

Determinación de la eficiencia de la cascarilla de arroz para la remoción de cromo  
(vi) en la cuenca baja del río Bogotá

Camila Andrea Lozano Caicedo

Saray Correcha Briñez

Universidad De Cundinamarca

Facultad De Ciencias Agropecuarias

Programa De Ingeniería Ambiental

Girardot Cundinamarca

2022

Determinación de la eficiencia de la cascarilla de arroz para la remoción de cromo (VI)  
en la cuenca baja del río Bogotá

Camila Andrea Lozano Caicedo

Saray Correcha Briñez

Proyecto De Grado Para Optar Al Título De

Ingeniero Ambiental

Director

Hernan Dario Fontecha Tarazona

Msc. En Química Tecnológica Y Ambiental

Universidad De Cundinamarca

Facultad De Ciencias Agropecuarias

Programa De Ingeniería Ambiental

Girardot Cundinamarca

2022

## Contenido

Agradecimientos.....	09
Dedicatoria .....	10
Resumen.....	14
Introducción.....	16
Planteamiento del problema.....	18
Justificación.....	20
Objetivos .....	22
Objetivo general.....	22
Objetivos específicos .....	22
Marco referencial .....	23
Marco teórico.....	23
Marco legal .....	29
Diseño metodológico.....	31
Ubicación geográfica general del Río Bogotá.....	31
Ubicación geográfica local .....	33
Universo, población y muestra .....	34
Métodos, técnicas e instrumentos de análisis.....	34
Recursos humanos .....	35
Recursos institucionales.....	35

Físicos, logísticos y/o técnicos .....	35
Metodología.....	36
Fase 1. Preparación y modificaciones físicas y químicas de la cascarilla de arroz	36
1.1. Preparación.....	36
1.2. Modificación química.....	37
1.3. Modificación fisicoquímica.....	37
Fase 2. Preparación del efluente simulado.....	38
Fase 3. Toma de muestras.....	39
Fase 4. Evaluación de la cascarilla de arroz en el agua del Río Bogotá .....	42
Fase 5. Isotermas de adsorción.....	42
Resultados y discusión.....	44
Efecto del pH.....	46
Efecto de la dosis del adsorbente .....	48
Efecto del tiempo de contacto.....	50
Efecto de la concentración de Cr (VI).....	53
Isotermas de Langmuir y Freundlich.....	55
Resultados de los ensayos en el Río Bogotá .....	57
Eficiencia de CAMQ y CAMF.....	58
Conclusiones.....	59
Recomendaciones .....	60
Referencias bibliográficas.....	62

## Lista de tablas

Tabla 1. Puntos de muestreo con coordenadas geográficas.....	39
Tabla 2. Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de pH.....	47
Tabla 3. Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de dosis del adsorbente .....	49
Tabla 4. Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de tiempo de contacto .....	51
Tabla 5. Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de concentración de Cr (VI) .....	53

## Lista de figuras

Figura 1. Mapa base de la cuenca del Río Bogotá, en la cual se presenta la subdivisión en cuenca alta, media y baja.....	31
Figura 2. Distribución de la precipitación total multianual en la cuenca del Río Bogotá...	32
Figura 3. Mapa del área de estudio para el municipio de Girardot, Cundinamarca	33
Figura 4. Proceso de triturado y tamizado de la cascarilla de arroz.....	36
Figura 5. Proceso de lavado de la cascarilla de arroz después de la modificación	38
Figura 6. Puntos de muestreo determinados y puntos de muestreo realizados de acuerdo con el ENA 2022.....	40
Figura 7. Punto de muestreo antes de la desembocadura del Río Bogotá al Río Magdalena.	40
Figura 8. Punto de muestreo en el Río Tunjuelo.....	41
Figura 9. Punto de muestreo en la cuenca media del Río Bogotá.....	41
Figura 10. Proceso de modificación fisicoquímica de la cascarilla de arroz.....	44
Figura 11. Reacción de oxido-reducción entre el 1,5-difenilcarbazida y el Cr(VI).....	45
Figura 12. Curva de calibración de Cromo hexavalente.....	45
Figura 13. Efecto de óxido reducción sobre el Cr (VI) en medio ácido.....	46
Figura 14. Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de pH 1 y 3...	48
Figura 15. Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de dosis delnadsorbente (g/L).....	52

Figura 16. Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de tiempo de contacto (min).....	54
Figura 17. Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de concentración del Cr (VI) (mg/L).....	54
Figura 18. Isoterma de Langmuir para CAMF .....	56
Figura 19. Isoterma de Freundlich para CAMF .....	56
Figura 20. Isoterma de Langmuir para la CAMQ.....	56
Figura 21. Isoterma de Freundlich para la CAMQ.....	56

## **Agradecimientos**

Agradecemos profundamente a nuestros familiares, amigos y personas especiales que nos han acompañado en este proceso y en nuestras vidas, apoyándonos incondicionalmente en diferentes etapas gracias a ustedes es posible este logro que soñamos y hoy es realidad.

Del mismo modo, agradecemos a la Universidad de Cundinamarca por brindarnos todas las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto y nuestra carrera profesional, formándonos con valores a nivel personal que nos serán de ayuda para empezar esta nueva etapa de nuestras vidas y dejando personas y recuerdos importantes guardado para siempre en nuestra vida.

Por último, agradecemos a nuestro director de trabajo de grado y ejemplo a seguir Hernán Dario Fontecha Tarazona, quien durante un año y medio nos orientó y brindó sus conocimientos para el desarrollo de este proyecto, enseñándonos que todos los sucesos traen aprendizajes tanto académicamente como en nuestro crecimiento personal, además nos dedicó gran parte de su tiempo durante este proceso, por tal motivo nos sentimos inmensamente agradecidas con él.

***Camila Andrea Lozano Caicedo y Saray Correcha Briñez***

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a mis dos motivos de vida, mis perritos Max y Holly, quienes me acompañan en cada momento de mi vida siendo mi fuente de energía y gratitud y a quienes amo inmensamente, a mis padres Gerardo Lozano y Martha Caicedo, sustento inagotable de apoyo y sacrificio, gracias por ser mi soporte y enseñarme que el esfuerzo y la dedicación son claves para alcanzar cualquier meta. A mis abuelitas y tía Nelly Leal, Rosalbina Martínez, Rosalba Valderrama y Olga Caicedo, quienes confiaron en mis capacidades y me alentaron a perseguir mis sueños, su sabiduría y amor han sido un faro en mi vida, guiándome con cada decisión que he tomado.

A mis hermanas Sofia Lozano y Valerie Lozano, quienes me han acompañado en cada paso de este camino, su amor, presencia, risas y apoyo constante han convertido incluso los momentos más difíciles en experiencias valiosas y memorables. A mis preciosas amigas de toda la vida Natalia Santos y Camila Cabal, quienes han sido testigos de mis victorias y derrotas, gracias por estar a mi lado, por su aliento constante y por compartir sus bonitas energías a lo largo de esta travesía, su amistad ha sido un pilar esencial en mi vida.

A mis profesores, principalmente Hernán Fontecha cuyo compromiso con la enseñanza ha dejado una marca indeleble en mi formación académica, quienes me han brindado sus conocimientos y experiencias para mi desarrollo como estudiante y como persona. A todas aquellas personas con quienes me relacioné que, de una manera u otra, han dejado su huella en mi corazón, les dedico esta tesis, este logro no solo representa mi esfuerzo, sino también el resultado de una red de afectos y apoyos que han tejido la historia de este logro.

Finalmente, dedico este trabajo a mi compañera de tesis Saray Correcha quien en momentos difíciles me brindó su apoyo y tiempo encargándose de hacer este sueño realidad. Por último, agradezco y dedico este logro a mi propia perseverancia y determinación, que este triunfo sea un recordatorio de que desde el amor, dedicación y optimismo se cumplen los deseos del corazón.

***Camila Andrea Lozano Caicedo***

Hoy me llena de orgullo decir que dedico este trabajo principalmente a mis padres Alexander Correcha e Imelda Briñez, quienes con su esfuerzo, paciencia y amor han logrado que yo esté llegando al fin de esta etapa, quienes con sus consejos y sabiduría me han guiado en mis sueños y metas y han forjado mi personalidad y carácter cada día de sus vidas. También quiero dedicárselo a mis hermanos Diego, Andrés, Juan y Luisa, quienes se han encargado de darme un ejemplo impecable en sus vidas personales y profesionales, sin ellos y sin su apoyo y amor incondicional esto no sería posible.

A mi tía Yoli, quien desde el momento en el que se convirtió en mi madrina no dejó de apoyarme y siempre se sintió orgullosa de mis talentos, capacidades y pequeños logros, gracias infinitas por acompañarme en el camino y seguirlo haciendo ahora desde el cielo, estoy segura de que sigue orgullosa de mí. A mi Tío padrino Saul, quien ha sido un pilar fundamental en el transcurso de mi vida, quien me ha enseñado con su ejemplo que con esfuerzo y muchísimo amor todo se puede lograr, y gracias también a cada miembro de mi gran familia, que han confiado en mí y no han dudado en que puedo alcanzar cada meta que me proponga.

A mis profesores, quienes han dedicado gran parte de sus vidas a difundir el conocimiento y formar jóvenes con pensamientos críticos y constructivos, con bases sólidas de conocimientos, gracias a todos los que han dejado huella en mi vida. A mis amigos, los cuales han estado presentes durante este proceso y durante estos 5 años de mi vida y son testigos de mi esfuerzo y trabajo duro, sus palabras, sus risas, sus consejos y apoyo continuo han sido parte fundamental para culminar este sueño.

Finalmente, dedico este trabajo a tres personas que han sido muy importantes para lograr llegar al final de este trabajo, mi compañera Camila lozano quien con su dedicación y determinación fue un apoyo indispensable en el desarrollo de este trabajo y aportó de manera oportuna sus conocimientos y esfuerzos, a Hernán Fontecha por la paciencia, el amor, el tiempo y los conocimientos que nos brindó durante el camino. Por último, a Santi, quien cada día me dio fuerza y apoyo emocional y me recordó cada vez que me sentía agotada lo capaz, fuerte y brillante que soy, gracias por creer en mi y por darme la mano y ayudarme a levantar las veces que fueron necesarias.

***Saray Correcha Briñez***

## Resumen

El Río Bogotá es uno de los más importantes para la economía de Colombia, motivo por el cual es actualmente uno de los afluentes más contaminados del país, este se encuentra subdividido en 3 zonas según dispone la CAR, cuenca alta, media y baja, siendo la cuenca baja la que posee el mayor nivel de deterioro del recurso hídrico con concentraciones elevadas de diferentes contaminantes e incluso de algunos metales pesados, que debido a la capacidad de bioacumulación y toxicidad que poseen provocan impactos negativos en los ecosistemas y en la salud humana. Por tal motivo, en esta investigación se evaluó la eficiencia de adsorción de la cascarilla de arroz para la remoción de iones de cromo hexavalente Cr (VI) mediante la modificación fisicoquímica y química de sus componentes, proceso que se desarrolló por medio de 5 fases, obteniendo dos tipos de cascarilla modificada denominadas CAMF y CAMQ, las cuales fueron evaluadas en efluentes simulados en el laboratorio y en muestras de agua de la cuenca baja y media del Río Bogotá. Por otra parte, se analizaron y optimizaron 4 variables esenciales como pH, dosis del adsorbente, tiempo de contacto y concentración de Cr (VI) evaluando el modelo mediante isothermas de Langmuir y Freundlich. Por último, se calculó el porcentaje de remoción de la CAMF y CAMQ, obteniendo resultados de hasta 99,88% para la CAMF y 99,84% para la CAMQ, estableciendo así que la CAMF permitió una mejor remoción del Cr hexavalente en las muestras del efluente simulado, a su vez se estableció que los dos tratamientos de modificación a los que fue sometida la cascarilla de arroz presentan una alta viabilidad de uso, con un rango de remoción entre 82,92% - 99,88% siendo una alternativa factible para vertimientos y efluentes contaminados con metales.

**Palabras clave:** cascarilla de arroz, cromo hexavalente, isothermas, adsorción y Río Bogotá.

## Introducción

El desarrollo de los sectores económicos ha traído consecuencias perjudiciales para el medio ambiente debido a que en muchos de estos se realizan procesos que generan residuos contaminantes, un ejemplo de ello son las industrias y las prácticas mineras las cuales vierten a los afluentes metales pesados de forma indiscriminada (Llanos Páez, Ríos Navarro, Jaramillo Páez, & Rodríguez Herrera, 2016) (Llanos Páez et al., 2016) por lo cual se han diseñado diferentes metodologías de tratamiento con la finalidad de mitigar la carga de metales pesados presentes en los afluentes, dentro de las cuales sobresalen las físico-químicas y biológicas, siendo la adsorción uno de los métodos efectivos y con resultados satisfactorios (Doria Herrera, Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez et al., 2010).

En este mismo sentido, el Banco Mundial asegura que Colombia posee entre 11,8 y 19 millones de personas expuestas a altos riesgos debido a la mala calidad del agua, adicional a esto pone al país en una posición vulnerable, no solo deteriorando el recurso hídrico sino la disponibilidad de biodiversidad del territorio (ORARBO, 2021).

Asimismo, uno de los ríos más contaminados de Colombia es el Río Bogotá ya que recibe aguas de los ríos Tunjuelo, Fucha, Salitre y Torca, los cuales recorren aproximadamente 84,2 kilómetros y recogen los vertimientos y descargas de los más de ocho millones de habitantes de la ciudad (Grupo Río Bogotá, 2020), siendo considerado por la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca) un referente de suciedad y contaminación a nivel mundial (CAR, 2018).

Por consiguiente, la carga contaminante del Río Bogotá en su cuenca baja incrementa su nivel de toxicidad debido a los vertimientos de poblaciones pequeñas en las que sus actividades económicas se basan en la agricultura y turismo, lo cual se evidencia en el tramo correspondiente al municipio de Girardot en la desembocadura del Río Bogotá al Río Magdalena (Camelo Páez, 2006). La región del Alto Magdalena, como también es conocida, abastece a su población de los

dos ríos mencionados anteriormente y además el sector rural aprovecha estas fuentes hídricas para impulsar sus actividades agrícolas, esto sin tener en cuenta las consecuencias a la salud humana y los impactos al medio ambiente debido que en ambas fuentes hídricas se ha evidenciado presencia de metales pesados y diferentes contaminantes que pueden alterar la salud humana (Semana Sostenible, 2017).

Debido a esta problemática en la región nace el presente trabajo de investigación en el cual se pretende evaluar la eficiencia de la cascarilla de arroz como material adsorbente a partir de su modificación física y química para la remoción de metales pesados, específicamente Cromo (VI), que pueden estar presentes en la cuenca baja del Río Bogotá, esto con el objetivo de reducir la carga contaminante de este sector del río en aras de mejorar la calidad del ecosistema y mitigar las problemáticas sanitarias a las que pueda estar expuesta la comunidad.

## Planteamiento del problema

Actualmente a nivel mundial se ha generado un aumento considerable en la tasa de contaminación del recurso hídrico, agotando la disponibilidad de este en el planeta y poniendo en riesgo la salud humana y de la biodiversidad. Las prácticas mineras insostenibles y la actividad industrial son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales causando grandes problemas ambientales por sus vertimientos en los cuerpos hídricos. En este sentido, los principales contaminantes procedentes del sector minero e industrial son los metales pesados, los cuales se relacionan directamente con los riesgos por contaminación, toxicidad y efectos negativos en los recursos naturales y ambiente ya que estos cuentan con distintos aspectos como bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad (Martínez, González, Paternina, & Cantero, 2017) ([Martínez et al., 2017](#)).

En Colombia un actor importante de contaminación es el sector minero, que se encarga de la extracción de minerales (Agencia Nacional de Minería, 2001), sin embargo, uno de los mayores impactos ambientales es la contaminación del agua (Alianza por la Minería Responsable, 2016) ya que se libera una seria carga de metales pesados dentro de los cuales se encuentra presente el cromo (Cr). A su vez, la determinación de la presencia de estos contaminantes en los cuerpos hídricos requiere de técnicas especializadas que suelen representar una gran inversión monetaria y temporal (Campos Pinilla et al., , Cárdenas Guzmán, & Guerrero Cañizares, 2008). En este contexto el Río Bogotá recibe aproximadamente 630 vertimientos de diferentes fuentes, entre las que se destaca la industria, la minería y los desechos de la comunidad, convirtiéndose en uno de los ríos más contaminados del país (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2014). Teniendo en cuenta la problemática anteriormente mencionada, la cascarilla de arroz surge como método alternativo de bajo costo, ampliamente usado en procesos de remoción de metales pesados debido a sus características fisicoquímicas y su alta eficiencia (Llanos Páez

et al., 2016) (Llanos Páez, Ríos Navarro, Jaramillo Páez, & Rodríguez Herrera, 2016). En estudios realizados con anterioridad se ha podido evidenciar hasta remociones superiores al 94% de Cromo (VI) (Doria Herrera et al., 2011) (Doria Herrera, Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez, 2010) teniendo en cuenta que dentro de este valor influyen variables como pH, temperatura y tamaño de la partícula. En consecuencia, para este trabajo surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede emplear la cascarilla de arroz para el tratamiento fisicoquímico de las aguas provenientes de la cuenca baja del Río Bogotá?

## Justificación

En diferentes estudios realizados desde 1986, se ha evidenciado que la contaminación en las aguas del Río Bogotá ha aumentado paulatinamente, dentro de los compuestos contaminantes presentes se constató la existencia de metales pesados trayendo consigo consecuencias medioambientales negativas (Contraloría de Bogotá, 2020). Actualmente según la Resolución 0631 de 2015 en la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales, se establece un valor límite de cromo entre 0,5 y 1,0 mg/L dependiendo de las actividades económicas e industriales que se evalúen (Minambiente, 2015). Asimismo, en el 2021 se monitorearon metales pesados en 136 puntos para el Estudio Nacional del Agua 2022 (ENA), de los cuales dos puntos pertenecientes a la cuenca del Río Bogotá presentaron valores elevados siendo estos 210 mg/kg en San Pedro en el municipio de Villapinzón y 80,4 mg/kg en el Puente Tulio Botero en el municipio de Tocancipá (IDEAM, 2022), debido a esto, se precisa la importancia del control de contaminación y de técnicas para mitigar los impactos ambientales ocasionados por estos.

La cuenca baja del Río Bogotá se encuentra conformada por 46 municipios, sin embargo, solo 31 de ellos cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) lo que indicaría el 67,39% del total de la cuenca, siendo la cuenca baja del Río Bogotá la que cuenta con menor presencia de STAR (POMCA Río Bogotá, 2019). En vista de los precedentes ambientales presentes en la cuenca baja del Río Bogotá, se pretende analizar e identificar la eficiencia de la cascarilla del arroz para la remoción de Cr hexavalente en muestras tomadas de la cuenca baja y media del Río Bogotá, con la finalidad de obtener una alternativa viable para la descontaminación por metales pesados y convertirse en un método de bajo presupuesto, útil y en pro de la salud, del ambiente y de la comunidad.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar la eficiencia de adsorción de la cascarilla de arroz modificada frente a iones metálicos de cromo ( $\text{Cr}^{6+}$ ) provenientes de la cuenca baja del Río Bogotá

### **Objetivos específicos**

1. Establecer la modificación de cascarilla de arroz que posibilite la mayor adsorción de cromo ( $\text{Cr}^{6+}$ ) en efluentes simulados.
2. Analizar la eficiencia de la cascarilla del arroz para la remoción de metales pesados en muestras obtenidas de la cuenca baja y media del Río Bogotá a partir de métodos de análisis químico.

## Marco referencial

### Marco teórico

La comprensión de los términos empleados y conocimiento de los antecedentes referentes a la temática abordada es de suma importancia para mayor entendimiento de los temas abordados y finalidad del presente proyecto. En este sentido, es importante partir del concepto de contaminación ambiental, el cual hace referencia a la presencia de cualquier agente bien sea físico, químico y/o biológico en lugares, formas y concentraciones que presenten afectaciones a la salud, seguridad, bienestar de los seres vivos en general y alteren desfavorablemente las condiciones naturales de los ecosistemas (Conde Williams, 2013), asimismo, esta problemática suele ser consecuencia de los efectos de las interacciones entre las actividades antropogénicas y el medio ambiente, lo que puede causar impactos adversos en los recursos aire, agua y suelo (Grijalva Endara, Jiménez Heiner, & Ponce Solórzano, 2020)(Grijalva Endara et al., 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior y el enfoque dirigido al recurso hidrológico, en Colombia según la normativa se denomina contaminación hídrica a las alteraciones de las características organolépticas, físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas causadas por procesos naturales o antropogénicos (Decreto 475 de 1998); esta puede presentarse por vertidos, derrames, desechos y depósitos de materiales o sustancias que puedan degradar o modificar las características del recurso agua anteriormente mencionadas (Segura Triana, 2007), sumado a esto, en Colombia los sistemas de producción industrial actuales usan metales pesados para la extracción y refinación de un producto (Pabón, Benítez, Sarria Villa, & Gallo, 2020)(Pabón et al., 2020), sin embargo, esto representa una gran problemática ambiental debido a que los metales pesados son sustancias de alto peso molecular que traen consigo afectaciones negativas a los ecosistemas y la salud de los seres vivos (Romero Ledezma, 2009) ya que estos componen algunos de las sustancias más peligrosas que pueden bioacumularse en los organismos (Rodríguez Forero, González, & Suárez, 2007)(Rodríguez Forero et

al., 2007).

De acuerdo con lo mencionado, la contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua indica una grave problemática medioambiental debido a los altos niveles de toxicidad y daños perjudiciales a los organismos que interactúan con los metales pesados (Pabón, Benítez, Sarria Villa, & Gallo, 2020) (Pabón et al., 2020) ya que estos compuestos inorgánicos presentan características como su persistencia y no biodegradabilidad, por lo que deben eliminarse de las fuentes hídricas (Pérez Bou, y otros, 2018)(Pérez Bou et al., 2018). Por otra parte, uno de los metales pesados más comunes es el cromo, el cual está simbolizado Cr, es un metal duro y poco alterable que gracias a las características químicas que este posee es ampliamente usado en procesos industriales como la industria textil, cuero y calzado, refinado de cromo, metalurgia, fabricación de motores diésel, calderas y sistemas de aire acondicionado, producción de cemento, tintes para madera, carpintería y minería, entre otros (Téllez M., Carvajal Roxs, & Gaitán, 2004) (Téllez M. et al., 2004).

En este sentido, se toma como objeto de estudio la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, el cual, según el Estudio Nacional para el Agua su categorización de calidad oscila entre “aceptable” hasta “muy malo”, asimismo, la Dirección de Evaluación, Seguimiento y Control Ambiental (DESCA) suministró a la Dirección de Recursos Naturales (DRN) datos sobre el inventario de vertimientos de captaciones y aguas residuales para el Río Bogotá, dentro de las cuales se haya presencia de distintas especies de metales pesados entre los cuales destaca el cromo hexavalente Cr (VI) desde la cuenca alta, debido a que en la subcuenca del Río Tunjuelo cerca de 300 empresas desarrollan actividades de curtiembres (Dirección Recursos Naturales, 2020), lo cual se puede justificar en primera instancia según un estudio realizado en la cuenca alta del Río Bogotá en el cual se evidencian concentraciones de Cromo entre los 0,142 mg/L para el 2013 aguas arriba de Villapinzón y 1,201 mg/L para el 2014 aguas abajo de Villapinzón (Castañeda Ardila & Florian Murcia, 2019) y, en segunda instancia mediante los valores obtenidos de Cr (VI) en dos puntos de monitoreo en la cuenca del Río Bogotá

siendo estos 210 mg/Kg en San Pedro en el municipio de Villapinzón y 80,4 mg/Kg en el Puente Tulio Botero en el municipio de Tocancipá (IDEAM, 2022).

Teniendo en cuenta la problemática mencionada, existen diversos métodos de tratamiento para el control de metales pesados dentro de los cuales se encuentran precipitación química (Feng, Aldrich, & Tan, 2000) (Feng et al., 2000), electrodiálisis (Mohammadi, Moheb, Sadrzade, & Razmi, 2005), intercambio iónico (Dą browski, Hubicki, Podkościelny, & Robens, 2004)(Dą browski et al., 2004), separación por membrana (Molinari, Argurio, & Poerio, 2009)(Molinari et al., 2009) y adsorción (BULUT & TEZ, 2007), no obstante, en su mayoría estos métodos poseen costos elevados y no presentan eficiencia cuando los metales pesados se encuentran en concentraciones bajas (Duarte R., Olivero Verbel, & Jaramillo C., 2009) (Duarte R. et al., 2009).

Dentro de los métodos anteriormente mencionados resalta la utilización de materiales adsorbentes como la cascarilla de arroz, el cual es un residuo de los cultivos de arroz que, mediante distintos métodos se han encontrado múltiples aplicaciones de esta como base para la preparación de materiales adsorbentes que permitan el tratamiento de efluentes contaminados con aguas industriales (Rodríguez, Salinas, Ríos, & Vargas, 2012) (Rodríguez et al., 2012) ya que presenta características favorables como una alta eficiencia, bajo costo y fácil manejo (Llanos Páez, Ríos Navarro, Jaramillo Páez, & Rodríguez Herrera, 2016) (Llanos Páez et al., 2016). Gracias a esto, se han realizado estudios como *“Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres”* (Rodríguez, Salinas, Ríos, & Vargas, 2012) (Rodríguez et al., 2012), *“Adsorción de rojo 40 sobre cascarilla de arroz: determinación del equilibrio, cinética y termodinámica”* (Amaringo Villa & Hormaza, 2018), *“Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo”* (Doria Herrera et al., 2011), *“Estudio comparativo de la adsorción de aluminio de disoluciones acuosas usando quitosano y cascarilla de arroz”* (Álvarez Trejos, Blanco González, & Benavente Silva, 2020) y *“Remoción de arsénico (III) y (V) de soluciones acuosas mediante el proceso de biosorción utilizando*

*cascarilla de Oryza Sativa (arroz) modificada con dióxido de manganeso*” (Zea Linares, 2017) en los cuales se presentaron porcentajes de remoción de 72,8% de Cr, 75,6 % de R40, 100% de Cr, 99.86% Al (III) y 100% As (III) y As (V) respectivamente, de lo que se puede concluir que para distintos tipos de contaminantes presenta un alto porcentaje de remoción.

Adicional al método ya mencionado, se emplean agentes complejantes como la 1,5-difenilcarbazida ya que este compuesto permite determinar metales pesados como Cr (VI) con mayor exactitud (Doria Herrera et al., 2013) mediante método colorimétrico, el cual se basa en una reacción redox entre el cromo hexavalente y la 1,5-difenilcarbazida en un medio necesariamente ácido dando como resultado un compuesto con coloración rojo-violeta conocido como difenilcarbazona, este compuesto puede ser medido mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 540 nm (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2023).

La 1,5-difenilcarbazida ha sido ampliamente usada en distintos estudios para la remoción de cromo hexavalente como *“Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría”* (Severiche Sierra & González García, 2013), *“Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente”* (Tejada Tovar, Villabona Ortiz, & Jiménez Villadiego, 2017) (Tejada Tovar et al., 2017) y *“Evaluación de la bio reducción del cromo hexavalente (VI) en aguas de estero salado con filtros de zuro de maíz (Zea Mays) y cascarilla de arroz (Oryza Sativa)”* (Guastay Guingla & Tinoco Chica, 2019) en los cuales se ha evidenciado que este agente complejante facilita la determinación de cromo hexavalente debido a las reacciones químicas anteriormente mencionadas.

Por consiguiente y sumado a lo anterior, para el desarrollo de estudios de remoción de contaminantes, en este caso el metal pesado Cromo, se tuvieron en cuenta 4 variables, siendo estas valor de pH, concentración de Cromo, dosis del adsorbente (cascarilla de arroz) y finalmente tiempo

de contacto, estas variables fueron elegidas en base a estudios anteriormente realizados principalmente el ya mencionado “Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo” (Doria Herrera, Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez, 2011) (Doria Herrera et al., 2011) en el cual se afirma qué son estas las principales variables que afectan el proceso de adsorción.

Por otra parte, las isotermas de Langmuir y Freundlich son un método que permite determinar la fuerza de adsorción y la interacción química entre el adsorbato y el adsorbente (Rao, King, & Prasanna, 2016)(Rao et al., 2016). Asimismo, en distintos estudios se han realizado análisis de remoción de contaminantes, varios mediante estas isotermas como “New silica based adsorbent material from rice straw and its in-flow application to nitrate reduction in waters: Process sustainability and scale-up possibilities” (Robles Jimarez, y otros, 2022)(Robles Jimarez et al., 2022), “Application of hydroxyapatite-modified carbonized rice husk for the adsorption of Cr(VI) from aqueous solution” (Zou, Xu, Nie, Guan, & Li, 2023), “Utilization of agricultural waste to herbicide removal: Magnetic BEA zeolite adsorbents prepared by dry-gel conversion using rice husk ash-derived SiO<sub>2</sub> for paraquat removal” (Vanpaseuth et al., 2023) y “Removal of Cr (VI) from aqueous solution by Rice-husk-based activated carbon prepared by Dual-mode heating method” (Zhang et al., 2023). Con base en lo anterior, se puede afirmar que en estudios de remoción de Cromo las isotermas de Langmuir y Freundlich se usan ampliamente para determinar la correlación entre las cantidades de Cr (VI) adsorbidas y la concentración de equilibrio de Cr (VI) en la fase acuosa (Lala et al., 2023).

## **Marco legal**

El Río Bogotá ha sido una cuenca hídrica que dispone de un contexto legislativo bastante amplio, inicialmente no se tenía conocimiento suficiente sobre su estado de contaminación debido a los escasos estudios relacionados con esta temática, debido a esto mediante el Decreto 668 de 1955 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. se crea la Comisión de Estudios del Río Bogotá, en la cual se delegaron sus funciones y su presupuesto de gastos, adicional a esto en el Decreto 2811 de 1974 se regulan sanciones por violación a la normativa vigente. Por otro lado, a causa de las investigaciones y estudios realizados en el Río Bogotá, se tuvieron registros de contaminación y vertimientos a la cuenca, por lo cual se creó el Comité de Recuperación del Río Bogotá para realizar labores de conservación mediante el Decreto 223 de 1980 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. Durante la década de los 90, el Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) era el ente gubernamental encargado de los ejes ambientales al que en el Decreto 797 de 1993 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. se le asignan nuevas funciones para asegurar la ejecución de los programas y proyectos relacionados con la descontaminación del Río Bogotá.

Desde la década de los 2000, la Secretaría Distrital de Hacienda le asigna recursos al Fondo Nacional de Regalías en el Concepto 1 de 2002 lo cual beneficia el proyecto de saneamiento del Río Bogotá, así mismo, en el 2006 se aprueba mediante la Resolución No 3194 del 23 de noviembre de 2006 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río Bogotá. Dentro de este POMCA se comienza a tener en cuenta otros ríos vinculados con el Río Bogotá, por lo cual se adoptan nuevos objetivos de calidad de DBO, SST, DQO, OD, coliformes fecales y pH para los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo y del Canal Torca dentro del perímetro urbano de Bogotá haciendo un reporte anual al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, según lo estipulado en la Resolución 5731 de 2008.

Posterior a esto se crea la Resolución 0631 de 2015 en la cual se determinan los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos de distintos sectores a cuerpos de aguas superficiales, dentro de los cuales se tienen en cuenta contaminantes como metales pesados incluyendo el metal objeto de estudio, el Cromo.

De la misma forma, surgió la necesidad de adoptar medidas de protección ambiental en un sector inundable del valle aluvial del Río Bogotá, el cual cuenta con características de humedal y alto potencial de recuperación ecológica situado en la cuenca media del río Bogotá en la Resolución 1097 de 2015 Secretaría Distrital de Ambiente como medida de mitigación para la contaminación de la cuenca del Río Bogotá.

Actualmente se encuentra vigente el POMCA 2019 de esta cuenca, el cual se usa para la planeación de los usos de suelo, agua, flora, fauna y manejo de la cuenca del Río Bogotá.

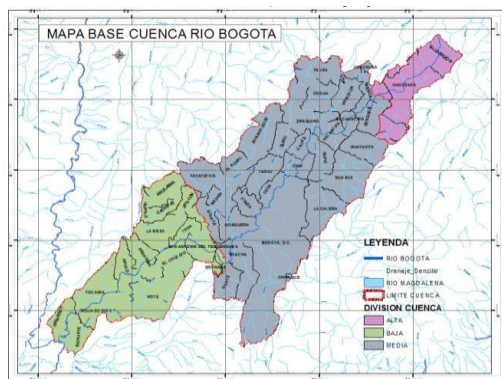
## Diseño metodológico

### Ubicación Geográfica general del Río Bogotá

La cuenca del Río Bogotá se encuentra localizada en la parte central de la Cordillera Oriental Colombiana, específicamente en la parte centro-occidental del departamento de Cundinamarca, este drenaje principal nace desde el páramo de Guacheneque en Villapinzón y desemboca por el extremo sur occidente del área, al río Magdalena en el municipio de Girardot. La cuenca posee una superficie total de 589.143 hectáreas y recorre una longitud de 347 Km (CAR, 2018), limitando en su extremo norte con el Departamento de Boyacá, en el extremo sur con el Departamento del Tolima, por otra parte, de acuerdo con el POMCA del Río Bogotá del 2019 por aspectos temáticos y prácticos, el área de la cuenca se divide en 3 partes: cuenca alta, media (Sabana de Bogotá), y baja.

**Figura 1**

Mapa base de la cuenca del Río Bogotá, en la cual se presenta la subdivisión en cuenca alta, media y baja

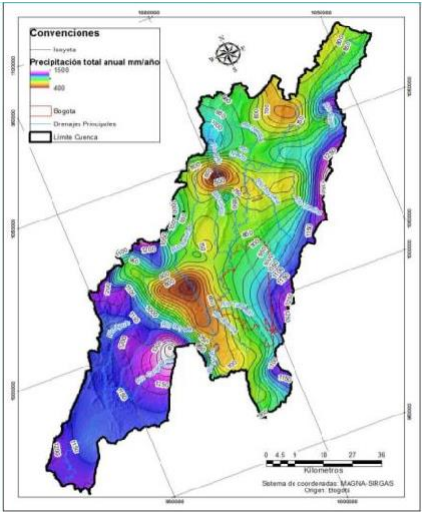


Nota. Tomado de POMCA Río Bogotá, 2019

De acuerdo con lo anterior, la CAR ha realizado estudios temporales de precipitación y temperatura por medio de estaciones meteorológicas a través de la cuenca, los cuales determinan precipitaciones oscilantes desde 1.500 mm/año hasta 600 mm/año. En cuanto a temperatura, según el POMCA del Río Bogotá del 2019 los valores de temperatura mínima oscilan entre los 0 y 23°C en la cuenca media-alta y 23°C en la cuenca baja del Río Bogotá, por otra parte, se tienen valores máximos entre los 19 °C para la cuenca alta, 20 °C en la cuenca media y de 36 °C en la cuenca baja.

**Figura 2**

Distribución de la precipitación total multianual en la cuenca del Río Bogotá



Nota. Tomado de POMCA Río Bogotá, 2019



Por otro lado, Girardot se encuentra ubicada a 289 metros sobre el nivel del mar, lo que lo convierte en una zona tropical con un clima cálido y seco, sus temperaturas oscilan entre 20 y 39 °C, siendo la temperatura promedio anual de 33.3 °C (Alcaldía Municipal de Girardot, 2022). Por último, de acuerdo con los estudios realizados por la compañía de previsión meteorológica Weather Spark, Girardot tiene una precipitación media anual de 103,25 mm (Weather Spark, 2022).

**Universo, población y muestra** Universo: Río Bogotá Población: Cuenca baja y media

Muestra: Girardot, desembocadura del Río Bogotá al Río Magdalena

**Métodos, técnicas e instrumentos de análisis:**

1. Métodos de modificación química y física de cascarilla de arroz
2. Métodos estadísticos de análisis (Isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir)
3. Métodos espectroscópicos de análisis de compuestos (espectrofotometría visible)
4. Standard methods for the examination of water and wastewater (23th edition).
5. Toma de muestras de aguas residuales (IDEAM)

### **Recursos Humanos:**

Estudiantes de proyecto de investigación: Saray Correcha y Camila A. Lozano

### **Recursos Institucionales**

1. Alcaldía Municipal de Girardot: Información general del área de interés para el proyecto.
2. Universidad de Cundinamarca: Asesorías de docentes capacitados en el tema, infraestructura y financiamiento.
3. Corporación autónoma Regional (CAR): Información de la cuenca del Río Bogotá, específicamente de la cuenca baja.

### **Físicos, logísticos y/o técnicos**

1. Instalaciones de la universidad de Cundinamarca: Laboratorio de aguas.
2. Equipos, materiales e insumos requeridos para el desarrollo del trabajo de grado

## Metodología

Para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento de los objetivos propuestos, en esta investigación se desarrollaron 5 fases que se describen a continuación:

### Fase 1. Preparación y modificaciones físicas y químicas de la cascarilla de arroz

**1.1 Preparación:** la biomasa a utilizar (181 g de cascarilla de arroz) se adquirió en el molino de Arroz Diana, ubicado en el km 1 Avenida Idema, Zona Industrial del municipio de El Espinal-Tolima. La cascarilla de arroz a utilizar proviene de 5 variedades de semillas genéticamente modificadas y certificadas por la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) sembradas en esa región del Tolima. Posteriormente se realizó la limpieza manual de la cascarilla, se trituró por medio de un molino manual y se tamizó con el fin de obtener partículas homogéneas con tamaño  $>500 \mu\text{m}$ . Por último, la muestra se separó en dos partes iguales para realizar la respectiva modificación química o física.

#### Figura 4

Proceso de triturado y tamizado de la cascarilla de arroz.



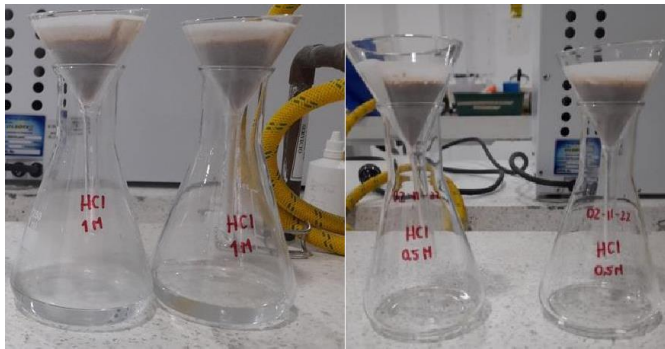
Nota. Elaboración propia

**1.2. Modificación química:** se tomaron 10 gramos de la muestra de cascarilla de arroz para su modificación química (de ahora en adelante CAMQ) donde fue sometida a 4 horas de contacto con HCl 0.5 M en agitación a 250 rpm (Doria Herrera et al. Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez, 2010), al finalizar, fue filtrada y lavada con agua destilada cuatro veces, posteriormente el material se llevó a secado durante 48 horas en un horno a 40°C.

**1.3. Modificación fisicoquímica:** por otra parte, se pesaron otros 10 gramos para su modificación fisicoquímica (de ahora en adelante CAMF) se lavó con una solución diluida de HCl a 1.0 M y pasó por un proceso de filtrado realizando múltiples lavados con agua destilada, posterior a esto, mediante el uso de una cafetera italiana el material se ubicó en el filtro metálico, se llenó con agua destilada la cámara y finalmente se calentó hasta evaporación y condensación del agua en el sistema, proceso que se repitió tres 3 veces. Finalmente, el material se secó a 90°C durante 24 horas en un horno de convección.

**Figura 5**

Proceso de lavado de la cascarilla de arroz después de la modificación.



Nota. Elaboración propia

## **Fase 2. Preparación del efluente simulado**

La preparación de las soluciones de referencia se realizó de acuerdo con el *Standard methods for the examination of water and wastewater* disolviendo en agua destilada  $K_2Cr_2O_7$  (dicromato de potasio) teniendo en cuenta el cambio de variables como pH y temperatura, adicional a lo anterior, se preparó una solución de 1,5-difenilcarbazida disuelta en acetona como agente acomplejante para determinar con mayor exactitud la presencia de cromo hexavalente (Doria Herrera, Paz Ordoñez, & Hormaza Anaguano, 2013), posteriormente la absorbancia se registró a una longitud de onda  $\lambda$  oscilante de 540 nm usando un espectrofotómetro JENWAY 6305 VIS, mediante el cual se realizaron los cálculos de concentración respectiva mediante una curva de calibración que relacionó la concentración y la absorbancia de las sustancias de referencia (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2023).

## **Fase 3. Toma de muestras**

Investigaciones realizadas en la cuenca baja del Río Bogotá han evidenciado su alta contaminación por metales pesados, lo cual conlleva a numerosas afectaciones medioambientales y sanitarias. Las muestras se tomaron en la cuenca del Río Bogotá en los diferentes puntos con sus respectivas coordenadas (Tabla 1) siguiendo la metodología establecida en *Standard methods for the examination of water and wastewater 23th edition*, posteriormente se llevaron al laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca Seccional Girardot donde se realizaron los análisis fisicoquímicos de estas muestras (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2023)

Tabla 1

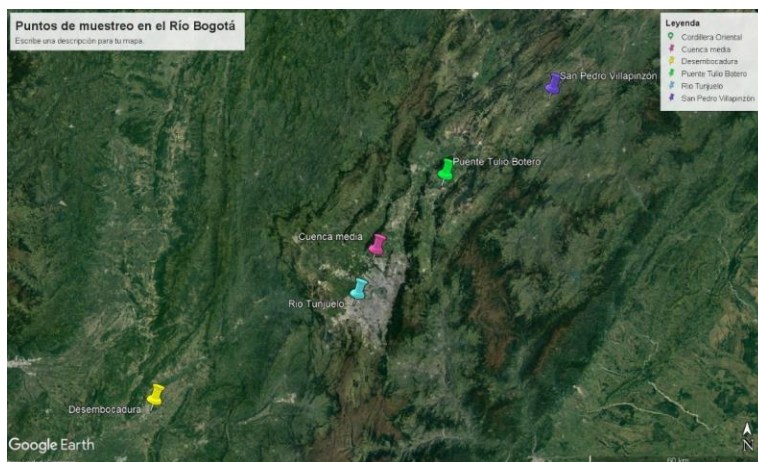
Puntos de muestreo con coordenadas geográficas.

Nombre	<u>Coordenadas geográficas</u>	
	N	O
Cuenca media	4°44'49.72"	74° 7'31.83"
Río Tunjuelo	4°36'49.83"	74°10'53.17 "
Desembocadura	4°17'40.83"	74°47'39.01 "

Nota. Elaboración propia

**Figura 6**

Puntos de muestreo determinados y puntos de muestreo realizados de acuerdo con el ENA 2022.



Nota. Elaboración propia mediante Gogle Earth

### Figura 7

Punto de muestreo antes de la desembocadura del Río Bogotá al Río Magdalena



Nota. Elaboración propia mediante Google Earth

### Figura 8

Punto de muestreo en el Río Tunjuelo.



Nota. Elaboración propia mediante Google Earth

## Figura 9

Punto de muestreo en la cuenca media del Río Bogotá.



Nota. Elaboración propia mediante Google Earth

### Fase 4. Evaluación de la eficiencia de la cascarilla de arroz en el agua del Río Bogotá

En esta fase se determinó a escala laboratorio controlado la eficiencia de remoción de  $\text{Cr}^{6+}$  de la cascarilla de arroz en una muestra real de la cuenca baja del río. El análisis de este proceso se realizó luego de optimizar las variables en el efluente simulado respecto a la adsorción de  $\text{Cr}(\text{VI})$  proveniente del Río Bogotá.

### Fase 5. Isotermas de adsorción.

Mediante la isoterma de Langmuir se estudió la remoción de Cromo en medio acuoso ya que este modelo de isoterma describe el equilibrio existente entre la superficie del adsorbente y la solución permitiendo evidenciar el comportamiento de adsorción de los métodos implementados. La ecuación se expresa como acumulación de masa del adsorbato sobre el adsorbente de la siguiente manera (Andrade Espinosa, 2007):

$$q_A = \frac{Q_M b_A C_A}{1 + b_A C_A}$$

Donde:

$q_A$  Masa del soluto adsorbido por el adsorbente (mg adto/ mg adte)  $C_A$  Concentración en el equilibrio del adsorbato (mg/L)

$Q_M$  Cantidad máxima del adsorbato adsorbida por el adsorbente (mg adto/ mg adte)  $b_A$  Constante de adsorción de Langmuir (L/mg)

Por otra parte, se empleó la isoterma de Freundlich dado que es una isoterma de adsorción que se utiliza para superficies heterogéneas, siendo esta (Rivas et al., Núñez, Longoria, & González, 2014):

$$\log \frac{x}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log c$$

Donde:

$x$  Masa de adsorbato

$m$  Masa de adsorbente

$c$  Concentración de equilibrio de adsorbato en caso de experimentos realizados con una solución acuosa en contacto con una fase sólida dispersa (especies disueltas / especies adsorbidas).

$K$  y  $n$  Constantes para un adsorbato dado y adsorbente a una temperatura dada.

Para poder determinar el modelo de isoterma más acorde a la investigación, se tomó la regresión lineal como método criterio y de comparación para los coeficientes de regresión finalmente obtenidos (Eggs et al., Salvarezza, Azario, Fernández, & García, 2012).

## Resultados y discusión

Inicialmente al realizar el proceso de modificación fisicoquímica y química de la cascarilla de arroz se obtuvieron dos tipos de adsorbentes (CAMF y CAMQ) como se muestra en la Figura 10 con un rendimiento del 96%. Luego para llevar a cabo la fase de preparación y medición del efluente simulado fue necesario hacer uso de la técnica analítica de colorimetría por medio del 1,5-difenilcabazida como agente acomplejante de Cr(VI), teniendo en cuenta que este posee una gran exactitud y precisión en la cuantificación de metales presentes en concentraciones mayores a 0,1 mg/L (Doria Herrera, Paz Ordoñez, & Hormaza Anaguano, 2013). En este sentido, el agente acomplejante produce una reacción de oxido-reducción (Figura 10) al entrar en contacto con el Cr(VI) en un medio ácido, formando cromo III y 1,5-difenilcarbazona de color rojo-violeta, el cual es medido en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm (Pérez, y otros, 2014).

**Figura 10**

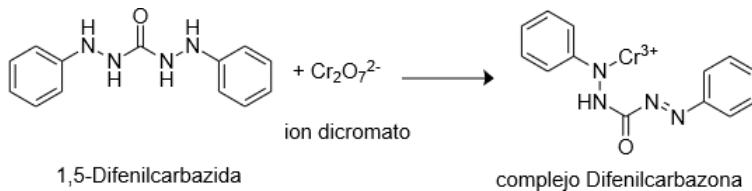
Proceso de modificación fisicoquímica de la cascarilla de arroz.



Nota. Elaboración propia

**Figura 11**

Reacción de oxido-reducción entre el 1,5-difenilcarbazida y el Cr(VI).

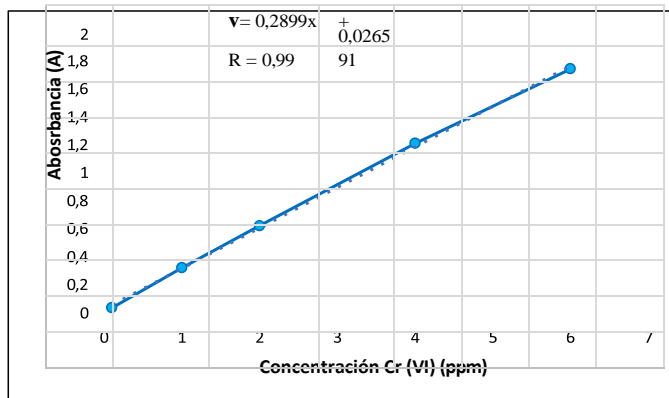


Fuente: elaboración propia

De este modo, se realizó la curva de calibración que relacionó la concentración de Cr (VI) en ppm y la Absorbancia (A) en un intervalo de 0,1- 6,0 ppm de Cr (VI) obteniendo una R de 0,9991 como se observa en la Figura 12 dato que fue necesario para la determinación de Cr(VI) mediante el método espectrofotométrico y para establecer los valores iniciales de las variables de análisis en los ensayos de adsorción.

**Figura 12**

Curva de calibración de Cromo hexavalente



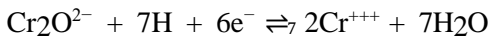
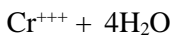
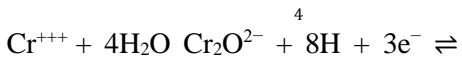
Nota. Elaboración propia

## Efecto del pH

Para determinar la influencia del pH en la adsorción de Cr (VI) con la biomasa modificada y establecer el valor óptimo de pH en el cual se produce una mayor remoción de Cr (VI) fue necesario realizar 6 ensayos en los cuales se tomaron valores de pH 1, 3 y 5 para CAMF y CAMQ. En este sentido los resultados indican que el pH posee un efecto amortiguador en los iones metálicos en solución, ocasionando que su estado de oxidación varíe de acuerdo con las condiciones en las cuales se encuentre el medio, lo que favorece la reacción de óxido reducción del Cr (VI) en un pH ácido (Doria Herrera et al., Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez, 2010) como se evidencia en la figura 13.

### Figura 13

Efecto de óxido reducción sobre el Cr (VI)



Nota. Tomado de Doria Herrera et al., Hormaza Anaguano, & Gallego Suarez (2011).

De acuerdo con lo anterior, se realizaron los ensayos con los siguientes parámetros fijos: dosis del adsorbente de 3 g/L, tiempo de agitación 60 minutos, velocidad de agitación 250 rpm, con una concentración inicial de Cr (VI) de 5 mg/L y una concentración del agente acomplejante 1,5-difenilcabazida 0,01M, obteniendo porcentajes de remoción superiores al 98% para pH de 1 y 3 como se muestra en la tabla 2. En el caso de pH 5 no se evidenció % de remoción, esto concuerda con lo establecido por Bansal (2009) dado que a pH menos ácidos se presenta competencia entre los iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  para su adherencia en la superficie del adsorbente (Bansal, Garg, Singh, & Garg,

2009). En este sentido los resultados indican que la relación entre el pH y el agente acomplejante para determinar el porcentaje de remoción ideal, presenta mayor eficiencia a pH bajos tal como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 2.**

Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de pH

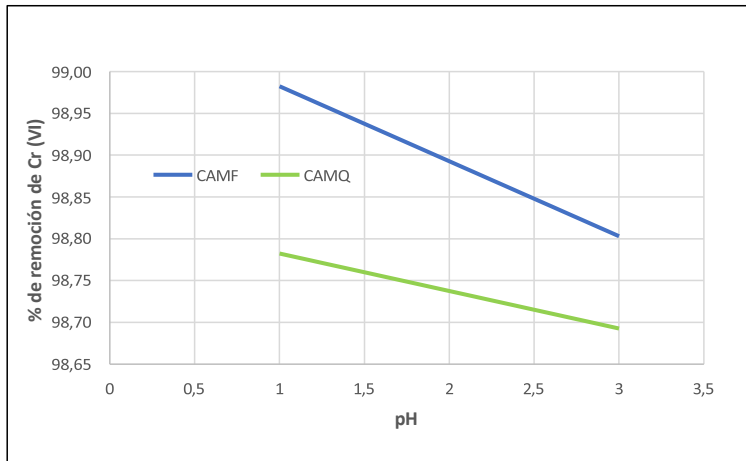
pH	% de remoción de Cr (VI)	
	CAMF	CAMQ
1	98,98	98,78
3	98,80	98,69
5	/	/

Nota. Elaboración propia

Por ende, según los porcentajes de remoción obtenidos, se pudo establecer que a un valor de pH 1 la CAMF y la CAMQ presentaron mayor remoción de Cr (VI) siendo la CAMF la que presentó el porcentaje de remoción más alto, como se muestra en la Figura 14.

#### **Figura 14**

Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de pH 1 y 3.



Nota. Elaboración propia

### Efecto de la dosis del adsorbente

Teniendo en cuenta los resultados del primer ensayo (pH), para la variable de dosis del adsorbente se utilizó un único valor de pH siendo este 1, variando las dosis del adsorbente (CAMF y CAMQ) en 3 g/L, 6 g/L, 9 g/L, 15 g/L y 20 g/L, manteniendo las variables de tiempo de agitación en 60 minutos, la velocidad de agitación en 250 rpm, la concentración inicial de Cr (VI) en 5 mg/L y la concentración del agente acomplexante 1,5-difenilcarbazida en 0,01M. De este modo, al realizar los ensayos con las diferentes dosis del adsorbente se obtuvieron los porcentajes de remoción de Cr (VI) evidenciados en la tabla 3.

**Tabla 3**

Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de dosis del adsorbente.

Dosis del adsorbente (g/L)	% de remoción de Cr (VI)	
	CAMF	CAMQ

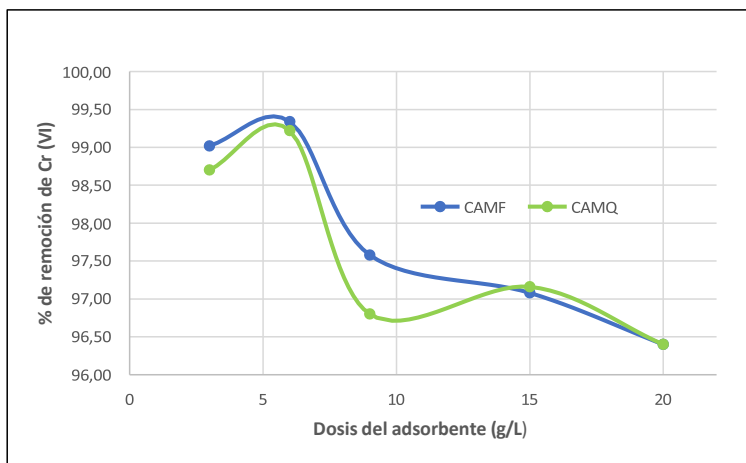
3	99,02	98,70
6	99,34	99,22
9	97,58	96,80
15	97,08	97,16
20	96,40	96,40

Nota. Elaboración propia

Con base a los resultados obtenidos se realizó una gráfica de líneas, en la cual se evidencian los porcentajes de remoción de Cr (VI) para cada dosis del adsorbente presente en la tabla 11. Asimismo, la figura 15 permite identificar que a una dosis de 6 g/L se encuentra el mayor porcentaje de adsorción siendo este de 99,34% para la CAMF y 99,22% para la CAMQ. Teniendo en cuenta lo anterior y las curvas representadas en la gráfica, se puede afirmar que una dosis de adsorbente mayor a 6 g/L disminuye la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz debido a la saturación de Cr (VI) en esta, lo cual puede justificarse con la anotación de Gupta & Babu, 2009, como consecuencia de la superposición de los sitios activos dando paso a la acumulación de partículas de Cr (VI).

**Figura 15**

Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de dosis del adsorbente (g/L)



Nota. Elaboración propia

### Efecto del tiempo de contacto

Para la preparación de los ensayos correspondientes a la variable de tiempo de contacto se mantuvieron parámetros fijos de pH 1, dosis del adsorbente de 6 g/L, concentración inicial de Cr (VI) de 5 mg/L, concentración del agente acomplejante 1,5- difenilcarbazona de 0,01M, mediante los ensayos realizados se monitoreo el tiempo de contacto con los valores presentes en la tabla 12, encontrando que el tiempo óptimo para la remoción del Cr (VI) es de 1440 min.

**Tabla 4**

Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de tiempo de contacto.

Tiempo (min)	% de remoción de Cr (VI)	
	CAMF	CAMQ
60	95,86	97,16

180	97,12	97,10
360	96,94	97,44
720	95,32	95,86
1440	96,96	98,44

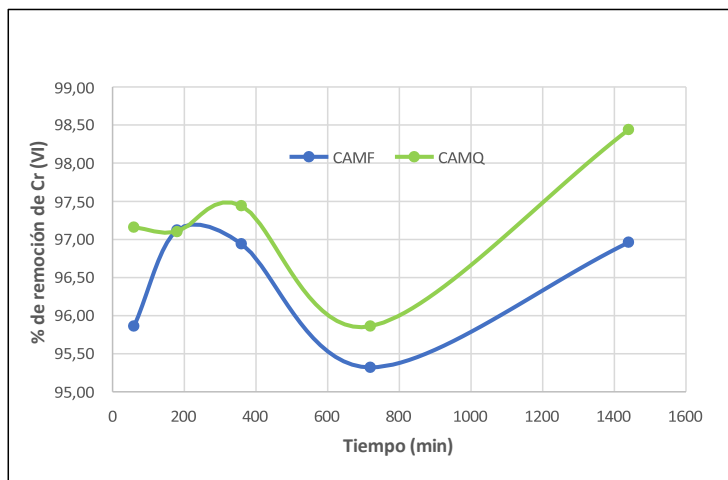
Nota. Elaboración propia

Respecto a la figura 16, se puede observar que a partir de los 180 minutos (3 h) la adsorción del complejo de Cr (VI) empieza a aumentar, alcanzando porcentajes de 97,12% para la CAMF y 97,10% para la CAMQ. Esto concuerda con lo establecido por Zou (2023) dado que los adsorbentes modificados disponen de sitios superficiales vacíos donde el complejo dispuesto para la reacción de adsorción facilita y acelera el proceso entre los 180 y los 360 minutos (Zou et al., 2023) En consecuencia, los resultados indican que entre los 360 min (6 h) y 720 min (12 h) se presenta una disminución en la adsorción del complejo de Cr (VI), dado que en ese tiempo una gran parte de los sitios de adsorción estaban ocupados por el complejo de Cr (VI) generando una fuerza de repulsión entre las moléculas del adsorbato en medio acuoso y las moléculas ya presentes en la superficie del adsorbente (Rajoriya et al., 2007).

Sin embargo, al completar los 1440 minutos de contacto, se observa una adsorción de 96,96% para la CAMF y de 98,44% para la CAMQ logrando la máxima adsorción de Cr (VI), de lo cual se puede afirmar que el porcentaje de eliminación aumenta junto con la prolongación del tiempo de contacto, tal como lo asegura Zou y colaboradores (2023), los cuales establecen que el tiempo para fijar el equilibrio de adsorción de la cascarilla de arroz es de 24 h.

**Figura 16**

Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de tiempo de contacto (min)



Nota. Elaboración propia

### Efecto de la concentración de Cr (VI)

Para determinar la concentración ideal de adsorbato se realizaron cinco ensayos variando la concentración de Cr (VI) del efluente simulado, a su vez, las demás variables se mantuvieron constantes de acuerdo con los valores óptimos obtenidos, siendo estos pH 1, dosis del adsorbente de 6 g/L, tiempo de contacto de 1440 min y concentración del agente acomplejante 1,5-difenilcarbazida de 0,01M.

**Tabla 5**

Tabla de porcentajes de remoción de Cr (VI) para la variable de concentración de Cr (VI).

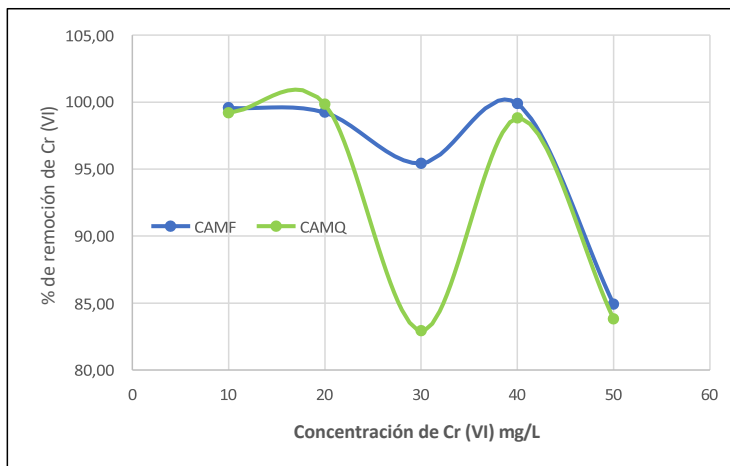
Concentración de Cr (VI) (mg/L)	remoción de Cr (VI)	
	CAM F	CAM Q
10	99,56	99,18
20	99,22	99,84
30	95,42	82,92
40	99,88	98,80
50	84,90	83,80

Nota. Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observó que a concentraciones de 10 mg/L y 20 mg/L la CAMF y CAMQ tuvieron un % de remoción por encima del 99%, sin embargo, a 30 mg/L se presentó una notable disminución en la adsorción de Cr(VI), teniendo en cuenta esto, es importante aclarar que los ensayos se realizaron mediante procesos continuos, es decir, estos no dependen únicamente de la variable de concentración inicial de Cromo, sino de otros factores como la temperatura en el caso del agente acomplejante el cual debe ser conservado a una temperatura entre los 2 y 8 °C ya que este se descompone en presencia de luz y temperatura ambiente dando como resultado una disolución amarilla-marrón (Sánchez Rodríguez, 2020), lo que pudo ser un factor influyente en la disminución de remoción de Cr(VI) en los ensayos realizados a 30 mg/L. Por otra parte, para 40 mg/L el porcentaje de remoción aumenta en comparación a 30 mg/L, sin embargo, este es menor al contrastarlo con los valores de 10 mg/L y 20 mg/L, asimismo, para 50 mg/L se presenta una disminución en el porcentaje de remoción de la CAMF y CAMQ siendo estos 84,90% y 83,80% respectivamente debido a la saturación gradual de la disponibilidad de los sitios de enlace entre el Cr (VI) y la cascarilla de arroz tal como lo describen Llanos y colaboradores (2016).

**Figura 17**

Grafica de líneas del % de remoción de Cr (VI) para la variable de concentración del Cr (VI) (mg/L)



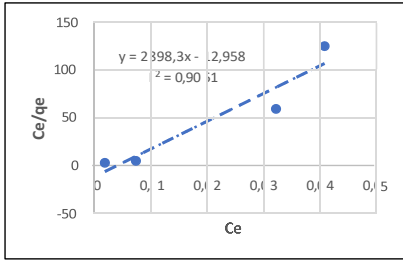
Nota. Elaboración propia

## **Isotermas de Langmuir y Freundlich**

Los ensayos realizados permitieron establecer las variables ideales para determinar la capacidad que tienen los adsorbentes elaborados en la remoción de Cromo (VI). En este sentido, la isoterma de Langmuir ha sido bastante utilizada para representar la adsorción de distintos compuestos como metales pesados, contaminantes orgánicos, colorantes, entre otros (Yang & Al-Duriv, 2005); esta isoterma asume que la mezcla entre adsorbato y adsorbente es homogénea dando como resultado que el adsorbato se encuentre en igual medida en todos los sitios de la mezcla y que la adsorción en uno de los sitios no presenta repercusiones en la adsorción en otros sitios próximos (Langmuir, 1918). Por otra parte, la isoterma de Freundlich permite establecer la relación entre la cantidad de soluto adsorbida en determinada masa del adsorbente y la concentración de soluto en la solución, cabe destacar que esta no es constante si se presentan variaciones en las concentraciones (Freundlich, 1907), Por otra parte, se puede realizar un análisis complementario a las isotermas de Langmuir y Freundlich teniendo en cuenta el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) el cual evidencia que, si este se encuentra en un rango entre 0 y 1, presenta una adsorción favorable a medida que presente mayor proximidad a 1, sin embargo, si su valor excede a 1 indica una adsorción desfavorable (Gupta & Babu, 2009).

**Figura 18**

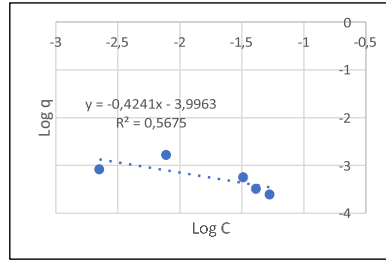
Isoterma de Langmuir para CAMF



Nota. Elaboración propia

**Figura 19**

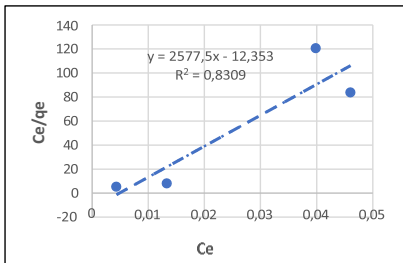
Isoterma de Freundlich para CAMF



Nota. Elaboración propia

**Figura 20**

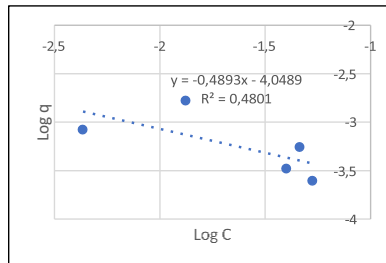
Isoterma de Langmuir para la CAMQ



Nota. Elaboración propia

**Figura 21**

Isoterma de Freundlich para la CAMQ



Nota. Elaboración propia

Teniendo en cuenta las gráficas 18y 19 para la CAMF y graficas 20 y 21 para la CAMQ, se puede determinar que el coeficiente de determinación para la isoterma de Langmuir fue de  $R^2=0,9051$  para la CAMF y  $R^2=0,8309$  para la CAMQ, mientras que en el caso de la isoterma de Freundlich sus valores fueron de  $R^2=0,5676$  para la CAMF y  $R^2=0,4801$  para la CAMQ, lo cual evidencia que la adsorción de Cr(VI) presenta un mayor ajuste para la isoterma de Langmuir en ambos casos (CAMF y CAMQ) ya que se cuenta con valores más cercano a 1, lo que indica que se logró una adsorción monocapa de Cr (VI) sobre la superficie de la cascarilla de arroz (Langmuir, 1918), contrastado con el estudio realizado por Robles Jimarez y et al. (2023)

## **Resultados de los ensayos en agua del Río Bogotá**

Según el Estudio Nacional del Agua 2022, se realizaron 136 muestreos de metales pesados de los cuales dos de estos puntos se situaban en la cuenca del Río Bogotá, uno en el punto de San Pedro en el municipio de Villapinzón en el que se tuvieron registros de 210 mg/kg de Cromo y el segundo situado en el Puente Tulio Botero en el municipio de Tocancipá con valores de 80,4 mg/kg de Cromo. Por otra parte, entre la distancia y trayecto recorrido por el Río Bogotá desde los puntos mencionados hasta la cuenca baja, siendo este de aproximadamente 170 km, se pueden presentar algunos factores que afecten la disponibilidad del ion Cr (VI) tales como el pH del suelo, la interacción de este metal con otros elementos y con compuestos orgánicos quelados (Severiche Sierra & González García, 2013), ya que al entrar en contacto con estos últimos el Cr (VI) sufre una reacción de óxido reducción dando como resultado Cr (III) motivo por el cual la concentración del ion Cr (VI) en los puntos de muestreo determinados y los puntos de muestreo establecidos por el ENA presenta valores muy bajos que no se encuentran dentro del rango de detección en espectrofotométrica el cual es de 0,025 ppm y el límite de cuantificación el cual es de 0,085 ppm (Medina & Pozo P., 2010).

### **Eficiencia CAMQ y CAMF**

De acuerdo con los dos tratamientos realizados a la cascarilla de arroz, se evidenció mayor eficiencia en los porcentajes de remoción de Cr(VI) con la CAMF, esto teniendo cuenta que el tratamiento con vapor en la cafetera italiana y las altas temperaturas a la que fue sometida (90 °C por 24 horas) permite remover la lignina y los azúcares hemicelulósicos presentes en la cascarilla de arroz (Piñeros Castro, Velasco, Proaños, Cortes, & Ballesteros, 2011); la lignina forma parte de la pared celular del tejido vascular el cual brinda rigidez estructural y resistencia a la tensión y presión hídrica [Maceda et al., 2022](#)), así como los azúcares hemicelulosos que sirven como medio de unión entre la lignina y la celulosa (Martínez Burgos, 2013) lo que permite una mayor adsorción del Cr (VI) en el medio acuoso.

## Conclusiones

Los ensayos de adsorción realizados evidenciaron resultados satisfactorios como lo indica el análisis estadístico al que fueron sometidos, obteniendo porcentajes de remoción de hasta un 99,88%, siendo, la CAMF la cual presentó valores de remoción más altos en la mayoría de los ensayos realizados, sumado a esto, se obtuvo que los valores óptimos de las variables utilizadas para la remoción de Cr (VI) fueron de pH 1, dosis del adsorbente de 6 g/L, tiempo de contacto de 1440 min (24 h) y concentración de Cr (VI) de 10 mg/L dando como resultado un porcentaje de remoción de 99,56% para la CAMF y 99,18% para la CAMQ. De acuerdo con los porcentajes mencionados anteriormente, se logró determinar que el proceso de modificación fisicoquímica mediante la cafetera italiana permitió una mejor remoción de Cr (VI) en las muestras del efluente simulado en el laboratorio.

Por otra parte, el agente complejante 1,5-difenilcarbazida permitió determinar con facilidad Cr (VI) mediante el complejo 1,5-difenilcarbazona para los efluentes simulados. Sin embargo, no se logró establecer la concentración de Cr (VI) en las muestras de agua del Río Bogotá dado que presentaban valores muy bajos, de este modo, se puede afirmar que en la cuenca baja del Río Bogotá se cumple con la Resolución 0631 de 2015 la cual establece un límite máximo permisible entre 0,5 y 1,00 mg/L de Cr en vertimientos a cuerpos de aguas superficiales.

Por último, la cascarilla de arroz modificada en esta investigación presentó una alta eficiencia en la remoción del Cr (VI) y, en el caso de la CAMQ, a pesar de presentar menor remoción en comparación con la CAMF presenta una alta viabilidad, alcanzando porcentajes de remoción entre 82,92% y 99,84% por lo que este método es factible para el tratamiento de vertimientos de aguas y cuerpos de aguas superficiales contaminados con Cr (VI).

## **Recomendaciones**

Para futuros análisis de adsorción de Cr (VI), se sugiere la adaptación del sistema de adsorción en campo y posteriores estudios de investigación implementando la cascarilla de arroz como adsorbente. En este sentido se recomienda durante el proceso de modificación, realizar el lavado de la cascarilla de arroz hasta que el agua filtrada sea totalmente incolora con el fin de eliminar todo tipo de impurezas y excesos de reactivos que pueda afectar la reacción entre el Cr (VI) y la 1,5-difenilcarbazida o la reacción de adsorción entre el adsorbato y adsorbente.

Adicional a esto, es pertinente realizar la preparación de agente complejante 1,5-difenilcarbazida al momento de usarse en las muestras, debido a que este se descompone rápidamente ante las alteraciones de factores como temperatura y presencia de luz, por consiguiente, previo a la reacción del Cr (VI) con la 1,5-difenilcarbazida es recomendable someter la muestra a digestión ácida y oxidación con permanganato de potasio.

Finalmente, teniendo en cuenta que la cascarilla de arroz es un material que presenta alta eficiencia de remoción, bajo costo y facilidad en su uso como material adsorbente, se recomienda seguir profundizando en el estudio de la cascarilla de arroz como adsorbente de contaminantes en cuerpos hídricos, así como realizar este u otros estudios relacionados en la cuenca media y alta, ya que en estos puntos se presenta mayor concentración de contaminantes principalmente por vertimientos.

## Referencias bibliográficas

Agencia Nacional de Minería. (15 de agosto de 2001). *Ley 685 de 2001 por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Agencia Nacional de Minería:

[https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley\\_685\\_2001\\_0.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley_685_2001_0.pdf)

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (17 de noviembre de 1955). *Decreto 668 de 1955*.

Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.: <https://bit.ly/3AT0znW>

Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (5 de marzo de 1980). *Decreto 223 de 1980*. Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá: <https://bit.ly/3RhYWWH>

Alcaldía Municipal de Girardot. (2022). *Información del municipio*. Obtenido de Alcaldía Municipal de Girardot, Cundinamarca: <https://bit.ly/3RdO1wM>

Alianza por la Minería Responsable. (noviembre de 2016). *Aspectos ambientales de la pequeña minería*.

Obtenido de Alianza por la minería responsable: <https://bit.ly/3PGueF6>

Álvarez Trejos, A., Blanco González, V., & Benavente Silva, M. (2020). Estudio comparativo de la adsorción de aluminio de disoluciones acuosas usando quitosano y cascarilla de arroz. *Ciencia y Tecnología*, 21-29.

Amaringo Villa, F. A., & Hormaza, A. d. (2018). Adsorción de rojo 40 sobre cascarilla de arroz: determinación del equilibrio, cinética y termodinámica. *Revista Tecnura*, 13-28.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: American Public Health Association.

Andrade Espinosa, G. (septiembre de 2007). *Activación y caracterización de materiales nanoestructurados (CNx y CST): Remoción de cadmio*. Obtenido de Instituto Potosino de Investigación Científica y

Tecnológica, A.C.: <https://bit.ly/3wDlpnA>

Asojuntas Girardot. (2012). *Girardot - Cundinamarca*. Obtenido de ASOCIACIÓN MUNICIPAL DE JUNTAS DE ACCIÓN COMUNAL: <https://bit.ly/3ASKfn3>

Bansal, M., Garg, U., Singh, D., & Garg, V. (2009). Removal of Cr(VI) from aqueous solutions using pre-consumer processing agricultural waste: A case study of rice husk. *Journal of Hazardous Materials*, 312-320.

BULUT, Y., & TEZ, Z. (2007). Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption. *Journal of Environmental Sciences*, 160-166.

Camelo Páez, H. J. (2006). Aplicación de una herramienta para el análisis del impacto de la cuenca baja del Río Bogotá en la calidad del agua del Río Magdalena (tramo Girardot - Honda). *Repositorio Universidad de los Andes*, 1-96.

CAR. (23 de noviembre de 2006). *Resolución 3194 de 2006*. Obtenido de CAR: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25224f050c.pdf>

CAR. (2009). *Evaluación Ambiental Y Plan de Gestión Ambiental*. Obtenido de CAR: [http://oaica.car.gov.co/archivos/1393271399evaluacionambientalvolumeni\(1\).pdf](http://oaica.car.gov.co/archivos/1393271399evaluacionambientalvolumeni(1).pdf)

CAR. (2018). *DONDE NACE Y DESEMBOCA EL RÍO BOGOTÁ*. Obtenido de CAR

Vive el Río Bogotá: [https://www.car.gov.co/rio\\_bogota](https://www.car.gov.co/rio_bogota)

CAR. (2018). *Problemática Río Bogotá*. Obtenido de Corporación Autónoma Regional (CAR) Dirección Regional Soacha: <https://bit.ly/3wpFYoR>

Cárdenas Guzmán, M., Guerrero Cañizares, A., & Campos Pinilla, C. (14 de octubre de 2008).

*Comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en diferentes tipos de aguas de la sabana de Bogotá (Colombia)*. Obtenido de Repositorio Pontificia Universidad Javeriana:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49913201>

Castañeda Ardila, G. Y., & Florian Murcia, W. J. (2019). *EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR LA PRESENCIA DE CROMO TOTAL EN EL AGUA DEL RÍO BOGOTÁ, EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE VILLAPINZÓN Y*

*SUESCA*. Obtenido de Repositorio Universidad Santo Tomás:

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17943/2019julianaflorian.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (23 de noviembre de 2022).

*Estadísticas ambientales y de cambio climático para América Latina y el Caribe*. Obtenido de

Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL:

<https://biblioguias.cepal.org/c.php?g=934230&p=6736670#:~:text=Los%20recursos%20h%C3%ADdricos%20consisten%20en,y%20modelos%20hidrometeorol%C3%B3gicos%20e%20hidrol%C3%B3gicos.>

Conde Williams, A. d. (2013). Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada.

*Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 226-238.

Contraloría de Bogotá. (septiembre de 2020). *Aplicación de la Metodología de Evaluación Económica*

*del Daño Ambiental en el Caso de la Cuenca Media del Río Bogotá, como Herramienta del*

*ejercicio del Control Fiscal de la Contraloría de Bogotá D.C.* Obtenido de Contraloría de Bogotá:

<https://bit.ly/3AeR0ya>

Dąbrowski, A., Hubicki, Z., Podkościelny, P., & Robens, E. (2004). Selective removal of the heavy metal

ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere*, 91-106.

Decreto 475 de 1998 [con fuerza de ley]. Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua

potable. 10 de marzo de 1998. D. O. No. 43259.

Dirección Recursos Naturales. (2020). *ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO*

*BOGOTÁ, EN TÉRMINOS DE CALIDAD Y CANTIDAD.*

Obtenido de Corporación Autónoma de Cundinamarca:

<https://www.car.gov.co/uploads/files/5f6bac33e3e1b.pdf>

Doria Herrera, G. M., Hormaza Anaguano, A., & Gallego Suarez, D. (2011). Cascarilla de arroz: material

alternativo y de bajo costo. *Revista Gestión y Ambiente*, 73-84.

Doria Herrera, G. M., Paz Ordoñez, P. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013).

Estandarización de la difenilcarbazida como indicador y acomplejante en la identificación de cromo

hexavalente – Cr (VI). *Producción + Limpia*, 9-20.

Duarte R., E., Olivero Verbel, J., & Jaramillo C., B. E. (2009). REMOCIÓN DE CROMO DE AGUAS

RESIDUALES DE CURTIEMBRES USANDO QUITOSAN OBTENIDO DE DESECHOS DE

CAMARON. *Scientia Et Technica*.

- Eggs, N., Salvarezza, S., Azario, R., Fernández, N., & García, M. (2012). Adsorción de cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente. *Redalyc*, 141-151.
- Feng, D., Aldrich, C., & Tan, H. (2000). Treatment of acid mine water by use of heavy metal precipitation and ion exchange. *Minerals Engineering*, 623-642.
- Freundlich, H. (1907). Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 385 - 470.
- Función Pública de Colombia. (18 de diciembre de 1974). *Decreto 2811 de 1974*.  
Obtenido de GOV.CO: <https://bit.ly/3cp8ekH>
- Grijalva Endara, A. d., Jiménez Heiner, M. E., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Contaminación del agua y aire por agentes químicos. *Revisa Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 79-93.
- Grupo Río Bogotá. (18 de octubre de 2020). *Más de la mitad de los ríos urbanos de Bogotá tiene mala calidad de agua*. Obtenido de Semana: <https://bit.ly/3Co7p6a>
- Guastay Guingla, L. I., & Tinoco Chica, E. A. (2019). *Evaluación de la bioreducción del cromo hexavalente (VI) en aguas de estero salado con filtros de zuro de maíz (Zea Mays) y cascarilla de arroz (Oryza Sativa)*. Obtenido de Repositorio Universidad de Guayaquil:  
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/43621/1/BCIEQ-T-0421%20Guastay%20Guingla%20Lida%20Ivon%3b%20Tinoco%20Chica%20Emilio%20Alexander.pdf>
- Gupta, S., & Babu, B. (2009). Removal of toxic metal Cr(VI) from aqueous solutions using sawdust as adsorbent: Equilibrium, kinetics and regeneration studies.  
*Chemical Engineering Journal*, 352-365.
- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/125666586/Estudio+Nacional+del+Aguas+2022.pdf/53245d68-d879-477e-8dbe-f343e4fe0b9f?version=1.0>

Laboratorio ACONSA. (23 de septiembre de 2020). *Metales pesados en el agua potable: ¿deben preocuparnos? ¿se pueden minimizar?* Obtenido de Laboratorio ACONSA: <https://aconsa-lab.com/metales-pesados-en-el-agua-potable/> (2023). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution using cationic modified rice husk: Parametric optimization via Taguchi design approach. *Scientific African*, 1-11.

Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 1361–1403. descontaminación. *Producción + Limpia*, 150-160.

Maceda, A., Soto Hernández, M., Peña Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (22 de febrero de 2022).

*Lignina: composición, síntesis y evolución*. Obtenido de INECOL:

[https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2137/2337#:~:text=La%20lignina%20es%20un%20heteropol%C3%ADmero,especializadas%20en%20sost%](https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2137/2337#:~:text=La%20lignina%20es%20un%20heteropol%C3%ADmero,especializadas%20en%20sost%C3%A9n%20y%20almacenamiento%20)

[C3%A9n%20y%20almacenamiento%20\(](https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2137/2337#:~:text=La%20lignina%20es%20un%20heteropol%C3%ADmero,especializadas%20en%20sost%C3%A9n%20y%20almacenamiento%20)

Martínez Burgos, P. A. (2013). *CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y ESTRUCTURAL DE HEMICELULOSAS DE GENOTIPOS DE Eucalyptus globulus CONTRASTANTES EN DENSIDAD Y RENDIMIENTO PULPABLE*. Obtenido de Repositorio Universidad de Concepción: [http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/908/1/Tesis\\_Caracterizacion\\_Quimica\\_y\\_Estructural.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/908/1/Tesis_Caracterizacion_Quimica_y_Estructural.Image.Marked.pdf)

Martínez, Z., González, M. S., Paternina, J., & Cantero, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera. *Temas Agrarios*, 20-32.

- Medina, M. A., & Pozo P., P. (2010). 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. *infoANALÍTICA*, 83-101.
- Minambiente. (18 de abril de 2015). *Resolución 0631 de 2015*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://bit.ly/3AJYE5d>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de marzo de 2015). *Resolución 631 de 2015*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://bit.ly/3AJYE5d>
- removal from wastewater by electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 73-82.
- Molinari, R., Argurio, P., & Poerio, T. (2009). Studies of various solid membrane supports to prepare stable sandwich liquid membranes and testing copper(II) removal from aqueous media. *Separation and Purification Technology*, 166-172.
- ORARBO. (11 de mayo de 2021). *Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia*. Obtenido de Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá: <https://bit.ly/3TeagV3>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9-18.
- Pérez Bou, L., Salgado Bernal, I., Larrea Duarte, C., Martínez Sardiñas, A., Cruz Arias, M. E., & Carballo Valdés, M. E. (2018). Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 1- 12.

Pérez, S., Rosa, M., Calzado Lamela, O., Cascaret, C., Dannis, A., & Tur Naranjo, E. (2014). Adsorción de Cr(VI) por Cocos nucífera L. en residuales de Fibrocemento en Santiago de Cuba. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 9-18.

Piñeros Castro, Y., Velasco, G. A., Proaños, J., Cortes, W., & Ballesteros, I. (03 de octubre de 2011). *Producción de azúcares fermentables por hidrólisis enzimática de cascarilla de arroz pretratada mediante explosión con vapor*. Obtenido de Repositorio Universidad Industrial de Santander: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/2379/3259>

POMCA Río Bogotá. (2019). *AJUSTE DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ - FASE DE DIAGNÓSTICO*. Obtenido de Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá: <https://www.car.gov.co/vercontenido/94>

Rajoriya, R. K., Prasad, B., Mishra, I. M., & Wasewar, K. L. (2007). Adsorption of Benzaldehyde on Granular Activated Carbon: Kinetics, Equilibrium, and Thermodynamic. *Chem. Biochem. Eng. Q*, 219-226.

Rao, J. H., King, P., & Prasanna, K. Y. (2016). Experimental Investigation and Statistical Modeling of the Cadmium Adsorption in Aqueous Solution using Activated Carbon from Waste Rubber Tire. *Indian Journal of Science and Technology*, 1- 13.

Rivas, C. F., Núñez, O., Longoria, F., & González, L. (2014). Isoterma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO<sub>3</sub>. *Science*, 43-49.

Robles Jimarez, H. R., Sanjuan Navarro, L., Jornet Martínez, N., Primaz, C. T., Teruel Juanes, R., Molins Legua, C., . . . Campíns Falcó, P. (2022). New silica based adsorbent material from rice straw and its in-flow application to nitrate reduction in waters: Process sustainability and scale-up possibilities. *Science of the Total Environment*, 1-12.

- Rodríguez Forero, A., González, J. F., & Suárez, R. (2007). Bioacumulación por metales pesados en el capitán de la sabana (*Eremophilus mutisii*), habitante de la cuenca alta del Río Bogotá. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*, 1- 15.
- Rodríguez, Y. M., Salinas, L. P., Ríos, C. A., & Vargas, L. Y. (2012). Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 146-156.
- Romero Ledezma, K. P. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 45-46.
- Sánchez Rodríguez, C. (septiembre de 2020). *PUESTA A PUNTO DE UN NUEVO MÉTODO DE ANÁLISIS POR INYECCIÓN EN FLUJO (FIA) PARA LA DETERMINACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE*. Obtenido de Repositorio Universidad Politécnica de Madrid: [https://oa.upm.es/64688/1/TFG\\_CRISTINA\\_SANCHEZ\\_RODRIGUEZ.pdf](https://oa.upm.es/64688/1/TFG_CRISTINA_SANCHEZ_RODRIGUEZ.pdf)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (30 de diciembre de 2008). *Resolución 5731 de 2008*.  
Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: <https://bit.ly/3TgAeHA>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (27 de julio de 2015). *Resolución 1097 de 2015*.  
Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: <https://bit.ly/3PQdrQ4>
- Secretaría Distrital de Hacienda. (septiembre de 2002). *Concepto 1 de 2002 Secretaría Distrital de Hacienda*. Obtenido de Secretaría Distrital de Hacienda: <https://bit.ly/3Tm4gtE>
- Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá. (2014). *APROXIMACIÓN A LAS IMPLICACIONES DEL FALLO DEL CONSEJO DE ESTADO SOBRE EL RÍO BOGOTÁ EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL REGIONAL*. Obtenido de Alcaldía de Bogotá.

- Segura Triana, L. E. (2007). Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia. *Repositorio Escuela Superior de Administración Pública*, 1-142.
- Semana Sostenible. (5 de enero de 2017). *Alimentados con agua del Río Bogotá*.  
Obtenido de SemanaSostenible: <https://bit.ly/3PRgKGC>
- Severiche Sierra, C. A., & González García, H. (2013). Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. *Ingenierías USBMed*, 22-26.
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Jiménez Villadiego, M. (2017). Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 139-147.
- Téllez M., J., Carvajal Roxs, M., & Gaitán, A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina*, 50-61.
- Vanpaseuth, P., Hagio, T., Park, J.-H., Nijpanich, S., Srihirunthanon, T., Chantanurak, N., . . . Ichino, R. (2023). Utilization of agricultural waste to herbicide removal: Magnetic BEA zeolite adsorbents prepared by dry-gel conversion using rice husk ash-derived SiO<sub>2</sub> for paraquat removal. *Arabian Journal of Chemistry*, 1-16.
- Weather Spark. (2022). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Girardot City.  
Obtenido de Weather Spark: <https://bit.ly/3wEDQJP>
- Yang, X., & Al-Duriv, B. (2005). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 25-34.
- Zea Linares, G. V. (10 de noviembre de 2017). *Remoción de arsénico (III) y (V) de soluciones acuosas*

*mediante el proceso de biosorción utilizando cascarilla de Oryza Sativa (arroz) modificada con dióxido de manganeso.* Obtenido de Repositorio Universidad Católica de Santa María:

file:///C:/Users/CAMILA/Documents/Tesis/Art%C3%ADculos%20tesis/Remoci%C3%B3n%20de%20ars%C3%A9nico%20(III)%20y%20(V)%20de%20soluciones%20acuosas%20mediante%20el%20proceso%20de%20biosorci%C3%B3n%20utilizando%20cascarilla%20de%20Oryza%20Sativa%20(arroz)%20mo

Zhang, X., Wu, S., Liu, Y., Wang, Z., Zhang, H., & Xiao, R. (2023). Removal of Cr(VI) from aqueous solution by Rice-husk-based activated carbon prepared by Dual- mode heating method. *Carbon Resources Conversion*, 76-84.

Zou, C., Xu, Z., Nie, F., Guan, K., & Li, J. (2023). Application of hydroxyapatite- modified carbonized rice husk for the adsorption of Cr(VI) from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 1-11.