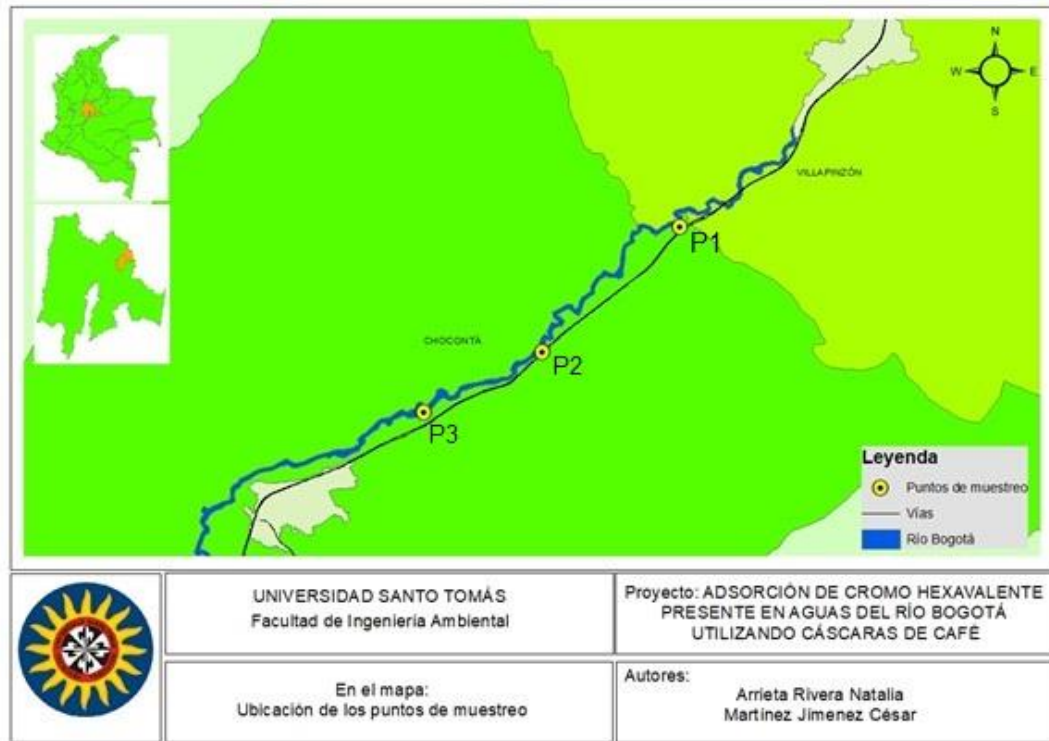
En este proyecto se realizó el estudio de la eficiencia de remoción de cromo hexavalente mediante la técnica de bioadsorción, realizada a partir de cáscara de café a escala de laboratorio. Los granos de café utilizados en el desarrollo experimental fueron obtenidos en plantaciones de fincas ubicadas en el sector de Puente Abadía, en el municipio de Villavicencio, Meta. Los procesos de carbonización de cáscara de café por medio de mufla, uso y obtención de resultados de espectrofotometría UV-VIS, así como la activación de carbón por medio de hidróxido de potasio (KOH) fueron realizados en el espacio de laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio desde el mes de julio del presente año 2023.

El área de estudio para este proyecto abarcó un tramo del río Bogotá de aproximadamente 12 kilómetros entre los municipios de Villapinzón y Chocontá (Ver figura 1) en el departamento de Cundinamarca, más concretamente desde el punto con latitud $5^{\circ}12'30''$ N y longitud $73^{\circ}36'12''$ O hasta el punto con latitud $5^{\circ}9'31''$ N y longitud $73^{\circ}40'12''$ O. La toma de muestras fue realizada el día 14 de agosto del año 2023. Las muestras de agua tomadas en 3 puntos dentro del tramo contaban con un tiempo máximo de refrigeración de 24 horas, esto para evitar cambios en la composición fisicoquímica y concretamente, los niveles de cromo hexavalente registrados y así lograr tener un valor representativo.

Se tomó como base que ya se ha comprobado que el carbón activado es útil para el tratamiento de aguas (Grisales et al, 2016), por lo que no se planeó hacer un análisis para verificar su funcionamiento, en cambio se evaluó el porcentaje de remoción en sí que posee el carbón elaborado a partir de cáscara de café, del mismo modo que buscar hallar una relación entre la capacidad de adsorción previamente mencionada y como varía dependiendo del tamaño de partícula que posea el carbón activado. Esto para plantear un tamaño de partícula de mayor eficiencia y poder ofrecer esta información tanto a empresas corporaciones o empresas que busquen una reducción en sus cargas contaminantes y también para brindar información de estudio a cualquiera que tenga interés en temáticas como la bioadsorción de contaminantes.

Figura 1

Sitios de muestreo



Nota: Mapa de la ubicación de los puntos de muestreo en un trayecto de 12 km.

6. Antecedentes

En 2018, Manrique E., realizó un trabajo enfocado en filtros para la reducción de concentraciones de cromo hexavalente, en este, obtuvo un porcentaje de remoción superior en el sistema con menor tiempo de contacto y la presencia de ocho *Eichhornia crassipes*, por lo cual es el sistema más eficiente para dicha remoción.

En el año 2019 Valdivia., et al, haciendo uso de carbón activado a base de borra de café, logró identificar una condición óptima de pH 2,14 y un tiempo de contacto de 140 minutos para garantizar la mayor eficiencia en la remoción del metal, la cual alcanzó el 96%.

Para el año 2020 Asimakopoulos, G., et al, elaboró carbón activado a partir de residuos de café para la adsorción de cromo hexavalente. El objetivo principal de este trabajo fue combinar los beneficios de la valorización de los biorresiduos de café usado y la purificación de aguas residuales a través de la eliminación de Cr (VI) por adsorción en carbón bioactivado. Con este estudio se comprobó que el pH óptimo del carbón activado para la remoción es de 3 y que el proceso difusión-quimisorción es más apropiado para realizar una simulación de la biosorción. En este trabajo se hizo aprovechamiento de borra de café para realizar carbón activado, la cuál es el residuo que queda al realizar la preparación de café, diferenciándose de este trabajo de grado puesto que en este se realiza el carbón activado a partir de la propia cascara de café, y además se toma en cuenta el tamaño de partícula del carbón, lo cual es un aspecto que no ha sido estudiado anteriormente, y esto llegaría a ser un aporte significativo en caso de una implementación de este bioadsorbente como estrategia de mitigación de impactos al Río Bogotá.

En el año 2021 Maribel Silva buscó evaluar la remoción de cromo que puede tener la borra de café para soluciones acuosas de Cr (VI), utilizando muestras de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Silva pudo demostrar que la borra del café tiene una eficiencia del 97,79% y que para lograrlo es necesario tener al menos 30 minutos de contacto con el biosorbente.

7. Marco de referencia

7.1 Marco teórico

La **contaminación hídrica por cromo** es un problema ambiental de gran relevancia, dado que este metal pesado, en su forma hexavalente Cr(VI), es altamente tóxico y puede tener graves efectos adversos en la salud humana y el ecosistema acuático. La presencia de cromo hexavalente en el agua se asocia frecuentemente con vertimientos industriales, como los generados por curtiembres y otros procesos, donde se utiliza el cromo en sus operaciones.

Para abordar este desafío, se han desarrollado diversas técnicas de remoción de contaminantes, y una de las más prometedoras es la utilización de bioadsorbentes. Los **bioadsorbentes** son materiales derivados de biomasa, como microorganismos o materiales biológicos, que tienen la capacidad de adsorber metales pesados, incluido el cromo hexavalente (Castiblanco Y & Perilla A, 2019).

Para evaluar la eficacia de los bioadsorbentes en la remoción de cromo hexavalente, se utilizan isotermas de adsorción, como las de Langmuir y Freundlich (Okeola F & Odebunmi E, 2010). La **isoterma de Langmuir** describe la adsorción de contaminantes en una monocapa en la superficie del adsorbente, asumiendo que todos los sitios de adsorción son equivalentes y que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas (Sandoval, et al.; 2015). Por otro lado, la **isoterma de Freundlich** describe la adsorción en una superficie heterogénea, donde la energía de adsorción disminuye a medida que se acumulan más contaminantes en el adsorbente (Rivas, et al.; 2014).

La medición de la capacidad de remoción de metales utilizando isotermas proporciona datos valiosos para entender cómo los bioadsorbentes interactúan con el cromo hexavalente y cómo varía esta interacción en diferentes condiciones. Estos datos son fundamentales para diseñar sistemas de tratamiento de aguas eficientes y sostenibles.

Además de las isotermas, se utiliza el **método UV-Vis** (Ultravioleta-Visible) para evaluar la concentración de cromo en el agua antes y después del tratamiento. Este método se basa en la absorción de luz ultravioleta y visible por parte de los iones de cromo en solución. La disminución de la absorbancia en el espectro UV-Vis indica una reducción en la concentración de cromo hexavalente, lo que sugiere una remoción exitosa (De Caro C & Haller C, 2017).

El **carbón activado a base de café** es un tipo de biosorbente que se obtiene luego de lavar muy bien el material (cáscara, pulpa o borra) y secarlo en un horno a altas temperaturas. El tiempo depende del tipo de horno y la cantidad de materia prima; posteriormente se procesa hasta tener el tamaño de partícula deseado y se finaliza con la activación (Grisales, A. & Rojas, W., 2016). Esta puede ser física, donde el agente activante es comúnmente el agua, o química, donde la activación se hace por medio de agentes oxidantes tales como ácidos o hidróxidos (Rincón, et al., 2015).

En resumen, la contaminación hídrica por cromo hexavalente es un problema crítico que requiere soluciones efectivas de remoción de contaminantes. La utilización de bioadsorbentes, la evaluación a través de isothermas de Langmuir y Freundlich, el método UV-Vis para medir la concentración de cromo y el uso de carbón activado son enfoques clave en la lucha contra esta forma de contaminación, y su aplicación bien gestionada puede contribuir significativamente a la mejora de la calidad del agua y la protección del medio ambiente.

7.2 Marco conceptual

La **calidad del agua** es un indicador fundamental de la pureza y las características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para los diversos usos que la sociedad y el medio ambiente requieren. Esta calidad puede verse amenazada por una serie de factores, uno de los cuales es la liberación de aguas residuales o contaminadas en cuerpos de agua, conocida como vertimientos (Mogens H, 2008). Los **vertimientos industriales**, en particular, representan una fuente significativa de contaminación hídrica y están estrechamente relacionados con la presencia de contaminantes, tanto convencionales como no convencionales (González, L. 2019).

Los **contaminantes convencionales** son sustancias que, aunque bien conocidas y reguladas, siguen planteando riesgos para la calidad del agua. Estos pueden incluir sólidos suspendidos, nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y patógenos que pueden afectar la salud humana y la salud del ecosistema acuático (Londoño, L et al 2016). Sin embargo, la creciente presencia de contaminantes no convencionales, como productos farmacéuticos y productos químicos emergentes, agrega una capa adicional de complejidad a la gestión de la calidad del agua.

Dentro de la categoría de contaminantes no convencionales, los metales pesados ocupan un lugar destacado. Uno de estos metales pesados es el cromo hexavalente. El Cr(VI) es una de las formas de valencia (+6) que puede tener el cromo. Por lo general, se fabrica mediante un

procedimiento industrial, especialmente en curtiembres, y es peligroso debido a que tiene la capacidad de causar cáncer y afecta negativamente al sistema respiratorio, los riñones, el hígado, la piel y los ojos (U.S. Department Of Labor, 2013). La relación entre los vertimientos de aguas residuales de curtiembres y la presencia de cromo está intrínsecamente ligada a los procesos utilizados en la industria del curtido del cuero, donde el cromo se utiliza para tratar y teñir pieles (Ministerio de Salud, 2015).

La necesidad de abordar la presencia de cromo y otros metales pesados en vertimientos industriales ha llevado al desarrollo de diversas metodologías de tratamiento. Entre estas, la **bioadsorción** se ha destacado como una técnica eficaz y sostenible. La bioadsorción emplea biomateriales, como microorganismos o materiales biológicos, para adsorber y acumular contaminantes, permitiendo su eliminación del agua (Y. Artoli, 2008). Esta técnica es especialmente prometedora para la remoción de cromo y otros metales pesados, ofreciendo una alternativa ambientalmente amigable a métodos convencionales.

Sin embargo, para optimizar la capacidad de los biomateriales en la bioadsorción, es esencial considerar la activación de los **bioadsorbentes**. La activación implica la modificación química o física de los biomateriales para mejorar su capacidad de adsorción (Grumezescu & Holban, 2019). Este proceso puede aumentar significativamente la eficacia de la bioadsorción y contribuir a la restauración de la calidad del agua en los cuerpos hídricos afectados por vertimientos industriales contaminados con cromo y otros metales pesados (Cardona, A et al, 2013).

7.3 Marco legal

En la tabla a continuación, se encuentran las normatividades colombianas vigentes para el año 2023, asociadas a este estudio

Tabla 1

Normatividad asociada a la investigación.

Norma	Artículos de interés	Aplicación de los artículos
Constitución Política de 1991	Artículo 79	Plantea que todas las personas tienen como derecho disfrutar de un ambiente sano y que la ley debe garantizar la participación de las comunidades en la toma de decisiones que puedan afectar al ambiente. El estado debe proteger las áreas de interés y debe velar por la educación ambiental para contribuir a la conservación del ambiente.
	Artículo 80	El estado debe manejar el aprovechamiento de los recursos naturales, de modo que se garantice su preservación, sustitución o restauración.
Decreto 3930 de 2010	Artículo 24	Define las prohibiciones asociadas a vertimientos
	Artículo 25	Plantea que no se puede disponer en aguas superficiales residuos sólidos producto de tratamientos de aguas
Decreto 703 de 2018	Artículo 18	Se plantean los diferentes niveles permisibles de parámetros en cuerpos de agua superficial para contribuir con la preservación de fauna y flora, entre estos parámetros se encuentra el Cromo hexavalente con un valor asignado de 0,01 mg/L
Resolución 0631 de 2015	Artículo 13	Se especifican los niveles máximos permisibles de diferentes parámetros en aguas residuales dependiendo del origen de estas, para el caso de la fabricación de bienes y manufacturas se encuentra el Artículo 13, el cual establece que los valores máximos permisibles de Cromo para vertimientos a cuerpos de agua superficial son de 0,50 mg/L

Nota: La normativa indicada en este documento corresponde a la normativa vigente para Colombia.

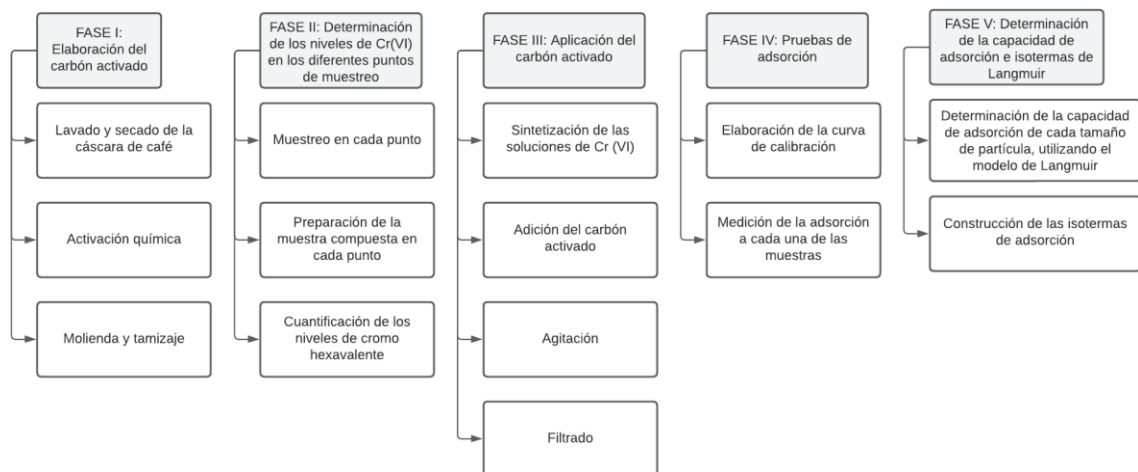
8. Metodología

Para la realización de este estudio se utilizó un diseño cuantitativo de tipo experimental, en el cual se estudia la relación entre dos variables, siendo el tamaño de partícula la variable independiente y la capacidad de adsorción de cromo hexavalente la variable dependiente.

El estudio se llevó a cabo a partir de 5 fases que van desde la elaboración del carbón con una activación de tipo química, el muestreo de tipo compuesto, el proceso de adsorción y la cuantificación de ésta para finalmente, utilizando el modelo e Langmuir y la construcción de las isotermas, determinar la capacidad de adsorción de Cr (VI) asociada a cada tamaño de partícula. Esta metodología puede verse sintetizada en la figura 2.

Figura 2

Diagrama metodológico



Nota: El diagrama metodológico presenta una descripción simplificada de cada una de las fases

8.1 Fase I: Elaboración del carbón activado

Para la obtención del carbón se utilizaron cáscaras de café de tipo arábico obtenidas de un cultivo en la vereda Puente Abadía en el municipio de Villavicencio, Meta, el tamaño de la muestra fue de 100g, los cuales para el proceso de activación en primer lugar fueron lavadas con agua destilada, luego se realizó la activación mediante procesos químicos utilizando como agente

activador 800 ml de una solución concentrada de Hidróxido de potasio (KOH) al 40%, este es uno de los compuestos para activación química que contribuye a una mayor microporosidad en las partículas (Carvalho, 2013), la cascara se dejó sumergida en esta solución por 16 horas y después fue llevada a secar a una mufla eléctrica a una temperatura de 400°C durante un tiempo de sólo 10 minutos para evitar que se crearan cenizas (Arango, 2018). En segundo lugar, las cáscaras fueron trituradas en un mortero de porcelana y luego se llevaron a un Tamiz Standard en los cuales se dividieron los tamaños de partícula 3: 1mm, 0,85 mm y 0,6 mm.

8.2 Fase II: *Determinación de los niveles de Cr(VI) en los diferentes puntos de muestreo*

Para el estudio de aguas de un río en el cual se reciben diferentes tipos de descargas residuales, se debe realizar un muestreo compuesto (IDEAM, 2007) por ello se realizó la toma de 3 muestras compuestas de 750 ml y con 5 alícuotas de 150 ml en cada una, tomadas durante 10 minutos, así se puede tener una muestra con condiciones promedio del agua residual a analizar. Para la toma de las muestras, se tomó una muestra compuesta en cada uno de los tres puntos seleccionados debido a que en el trayecto entre ellos se encuentran ubicadas las curtiembres del área, siendo los puntos 1 y 3 los puntos antes y después de las curtiembres respectivamente. El punto número 2 se seleccionó debido a que se encuentra en una zona con diversas curtiembres y por la presencia de una de éstas inmediatamente al costado del Río Bogotá.

En el mapa a continuación se puede observar la ubicación de cada uno de los puntos

Tabla 2

Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

Muestra	Latitud	Longitud
1	5°12'30" N	73°36'12" O
2	5°11'41" N	73°36'50" O
3	5°9'31" N	73°40'12" O

Nota: En la tabla se presentan las coordenadas geográficas para cada uno de los sitios de muestreo.

Las muestras fueron almacenadas en recipientes de cristal de color ámbar y transportadas en una cadena de frío a la ciudad de Villavicencio para conservar las características originales de las muestras.

Los materiales que se usaron para el muestreo según lo estipulado en el IDEAM fueron:

- Geoposicionador (GPS)
- Altímetro
- Balde plástico de 10 L
- Botellas herméticas de vidrio color marrón
- Tubo plástico para homogeneizar la muestra
- Cronómetro
- Nevera de icopor
- Guantes
- Botas de caucho

Una vez obtenidas las muestras, se procede a medir los parámetros básicos presentados a continuación:

Tabla 3

Parámetros del agua

Parámetro	Método	Equipo	Unidades de medida
Oxígeno disuelto	Sensor Electrodo FDO 25	Multiparámetro 3630 WTW	mg/L
pH	Sensor Electrodo Sentix 940 WTW	Multiparámetro 3630 WTW	Adimensional
Conductividad eléctrica	Sensor Electrodo Tetracon 925 WTW	Multiparámetro 3630 WTW	ms/cm

Nota: las mediciones de estos parámetros fueron realizadas ex situ.

8.3 Fase III: Aplicación del carbón a las muestras de agua

Para cada punto de muestreo se realizó el proceso de adsorción con cada tamaño de partícula y tres réplicas, siendo 27 muestras en total. Para realizar el proceso de adsorción, se sintetizan las muestras con oxido de cromo (VI) con el fin de evitar el efecto matriz que podría generar interferencia en la adsorción debido a la presencia de otros compuestos, para esta

sinterización se realizó una muestra madre de concentración de 5ppm para así obtener mediante diluciones realizadas teniendo en cuenta la ecuación

$$C1V1 = C2V2$$

Donde

C1= concentración de la solución madre

C2= concentración a la cual se quiere sintetizar la muestra

V1= volumen de la solución madre que se debe usar

V2= volumen de la muestra sintetizada

Para la adsorción se añadieron 0,02g del carbón activado a cada una de las muestras cuyo volumen fue de 15 ml, posteriormente con agitador magnético se realiza mezcla durante media hora a 250 rpm, luego el carbón fue removido mediante filtrado utilizando papel de filtro de 0,01 mm de diámetro. De cada sustancia una vez filtrada se tomaron 10 ml para continuar con el análisis (Sánchez, et al.; 2013).

Cada medición por tamaño de partícula y por concentración de cromo hexavalente se realizó con tres réplicas, esto para asegurar que las mediciones tuviesen un mayor intervalo de confianza.

Tabla 4

Diseño experimental del análisis

Punto de muestreo	Tamaño de partícula (mm)	Réplica	Volumen de la muestra (ml)	Carbón añadido (gr)	Tiempo de contacto (h)
1	0,6	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	0,85	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	1	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
2	0,6	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	0,85	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	1	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
3	0,6	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	0,85	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1
	1	1	15	0,02	1
		2	15	0,02	1
		3	15	0,02	1

Nota: Se obtuvo un total de 27 muestras en contacto con carbón activado, correspondientes a 3 por cada tamaño de partícula y cada punto de muestreo.

8.4 Fase IV: Pruebas de adsorción

En primer lugar se realizó una curva de calibración para la medición de la adsorbancia, para este proceso se utilizó la técnica de espectrofotometría UV-Vis utilizando el equipo Spectroquant Prove 600, mediante el método 1,5 difenilcarbazida, y realizando las mediciones a 5 concentraciones diferentes de Cr(VI): 0,02, 0,04, 0,06, 0,08 y 1 mg/L. Una vez obtenida esta curva se procedió a identificar el r^2 para asegurar la confiabilidad del método y finalmente se extrajo de la gráfica la ecuación de la recta con la que posteriormente se pudo hallar las concentraciones en relación con la adsorbancia.

Para el caso de la adsorbancia en los puntos de muestreo, se realizaron en total tres réplicas de mediciones por cada punto muestreado y por cada tamaño de partícula después de la adsorción, para un total de 27 mediciones. Para realizar cada medición se debe calibró el espectrofotómetro encendiéndose y esperando 20 minutos, mientras, del filtrado obtenido luego de la aplicación del carbón se tomaron 10 ml y se depositaron en un vaso de precipitado junto con el reactivo HI 93723 de Hanna Instruments, el cual se disuelve por completo en la muestra para luego esperar los 10 minutos de reacción indicados en el manual de dicho reactivo (Hanna Instruments, s. f.). Una vez transcurrido el tiempo se llenaron las celdas de vidrio del espectrofotómetro con las muestras y se realizaron las mediciones a 540 nm (Tatayo, 2018). El proceso anteriormente mencionado se ve debe repetirse para cada una de las réplicas de las mediciones de adsorción.

8.5 Determinación de la capacidad de adsorción y construcción de isothermas utilizando el modelo de Langmuir

Una vez obtenidos los resultados de las concentraciones de cromo hexavalente se utilizó la ecuación de Langmuir (Cascaret, et al.; 2014) presentada a continuación para determinar la capacidad de adsorción de cada tamaño de partícula en cada muestra

$$q = (c_o - c_e)/x$$

Donde:

q= Capacidad de adsorción del carbón

Co= Concentración de la muestra antes de la adsorción

Ce= Concentración de la muestra después de la adsorción

X= Masa del adsorbente

También se identificará la eficiencia de la remoción bajo la ecuación

$$n = \frac{C_o - C_e}{C_o} * 100$$

Donde

n= Eficiencia de la remoción

Co= Concentración inicial

Ce= Concentración final

Una vez obtenidos los resultados en cada una de las muestras se procederá a evaluar la relación entre el tamaño de partícula y la capacidad de adsorción, mediante el análisis de las isothermas y los diferentes gráficos, para así evidenciar si dicho tamaño influye en la eficiencia del proceso.

9. Resultados y análisis de resultados

9.1. Fase 1

La cáscara de café fue recolectada en un predio privado de la vereda Puente abadía, durante el mes de julio del año 2023, se obtuvo un total de 100 gr de materia prima para la elaboración del carbón, sin embargo, la cantidad total obtenida luego del proceso de activación fue de 8,1 g distribuidos de la siguiente forma:

Tabla 5

Rendimiento del carbón activado según el tamaño de partícula

Tamaño de partícula (mm)	Cantidad de carbón (gr)
0,6	3,1
0,85	1,6
1	3,4

Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de rendimiento del proceso para su posterior análisis

$$\%Rendimiento = \frac{masautil}{masatotal} * 100$$

$$\%Rendimiento = \frac{8,1g}{100g} * 100$$

$$\%Rendimiento = 8,1\%$$

El rendimiento es considerablemente bajo, esto debido a que durante el proceso de carbonización se retira toda la humedad presente en la cascara, también, durante el proceso de activación con el KOH se debió realizar un lavado con abundante agua, durante el cual hubo pérdidas considerables de cáscara.

Figura 3

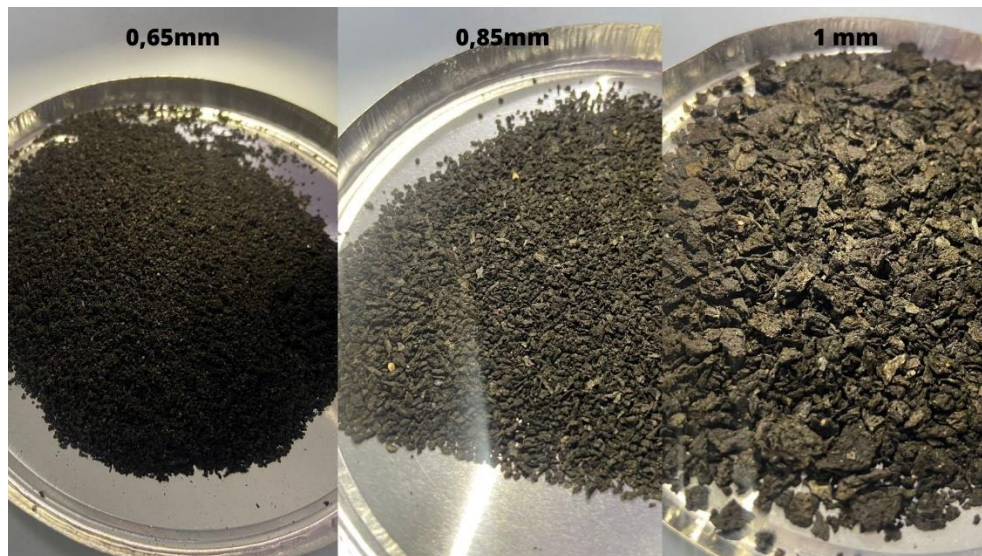
Cáscara de café utilizada para la elaboración del carbón



Nota: La imagen presenta la cáscara antes de ser sometida a cualquier tipo de manipulación

Figura 4

Carbón activado en sus diferentes tamaños de partícula



9.2 Fase 2

Se obtuvieron 3 muestras compuestas en los 3 diferentes puntos anteriormente mencionados, a las cuales se les evaluó la concentración de cromo hexavalente, el pH y el oxígeno disuelto, resultados presentes en la tabla número 6.

Las condiciones físicas de los 3 puntos eran similares en tanto a turbiedad del agua y caudal, tal como se observa en la figura número 5.

Figura 5

Sitios de muestreo



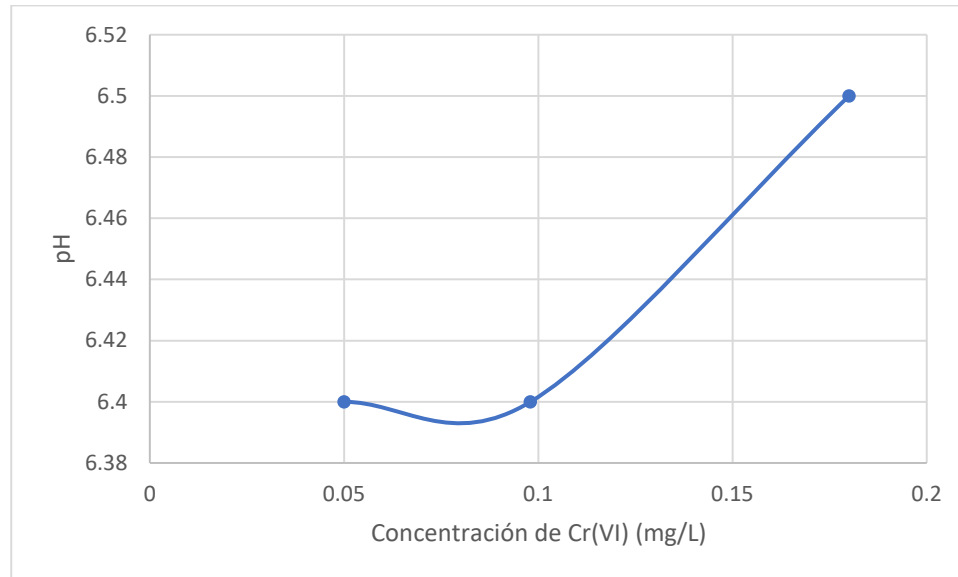
Tabla 6

Resultados del análisis a las muestras.

Punto	Cromo (VI) mg/L	pH	Conductividad us/cm	Oxígeno disuelto mg/L
1	0,05	6,4	118,3	7,01
2	0,098	6,4	60,8	7,21
3	0,18	6,5	303,0	6,90

Figura 6

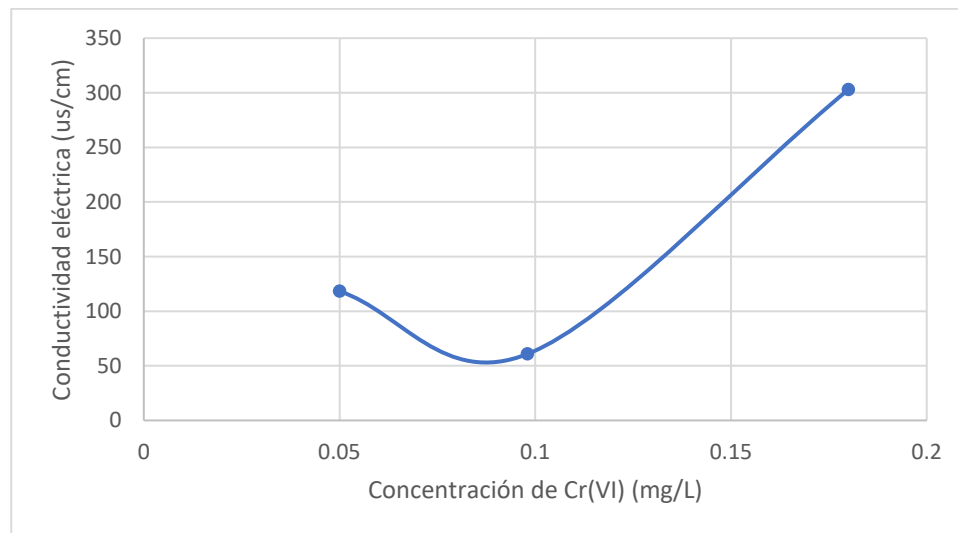
pH vs concentración de Cr(VI)



Nota: se evidencia un aumento del pH solamente cuando se incrementó en mayor proporción la concentración de cromo hexavalente.

Figura 7

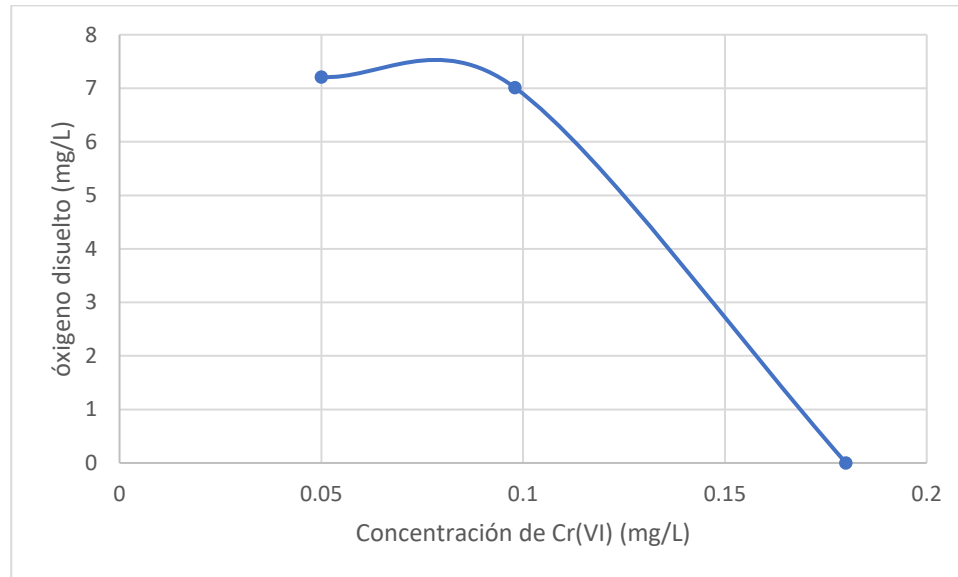
Conductividad eléctrica vs concentración de Cr(VI)



Nota: no se identifica influencia alguna en la conductividad asociada a la presencia de cromo hexavalente.

Figura 8

Oxígeno disuelto vs concentración de Cr(VI)



Nota: Se evidencia una notable disminución del OD con respecto al incremento en la concentración de cromo hexavalente.

Una vez realizada la medición de los niveles de cromo hexavalente se identifica que los niveles se encuentran dentro del límite máximo permisible determinado por el Artículo 13 de la Resolución 0631 de 2015, siendo el punto con mayor concentración, tal como se esperaba, el número 3 en Chocontá después de todos los vertimientos de las curtiembres, aun así el nivel de cromo es bajo, lo cual puede atribuirse al aumento en el caudal del río por las lluvias en días anteriores, y a que las descargas no son constantes en cantidades, fechas y horarios.

9.3. Fase 3

Para la medición de las concentraciones de carbón activado se elaboraron unas soluciones patrón con concentraciones de 0,05, 0,098 y 0,18 mg/L de Oxido de cromo 6, las cuales fueron obtenidas a partir de la dilución de una solución madre, estas muestras muestras contaron con las mismas condiciones que las tomadas en el río Bogotá, esto con el fin de garantizar que la adsorción no se vea interferida por la presencia de otros metales y compuestos que hay presentes en el agua del Río. Se realizaron en total 27 muestras sintéticas con aplicación de carbón activado, siendo 9 réplicas por cada concentración 3 por tamaño de partícula a cada concentración. La cantidad de

carbón añadido fue de 20 mg en 15 ml de cada muestra, teniendo todas un tiempo de contacto de 1 hora en constante agitación (250 rpm) en el agitador magnético (Ver figura 9). Una vez transcurrido el tiempo se realizó la filtración del carbón utilizando papel de filtro tal y como se ve reflejado en la figura 10.

Figura 9

Carbón en contacto con las muestras

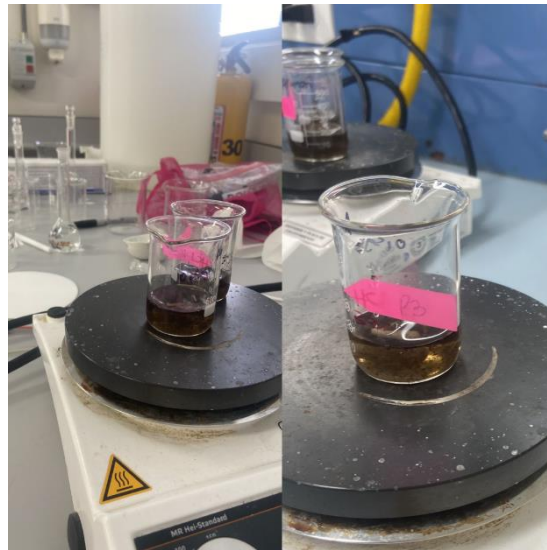
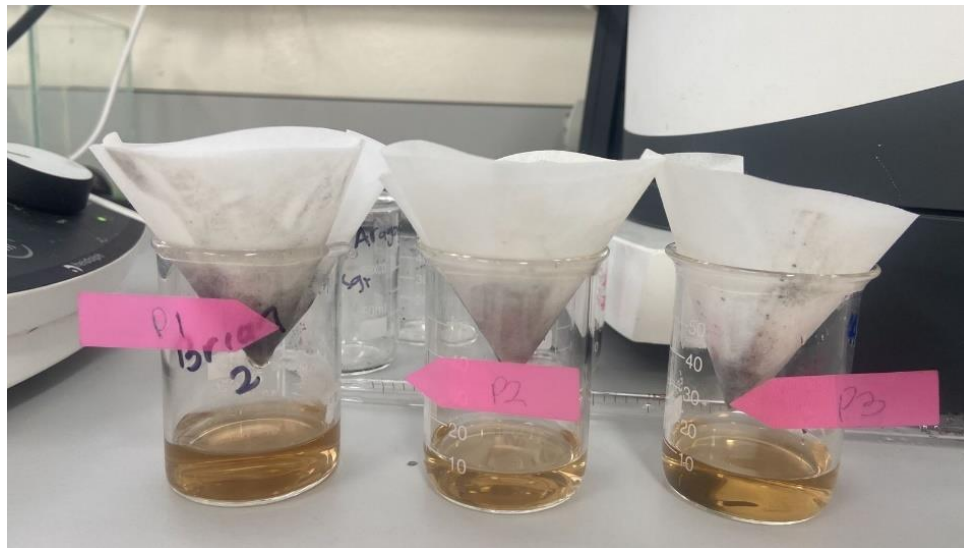


Figura 10

Proceso de filtrado del carbón



9.4. Fase 4

Se realizó la curva de calibración (ver figura 11) para identificar la relación entre la adsorbancia y la concentración de cromo para lo cual se utilizaron 5 concentraciones diferentes obtenidas mediante las sinterización y disolución de la solución madre de cromo hexavalente concentrada a 5ppm, el R^2 arrojó un resultado aproximado de 0,99 lo cual indica que el ajuste lineal de la curva es funcional y que permitirá hallar los valores de las concentraciones a partir de la adsorbancia obtenida en cada uno de los análisis.

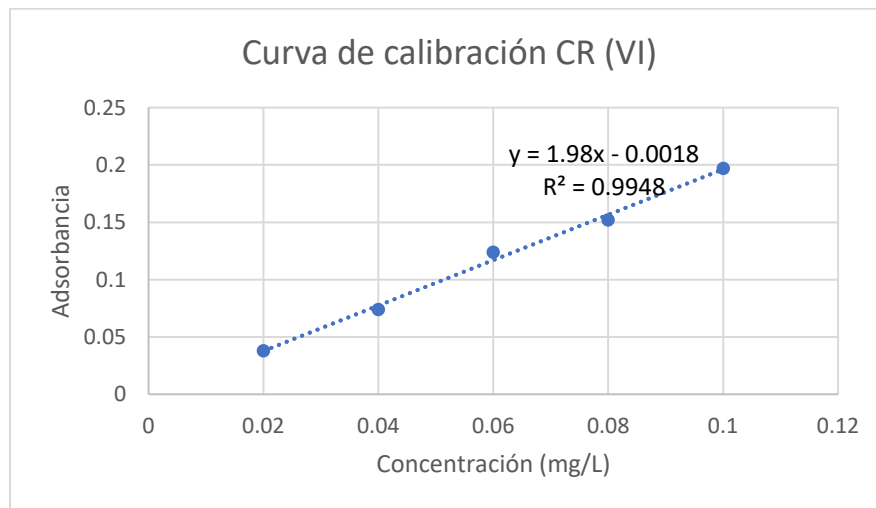
Tabla 7

Resultados curva de calibración

CURVA DE CALIBRACIÓN CR(VI) a 540 nm	
Cr 6 (mg/L)	Adsorbancia
0,02	0,038
0,04	0,074
0,06	0,124
0,08	0,152
0,1	0,197

Figura 11

Curva de Calibración de cromo hexavalente



De esta curva de calibración obtenemos la ecuación que se ve en la gráfica, con la cual se puede determinar la concentración final de cromo hexavalente a partir de la adsorbancia, realizando un despeje de esta, creando la ecuación:

$$C_e = \frac{y + 0,0018}{1,98}$$

Donde:

Ce= Concentración final de cromo hexavalente

Y= adsorbancia

Esta ecuación fue programada en una hoja de cálculo de Excel, donde se arrojaron los resultados obtenidos en las tablas 8, 9 y 10.

Para realizar las mediciones de cromo hexavalente se utilizó el reactivo HI 93723 de Hanna Instruments, en 10 ml de la solución filtrada en el paso anterior, las cuales fueron contenidas en las celdas de vidrio del espectrofotómetro para posteriormente realizar las mediciones de adsorbancia a 540 nm.

Por cada tamaño de partícula y punto de muestreo se realizaron 3 réplicas, la información obtenida con respecto a la adsorbancia, el porcentaje de remoción y las concentraciones de cromo hexavalente se ven contenidas en las tablas a continuación.

Tabla 8

Resultados de las mediciones en el punto 1.

Punto 1: Villapinzón co 0,05 mg/l						
Tamaño de partícula (mm)	Adsorbancia			Adsorbancia promedio	Concentración final Cr(VI) (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
	Replic a 1	Replic a 2	Replic a 3			
0,6	0,042	0,05	0,044	0,045	0,024	52,39
0,85	0,041	0,045	0,043	0,043	0,023	54,75
1	0,028	0,027	0,031	0,029	0,015	69,23

Tabla 9

Resultados de las mediciones en el punto 2.

Punto 2: intermedio Co 0,098 mg/L						
Tamaño de partícula (mm)	Adsorbancia			Adsorbancia promedio	Concentración final Cr6 (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
	Replic a1	Replic a 2	Replic a 3			
0,6	0,085	0,082	0,082	0,083	0,043	56,30
0,85	0,065	0,062	0,066	0,064	0,033	65,92
1	0,055	0,046	0,051	0,051	0,026	72,96

Tabla 10

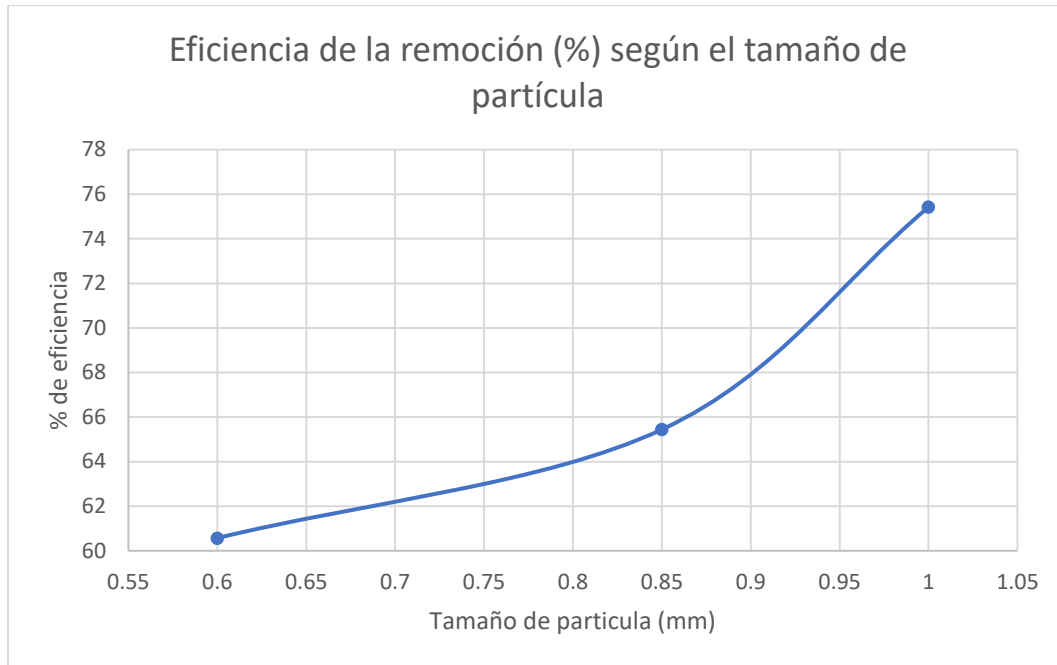
Resultados de las mediciones en el punto 3.

Punto 3: Chocontá Co 0,18 mg/L						
Tamaño de partícula fi(mm)	Adsorbancia			Adsorbancia promedio	Concentración final Cr6 (mg/L)	Eficiencia de la remoción (%)
	Replic a 1	Replic a 2	Replic a 3			
0,6	0,097	0,092	0,094	0,094	0,049	73,03
0,85	0,086	0,088	0,081	0,085	0,044	75,65
1	0,055	0,058	0,052	0,055	0,029	84,06

Con los resultados obtenidos en estas tablas se puede inferir respecto a cuál tamaño de partícula presenta un mayor porcentaje de remoción, siendo este el mayor tamaño (1mm) el cual tuvo un valor promedio de 75,42%, seguido en efectividad por el tamaño medio (0,85mm) con un valor promedio de 65,44% y finalmente la partícula más pequeña (0,65mm) con un valor promedio de porcentaje de remoción del 60,57%.

Figura 12:

Eficiencia de la remoción según el tamaño de las partículas del carbón activado



De todos estos resultados se puede apreciar y afirmar de manera inicial que a mayor tamaño de partícula existe una mayor capacidad de adsorción, así como también, el porcentaje de cromo hexavalente removido por cada carbón activado fue superior en los niveles de agua con más presencia de Cr(VI).

Determinación de la capacidad de adsorción y construcción y análisis de isothermas de adsorción utilizando el modelo de Langmuir: Mediante la ecuación modelo propuesta por Langmuir y planteada en la metodología, se procede a hallar la capacidad de adsorción promedio de cada tamaño de partícula, la ecuación mencionada y presente a continuación fue programada en una hoja de cálculo de Excel, arrojando los resultados presentes en la tabla 8.

$$q = (c_o - c_e)/x$$

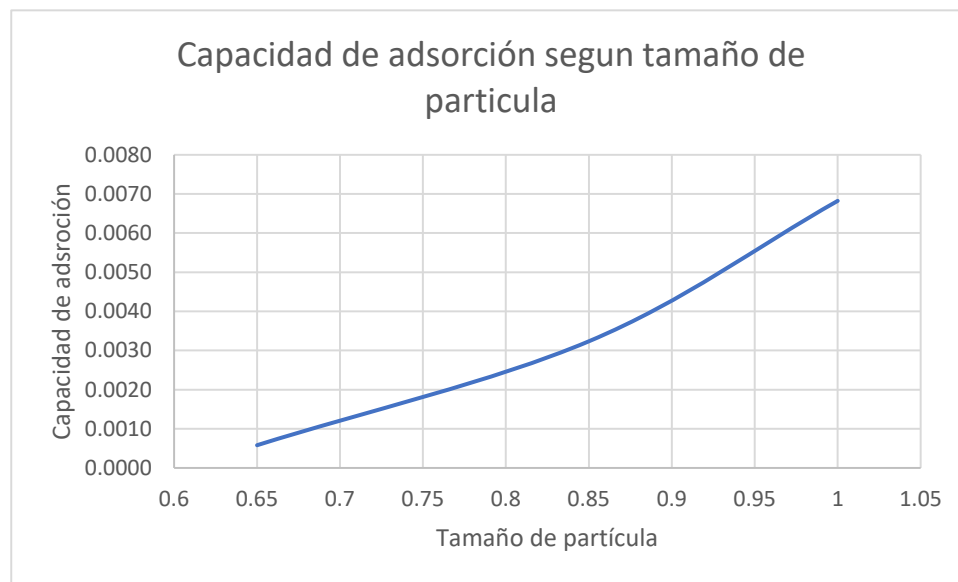
Tabla 11

Resultados de la capacidad de adsorción por cada tamaño de partícula

Concentración Inicial (mg/L Cr(VI))	Tamaño de partícula	Concentración final mg/L Cr6			Capacidad de adsorción			Promedio	
		P1	P2	P3	P1	P2	P3		
P1	0,05	0,65 mm	0,024	0,043	0,049	0,001	0,000	0,000	0,0006
P2	0,1	0,85 mm	0,023	0,033	0,044	0,003	0,003	0,002	0,0032
P3	0,16	1 mm	0,015	0,026	0,029	0,007	0,006	0,006	0,0068

Figura 13

Capacidad de adsorción según el tamaño de partícula



Se logra evidenciar mediante el uso del modelo de Langmuir que la partícula con mayor capacidad de adsorción es la de mayor tamaño, reafirmando lo concluido anteriormente mediante las comparaciones realizadas a partir del porcentaje de remoción.

Se procede entonces a seguir con la construcción de las Isotermas de Adsorción, para ello en primer lugar se debe hallar la linealización de cada isoterma (una por punto de estudio), para obtener la ecuación 1 del modelo de Langmuir:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{q} + \frac{1}{q * K} + \frac{1}{C_e}$$

La cual responde a una ecuación de línea recta $y = mx + b$, por lo cual se realiza la linealización anteriormente mencionada

Tabla 12

Datos para la construcción de la isoterma en el punto 1.

PUNTO 1 VILLAPINZÓN CONCENTRACIÓN mg/L	Tamaño de partícula	Ce mg/L	X (Co - Ce)	q (x/m)	Ce/q
0,05	0,65	0,024	0,026	0,00131	18,175
	0,85	0,023	0,027	0,00137	16,531
	1	0,015	0,035	0,00173	8,891

Tabla 13

Datos para la construcción de la isoterma del punto 2.

PUNTO 2 INTERMEDIO CONCENTRACIÓN mg/L	Tamaño de partícula	Ce mg/L	X (Co - Ce)	q (x/m)	Ce/q
0,098	0,65	0,043	0,055	0,00276	15,525
	0,85	0,033	0,065	0,00323	10,341
	1	0,026	0,072	0,00358	7,412

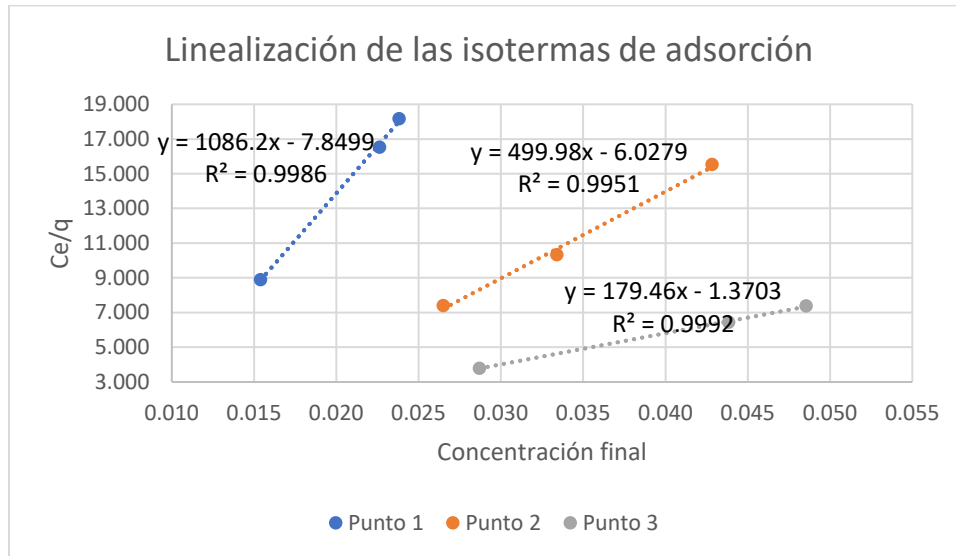
Tabla 14

Datos para la construcción de la isoterma del punto 3.

PUNTO 3 CHOCONTÁ CONCENTRACIÓN mg/L	Tamaño de partícula	Ce mg/L	X (Co - Ce)	q (x/m)	Ce/q
0,18	0,65	0,049	0,131	0,00657	7,38
	0,85	0,044	0,136	0,00681	6,43
	1	0,029	0,151	0,00757	3,79
					2

Figura 14

Linealización de las Isotermas



Una vez conocidas todas las ecuaciones se busca el valor de la constante de Langmuir K, para ello se despeja de la ecuación lineal y de la ecuación 1 de modo que

$$k = \frac{1}{Q * m}$$

El valor de m se encuentra en la ecuación lineal, para hallar el valor de Q o capacidad de adsorción máxima, esta se despeja siendo la ecuación:

$$Q = \frac{1}{b}$$

Estas ecuaciones se programaron en una hoja de cálculo de Excel para cada uno de los puntos de muestreo, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 15

Valores de Q y constante de Langmuir para cada punto

PUNTO	Co	Q	K
1	0,05	0,1275	0,00722243
2	0,098	0,1659	0,01339593
3	0,18	0,7298	0,00763568

Con la obtención de estos datos se pudo identificar que hubo una capacidad de adsorción superior en el punto 3 así como también un aumento en dicha capacidad, proporcional al aumento

en la concentración de Cr (VI), lo cual indica que la cantidad de adsorbato adsorbido es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente presente en las muestras, siguiendo así una relación lineal entre estas; lo cual coincide con la linealidad de las gráficas de la figura 14.

Esta linealidad y adsorción ideal se puede atribuir a una superficie homogénea en el carbón activado, la cual permite que la adsorción sea efectiva sobre toda la superficie de las partículas del carbón. Además, el comportamiento lineal también concuerda con los bajos niveles de Cr (VI) presentes en el río, siguiendo así el comportamiento de Langmuir.

10. Conclusiones

- De los 100 g de cáscara de café utilizados sólo se obtuvieron 8,1 g de carbón activado los cuales se dividieron en los tres diferentes tamaños de partícula (0,65 mm, 0,85 mm y 1 mm); el tamaño que presentó una mayor capacidad de adsorción según el porcentaje de rendimiento y el modelo de Langmuir fue el carbón con partículas de 1 mm, lo cual se atribuye a una mayor área superficial sobre la cual se adhieren las partículas de Cr_6 .
- Las isotermas de adsorción demostraron un comportamiento lineal, el cual responde al modelo planteado por Langmuir para ensayos con concentraciones de un elemento en niveles bajos, en los cuales se conforma una monocapa en donde todos los sitios posibles para la adsorción ya han sido ocupados.
- Se pudo probar que el carbón activado de cáscara de café es un método eficiente de adsorción de contaminantes en un cuerpo hídrico, logrando una adsorción no menor a 60% en cada uno de los tamaños de partícula estudiados.
- El método de activación química para el caso de la cáscara de café no presenta un porcentaje de rendimiento muy alto, debido a que durante todo el proceso de activación se pierde material en los filtrados, lavados y secados; por ello un proceso de activación que requiera menor manipulación del material resultaría más eficiente.

Estas conclusiones son importantes porque destacan el potencial del carbón activado de cáscara de café como un eficiente método de adsorción de contaminantes en cuerpos hídricos. Además, el hecho de que las isotermas de adsorción sigan el modelo de Langmuir indica que este método es adecuado para tratar concentraciones bajas de cromo en el agua. Esto es relevante ya que, en muchas situaciones de contaminación, las concentraciones de suelen ser relativamente bajas, y contar con un método eficiente para eliminarlos es esencial.

11. Recomendaciones

- El horario de muestreo es importante, ya que las descargas al Río Bogotá se hacen durante la noche, por ello se recomienda realizar el muestreo en horas nocturnas o lo más temprano en la mañana posible, para lograr identificar las concentraciones máximas que se vierten en éste.

También es importante considerar la temporada en la cual se realizará un muestreo, ya que los caudales del río Bogotá cambian con las épocas de lluvia o sequía, de modo que se recomienda hacer los muestreos entre los meses de enero a marzo, (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2021) durante los cuales el río conserva un caudal más bajo.

- Durante el proceso de activación química y posteriormente la carbonización se disminuye considerablemente la cantidad de la biomasa utilizada para la realización del carbón activado, como en el caso del presente estudio, por ello, se recomienda considerar una activación únicamente térmica en casos donde se requiera mayores cantidades de carbón.
- Para el estudio de adsorción utilizando carbón activado es importante considerar un parámetro fundamental: el tiempo de contacto entre el adsorbente y la muestra a analizar, de modo que a mayor tiempo de contacto se pudo lograr una mayor adsorción de cromo hexavalente. Sería útil una consideración de la adsorción en diferentes concentraciones y en diferentes periodos de tiempo de contacto, para identificar así una capacidad máxima de adsorción.
- Es recomendable realizar las mediciones de parámetros fisicoquímicos del recurso hídrico y concentración de contaminantes en esta, en un espacio cercano a los puntos de toma de muestras de agua para garantizar la mayor veracidad de los datos, teniendo en cuenta que entre más tiempo pasen las muestras refrigeradas, menores serán los niveles de cromo hexavalente presentados en esta

Referencias bibliográficas

- Acosta, H., Barraza, C., Albis, A. (2017). Adsorción de cromo (VI) utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) como biosorbente: *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*. 35(1). 58-76. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/7901>
- Asamblea Nacional Constituyente. (20 de julio de 1991). Constitución Política de Colombia [CPC]. Obtenido de http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html
- Asimakopoulos G, Baikousi M, Kostas V, Papantoniou M, Bourlinos AB, Zbořil R, Karakassides MA, Salmas CE. Nanoporous Activated Carbon Derived via Pyrolysis Process of Spent Coffee: Structural Characterization. Investigation of Its Use for Hexavalent Chromium Removal. *Applied Sciences*. 2020; 10(24):8812. <https://doi.org/10.3390/app10248812>
- Baeza, E. (2016). Calidad del Agua. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>
- Cardona, A., Cabañas, D., Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*. 17(1). 1-9. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46729718001.pdf>
- Carvajal Florez, E., & Marulanda, L. F. (2022). Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44–55. <https://doi.org/10.21500/20275846.4477>
- Castiblanco, Y & Perilla, A. (2019). Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresas de Bogotá. [Informe investigativo]. Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Bogotá. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-Remocion_Cromo_Hexavalente.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2017). Así es el Río Bogotá. [Hoja informativa]. orarbo.gov.co <http://orarbo.gov.co/es/el-observatorio-ylos-municipios/asi-es-el-rio-bogota>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2019). De las más de cien curtiembres que operan en Villapinzón y Chocontá, 30 están en la legalidad. [Boletín informativo].

- car.gov.co. <https://www.car.gov.co/saladeprensa/de-las-mas-de-cien-curtiembres-que-operan-en-villapinzon-y-choconta-30-estan-en-la-legalidad>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2021). Evaluación Regional del Agua ERA Cuenca del Río Bogotá. En CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/648b601fc1a45.pdf>
- Cortés, Y., Sotto, K. & Vargas, L. (2020). Impactos ambientales de la producción del café y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1). 93-110. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7816274.pdf>
- Cuesta Parra, D. (2017). Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres, en la cuenca del río Aburrá. [Tesis de investigación, Universidad de Manizales]. Repositorio. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3645/Cuesta_DianaProyectede%20gradomaestr%C3%ADa.pdf?sequence=1
- De Caro, C & Haller, C. (2017). UV/VIS Spectrophotometry - Fundamentals and Applications. [Guía instructiva]. Mettler https://www.mt.com/es/es/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html#applications
- Fluence News Team. (2020). ¿Qué es el cromo hexavalente? [Reporte informativo]. FluenceCorp. <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-cromo-hexavalente/>
- Galvin, M., Pascual, R., Forcada, S., Cano, L. (2009). Contaminación convencional, sustancias prioritarias y contaminantes emergentes en saneamientos públicos españoles. *Artículos Técnicos*. http://www.emacsa.es/download/idi/40_54_TA313_AT%20Contaminacion.pdf
- García, C., Lamprea, L. (2018). Vertimientos en la industria de la construcción en Colombia. *Ciencia, Tecnología y Sociedad* <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6988452.pdf>
- González, L. (2019). Gestión para mitigar los impactos ambientales generados por las curtiembres de Bogotá con el fin de concientizar sobre el cambio climático. [Ensayo como opción de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/21130/GonzalezPachonLuzAngelica2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Grisales, A. & Rojas, W. (2016). Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales.

- [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira.]. Repositorio. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/5c456630-0b2e-4a17-a4e4-43273d4115a8/content>
- Grumezescu, A., & Holban, A. (Eds.). (2019). Bottled and Packaged Water (Vol. 4). <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02378-9>
- León, L. (1990). Dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en ríos. [Trabajo de grado, Instituto mexicano de tecnología del agua]. Repositorio. Dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en ríos (imta.mx)
- Londoño, L., Londoño, P. & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017
- López, N., Andrade J., Suárez F., Duarte D., Muñoz M., Arango M. (2018). Contaminación del río Bogotá por vertimientos de industrias de curtiembres en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca. [Proyecto Semestral]. Universidad de los Andes. https://villapinzoncundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/villapinzoncundinamarca/content/files/000210/10462_investigacion-curtiembres.pdf
- Medina, M., & Pozo, P. (2013). Determinación de cromo hexavalente en descargas de aguas residuales de una curtiembre, ubicada en el sector de Izamba, Ambato en la provincia de Tungurahua, mediante espectrofotometría de absorción atómica. *Infoanálítica*. 82-101. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8382680.pdf>
- Mera, J., Espinosa, G., Murillo, W. (2018). Remoción de Cr(VI) en residuos líquidos de laboratorios de servicios analíticos por fotocatalisis heterogénea y bioadsorción. *Revista Producción+Limpia*. 13(1). 30-42 <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v13n1/1909-0455-pml-13-01-30.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

- Ministerio de Salud. (2015). Guía para el desarrollo de actividades de promoción y prevención en la industria de curtiembres. [Dirección de Promoción y Prevención]. Ministerio de Salud <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/6guia-actividades-pyp-curtiembres.pdf>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2011). Acuerdo Ministerial No. 50. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Acuerdo-50-NCA.pdf>
- Mirón, V., Barragán, B., & Gutiérrez, P. (2021). Coffee waste: a source of valuable technologies for sustainable development. Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products (173-198). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824044-1.00009-x>
- Mizar Moreno, C., & Munzón Pastrana, C. (2017). Impacto ambiental de los procesos de producción. Una revisión de su evolución y tendencias. [Artículo científico]. Universidad Simón Bolívar. <https://www.sostek.how/recursos/impacto-ambiental-de-los-procesos-de-produccion>
- Oficina de Evaluación de Peligros de Salud Ambientales (OEHHA) (2016). Efectos del Cromo Hexavalente Sobre la Salud. [Hoja informativa]. Agencia de protección ambiental de California. <https://oehha.ca.gov/media/downloads/faqs/sphexchromiumairfact111616.pdf>
- Okeola, F. & Odebunmi, E. (2010). Comparison of Freundlich and Langmuir Isotherms for Adsorption of Methylene Blue by Agrowaste Derived Activated Carbon. *Advances in Environmental Biology*, 4(3). 329-335. <http://www.aensiweb.com/old/aeb/2010/329-335.pdf>
- Palomino, M. (2017). Importancia del sector industrial en el desarrollo económico: Una revisión al estado del arte. *Revista Estudios De Políticas Públicas*, 3(1), 139–156. <https://doi.org/10.5354/repp.v5i0.46356>
- Perigó, E., Ramirez, O., Montalvo, J., Suárez, G., Niévares, A. (2005). Presiones Antropogénicas Relacionadas con el Comportamiento, Hidrodinámica, Flujos e Intercambios de Compuestos Biógeno en el Estuario del Río las Casas. Isla de la Juventud, Cuba. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, Vol. 36
- Pinzón, L. (2019). Metales pesados en los lodos de la cuenca alta del Río Bogotá, entre Villapinzón y Chocontá. *Revista ambiental Agua, Aire y Suelo*, 2(2). 1-8 <https://doi.org/10.24054/19009178.v2.n2.2019.396>

- Presidencia de la República de Colombia. (2010). Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=40620>
- Presidencia de la República de Colombia. (2018). Decreto 703 de 2018. Por el cual se efectúan unos ajustes al Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y se dictan otras disposiciones.
<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-703-de-2018/>
- Quintana, G., Velazques, J., Gomez, C., & Echavarría, Y. (2008). Adsorción de Ni(II) en carbón activado de cascarilla de café. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 3, 1-6.
<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/7188/ADSORCI%20DE%20NI%28II%29%20EN%20CARB%20ACTIVADO%20DE%20CASCARILLA%20DE%20CAF%28%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rangel, A. (2015). La problemática del río Bogotá. [Sentencia]. Universidad del Externado.
<https://medioambiente.uexternado.edu.co/wpcontent/uploads/sites/19/2015/09/Ang%20C3%A9lica-Rangel.pdf>
- Rincón, J. M., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 39(151), 171–175.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.138>
- Rivas, Carlos F., & Núñez, Oswaldo, & Longoria, Francisco, & González, Lucy (2014). Isoterma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. *Revista Saber*, 26(1), 43-49.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427739465008>
- Rodríguez Agudelo, K. T., Agudelo Valencia, R. N., & Caicedo Jiménez, M. C. (2021). Tratamiento de aguas residuales producidas en el proceso de remojo en curtiembres empleando ozono y hierro como catalizador. *Revista ION*, 34(2), 105–113.
<https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021010>

- Rubio-Clemente, A., Chica, E. L., & Peñuela, G. A. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería Y Competitividad*, 16(2), 211–223. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3696>
- Sandoval, F., López, J., & Gracia, J. (2015). Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación química*, 26(4), 307-313. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.03.002>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Conoce qué es un vertimiento y cómo se clasifica. ambientebogota.gov.co. https://www.ambientebogota.gov.co/historial-de-noticias/-/asset_publisher/VqEYxdh9mhVF/content/conoce-que-es-un-vertimiento-y-como-se-clasifica#:~:text=sabemos%20qu%C3%A9%20significan.-,Estos%20se%20refieren%20a%20la%20descarga%20final%20de%20elementos%2C%20sustancias,ser%20puntuales%20o%20no%20puntuales
- Semana. (2017). Alimentados con agua del río Bogotá. *Revista Semana*. <https://www.semana.com/impacto/articulo/el-agua-del-rio-bogota-se-utiliza-en-cultivos-y-ganaderia/36796/>
- Silva, F., Erazo, R. (2022). Análisis de cromo hexavalente (Cr6) residual por colorimetría y titulación en el proceso de recuperación y reúso de cromo por precipitación química de los efluentes de una industria metalmecánica. *Revista de investigaciones*. 11(2). <http://revistas.unap.edu.pe/epg/index.php/investigaciones/article/view/3779>
- Silva, M. (2021). Capacidad de biosorción de cromo hexavalente en medio acuoso usando la borra de café. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De Cajamarca]. Repositorio. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4322>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Ángel, & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109–123. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- U.S. Department Of Labor. (2013). Hexavalent Chromium. Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/hexavalent-chromium>