

TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON PLOMO TIPO (II) MEDIANTE  
BIOMASA DE CASCARA DE YUCA Y ANTRACITA COMO ADSORBENTES



PEDRO ESTEBA LOZANO SANTOFIMIO  
JESUS GUILLERMO FUENTES MACIAS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLOMO (II) MEDIANTE BIOMASA DE  
CASCARA DE YUCA Y ANTRACITA COMO ADSORBENTES

PEDRO ESTEBA LOZANO SANTOFIMIO

JESUS GUILLERMO FUENTES MACIAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título Ingeniero civil.

Asesor

Ing. Mg. MBA LIZETH LUCERO DÍAZ SUESCÚN

Ingeniería Civil

Magister en MBA

Ing. Msc. OSCAR ALEJANDRO HINESTROZA GUTIERREZ

Magister en Ciencias Exactas y Naturales

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTES GALLEGO, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O. P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Adrián Mauricio GARCIA PEÑARANDA, O. P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBON**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Mg. Luis Fernando DIAZ CRUZ**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

## Agradecimientos

### **Pedro Lozano**

Con la finalización de este proyecto, también finaliza una etapa de mi vida, una etapa la cual significa demasiado para mí, en la que obtuve conocimientos, experiencias y momentos únicos en la vida. Muchas personas participaron e hicieron parte en esta etapa de mi vida, a todas estas personas les quiero ofrecer mi más sincero agradecimiento.

A mi madre, por ser mi heroína en la vida, por enseñarme cómo afrontar los problemas en la vida, apoyarme en todo momento, demostrarme siempre ese gran amor, enseñarme a siempre perseverar, a siempre confiar y creer en mí. Principalmente le quiero dedicar este logro a ella.

A mi padre, por apoyarme en esta etapa de la vida, por luchar como un verdadero guerrero de la vida, demostrándome que siempre hay que afrontar la vida con energía y entusiasmo.

A mi hermano, por ser mi compañero de vida, mi mejor amigo, mi consejero y siempre estar pendiente de mí, por enseñarme a ser leal y darme sus valiosos consejos para la vida.

A una mujer muy especial que gracias a mi tiempo en la universidad pude conocer, la futura ingeniera Natalia Yepes. A ella le quiero agradecer por apoyarme en aquellos momentos en los que me encontraba bajo de ánimos y brindarme momentos de felicidad, amor y a pesar de los problemas siempre estar para mí. Por ayudarme a definir metas, objetivos y aportando claridad a mi vida.

A mis directores de tesis, Lizeth Lucero Díaz Suescún y Oscar Alejandro Hinestroza, que con dedicación y motivación me brindaron todo su apoyo, guía y conocimiento para poder desarrollar esta investigación y así poder culminar esta etapa de mi vida.

A mis compañeros, por el apoyo que me brindaron, por compartir esos momentos de tensión a causa de parciales, notas y actividades de las materias. También por momentos de felicidad, risas y anécdotas que quedan marcadas.

A los ingenieros y profesores que aportaron a mi conocimiento, mi formación y dieron todo de sí para formar a un buen ingeniero.

Por último, agradecer a la universidad, por ser el lugar donde aprendí, hice amistades, viví grandes experiencias y pude formarme como ingeniero.

**Jesús Fuentes**

A mi madre, por ser la inspiración constante de mi vida. Su amor incondicional, su ejemplo de fortaleza y su apoyo en cada paso de este camino han sido fundamentales para alcanzar esta meta. Sus consejos, sacrificios y palabras de aliento me dieron la motivación necesaria para superar los momentos más difíciles y nunca rendirme.

A mi padre, por su ejemplo de responsabilidad y esfuerzo, que me inspiró a trabajar con disciplina y constancia. Sus consejos y enseñanzas de vida me han dado la dirección necesaria para crecer no solo como profesional, sino también como persona.

A mi abuela, cuyo cariño, sabiduría y oraciones fueron siempre un sostén en este proceso. Ella ha sido un pilar fundamental en mi vida, y su presencia ha sido fuente de paz y motivación.

A mis directores de tesis, Lizeth Lucero Díaz Suescún y Oscar Alejandro Hinestroza, por su guía académica, su paciencia y sus valiosos aportes a lo largo de esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos y orientarme con compromiso y dedicación, contribuyendo de manera decisiva a la culminación de este trabajo.

Agradezco sinceramente a mis profesores por su orientación, paciencia y compromiso con nuestra formación. Cada consejo y corrección aportó significativamente al crecimiento personal y profesional que este proceso implicó.

También expreso mi gratitud a mis compañeros, quienes, con su apoyo, trabajo en equipo y buena actitud, hicieron de esta experiencia algo mucho más que un simple proyecto académico.

Finalmente, a todos quienes me acompañaron en este camino, les expreso mi más sincera gratitud.

## Contenido

	Pág.
Resumen.....	11
Abstract .....	12
Introducción .....	16
Definición del problema .....	18
Justificación .....	21
Objetivos.....	23
Objetivos generales.....	23
Objetivos específicos .....	23
Estado del Arte.....	24
Antecedentes .....	24
Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb (II) .....	24
Carbón activado de la cáscara de plátano en la adsorción de metales pesados .....	26
Obtención de isotermas de adsorción del plomo (ii) del efluente minero río anticono-cerro de pasco utilizando el carbón activado de cáscara de naranja .....	27
Identificación y comparación de presencia de metales pesados: Pb, Cr y Zn en el río Ocoa y sus fuentes de origen antrópico, Villavicencio-Meta. Patiño Acosta, Y y Sánchez Medina, A. (2020).....	27
Marco Teórico .....	30
La razón de porque usar la yuca .....	30
Contaminación por plomo.....	30
Procesos de adsorción .....	31
Espectrofotometría por técnica FTIR.....	32
Filtración.....	32
Lechos filtrantes.....	32
Antracita.....	33
Biomasa.....	34
Marco Conceptual.....	35
Plomo .....	35

Granulometría .....	35
Nitrato de plomo (II).....	35
Área superficial.....	36
Marco Metodológico.....	37
Metodología experimental .....	37
Materiales.....	37
Procedimiento .....	38
Obtención de yuca.....	38
Tratamiento físico .....	39
Preparación de elementos químicos.....	40
Ácido sulfúrico.....	41
Ácido cítrico.....	42
Hidróxido de sodio.....	42
Tratamiento químico de las muestras.....	43
Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico.....	44
Muestra del tratamiento con ácido cítrico.....	44
Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico y posteriormente ácido cítrico.....	45
Filtro.....	46
Diseño .....	46
Mecanismo de remoción.....	48
Antracita.....	49
Antracita proveniente de Santander .....	51
Antracita proveniente de Boyacá .....	51
Preparación Nitrato de plomo $Pb(NO_3)_2$ .....	52
Toma de muestras .....	53
Resultados.....	57
Resultados de los procedimientos químicos .....	57
Muestra 1 — Tratamiento $H_2SO_4$ + cítrico .....	57
Muestra 2 — Tratamiento con ácido cítrico .....	57
Muestra 3 — Tratamiento con ácido sulfúrico .....	58
Análisis FTIR de Cáscaras de Yuca (Manihot suculeta) – Informe Detallado .....	58

Tabla comparativa cualitativa de grupos funcionales .....	58
Conclusiones comparativas del tratamiento químico de la biomasa. ....	59
Primer muestreo de patrones de Nitrato de Plomo tratado ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ .) .....	59
Segundo muestreo de patrones de Nitrato de Plomo tratado ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ .) .....	60
Parámetros instrumentales .....	60
Discusión.....	62
Conclusiones .....	64
Referencias Bibliograficas .....	66

**Lista de tablas**

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición de los dos tipos de cascaras.....	26
<b>Tabla 2.</b> Resultados negativos en los muestreos realizados en el rio Ocoa.....	29
<b>Tabla 3.</b> Valores patrón que se deben analizar en la antracita. ....	33
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de la antracita según su porcentaje de material volátil.....	34
<b>Tabla 5.</b> Resultados obtenidos en el análisis de las muestras de tratamientos químicos .....	59
<b>Tabla 6.</b> Resultados del primer muestreo del proceso de tratamiento.....	60
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos del segundo muestreo.....	61
<b>Tabla 8.</b> Resultados sin sesgos del segundo muestreo. ....	61

## Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1</i> Eficiencia de la yuca .....	25
<i>Figura 2</i> Eficiencia del ñame .....	25
<b>Figura 3</b> Niveles de plomo en los puntos de muestreo .....	29
<i>Figura 4</i> Cascara de yuca recién obtenida .....	39
<i>Figura 5</i> Lavado de la cascara yuca.....	39
<b>Figura 6</b> Selección de la cascara de yuca.....	39
<i>Figura 7</i> Trituración de la cascara de yuca. ....	40
<i>Figura 8</i> Cascara de yuca triturada.....	40
<i>Figura 9</i> Tamices #20 y #30 .....	40
<i>Figura 10</i> Clasificación del triturado. ....	40
<i>Figura 11</i> Preparación de químicos. ....	41
<i>Figura 12</i> Elementos de seguridad.....	41
<i>Figura 13</i> Tratamientos químicos a la cascara.....	43
<i>Figura 14</i> Control del nivel de pH .....	43
<i>Figura 15</i> Filtrado y lavado de la biomasa.....	43
<i>Figura 16</i> Resultado de la biomasa tratada.....	43
<b>Figura 17</b> Diagrama de flujo del proceso de adsorción .....	48
<b>Figura 18</b> Antracita .....	49
<i>Figura 19</i> Antracita en la mufla .....	52
<b>Figura 20</b> Reposo de la muestra de antracita .....	52
<b>Figura 21</b> Nitrato de plomo $Pb(NO_3)_2$ a 30 ppm .....	53
<b>Figura 22</b> Muestras del Nitrato de plomo .....	53
<i>Figura 23</i> Disposición de la biomasa .....	55
<i>Figura 24</i> Vertimiento del $Pb(NO_3)_2$ .....	55
<b>Figura 25</b> Tratamiento de la muestra patrón del $Pb(NO_3)_2$ .....	56

## Resumen

El departamento del Meta enfrenta una creciente problemática de contaminación por plomo (Pb II) en sus afluentes, derivada principalmente de actividades automotrices, industriales y urbanas. Ante la necesidad de alternativas sostenibles y de bajo costo para la remoción de metales pesados, esta investigación evalúa el desempeño de un sistema de filtración por gravedad utilizando un medio filtrante dual compuesto por antracita y biomasa activada de cáscara de yuca (*Manihot esculenta*). La biomasa fue sometida a tratamientos químicos con ácido sulfúrico y ácido cítrico para optimizar su capacidad de adsorción, mientras que la antracita se empleó como primera etapa para la remoción de turbidez y sólidos suspendidos.

Se prepararon soluciones estándar de nitrato de plomo para simular diferentes niveles de contaminación, y se analizó la eficiencia del sistema mediante espectrofotometría y caracterización FTIR. Los resultados evidencian que la biomasa tratada presenta grupos funcionales capaces de retener plomo, mientras que la antracita mejora el flujo y la calidad física del agua antes del proceso de adsorción. El diseñado alcanzó una reducción significativa de Pb II, demostrando que la combinación de materiales locales y accesibles constituye una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en la región.

Este estudio aporta una solución ambientalmente sostenible, económicamente favorable y para fortalecer la gestión del recurso hídrico en la Orinoquia.

**Palabras Clave:** Plomo (Pb II), contaminación hídrica, adsorción, biomasa de cáscara de yuca, antracita, filtración por gravedad.

### Abstract

The department of Meta faces a growing problem of lead (Pb II) contamination in its water bodies, mainly derived from automotive, industrial, and urban activities. In response to the need for sustainable and low-cost alternatives for the removal of heavy metals, this research evaluates the performance of a gravity filtration system using a dual filtering medium composed of anthracite and chemically activated cassava peel biomass (*Manihot esculenta*). The biomass was subjected to chemical treatments with sulfuric acid and citric acid to enhance its adsorption capacity, while the anthracite was used as the first stage for the removal of turbidity and suspended solids.

Standard lead nitrate solutions were prepared to simulate different contamination levels, and the system's efficiency was analyzed through spectrophotometry and FTIR characterization. The results show that the treated biomass exhibits functional groups capable of retaining lead, while the anthracite improves water flow and physical quality before the adsorption stage. The designed filter achieved a significant reduction of Pb II, demonstrating that the combination of local and accessible materials is a viable alternative for wastewater treatment in the region.

This study provides an environmentally sustainable, economically favorable, and technically applicable solution to strengthen water resource management in the Orinoquia region.

**Keywords:** Lead (Pb II), water contamination, adsorption, cassava peel biomass, anthracite, gravity filtration.

## Glosario

**Adsorción:** Proceso fisicoquímico mediante el cual átomos, moléculas o iones se adhieren a la superficie de un sólido o líquido por interacciones físicas o químicas. En esta investigación, es el mecanismo mediante el cual el Pb(II) queda retenido en la biomasa de yuca y la antracita.

**Ácido cítrico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>):** Ácido orgánico débil utilizado para modificar químicamente la biomasa. Su acción introduce grupos funcionales capaces de atraer y retener metales pesados en la superficie del adsorbente.

**Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):** Ácido mineral fuerte utilizado para la activación química de la cáscara de yuca. Favorece la introducción de grupos carboxilo y mejora la capacidad adsorbente de la biomasa.

**Afluente:** Corriente o flujo de agua que ingresa a un sistema de filtración o tratamiento. Puede contener contaminantes o impurezas como metales pesados.

**Antracita:** Carbón mineral de alto rango, con alto porcentaje de carbono fijo y baja humedad. Posee gran capacidad adsorbente y estructura porosa, lo que la hace adecuada como medio granular para remover contaminantes de aguas.

**Área superficial específica:** Relación entre la superficie total de un material adsorbente y su masa. A mayor área, mayor posibilidad de contacto con contaminantes y mejor desempeño en procesos de adsorción.

**Biomasa:** Material orgánico obtenido de residuos vegetales o animales. En este estudio, corresponde a partículas tratadas de cáscara de yuca empleadas como adsorbente de Pb(II).

**Carboxilación:** Proceso químico mediante el cual se introducen grupos funcionales carboxilo (-COOH) en la superficie de la biomasa, aumentando su afinidad por el plomo y mejorando su desempeño adsorbente.

**Conductividad:** Propiedad del agua que indica su capacidad para transmitir corriente eléctrica. Se relaciona con la presencia de iones y sustancias disueltas.

**Contaminación por plomo:** Presencia de compuestos de Pb en matrices ambientales (agua, suelo, aire o seres vivos). El Pb presenta alta toxicidad y persistencia, afectando ecosistemas y salud humana.

**Desorción:** Fenómeno opuesto a la adsorción. Consiste en la liberación o desprendimiento de las partículas retenidas por la superficie adsorbente.

**Dosis adsorbente:** Cantidad de material adsorbente empleada en un volumen de agua contaminada. Su optimización es clave para lograr eficiencias adecuadas de remoción.

**Espectrofotometría FTIR:** Técnica instrumental que utiliza radiación infrarroja para identificar grupos funcionales presentes en un material. Permite confirmar modificaciones químicas realizadas en la biomasa.

**Filtración:** Operación unitaria en la que un fluido atraviesa un medio poroso para retener partículas u organismos indeseados. Es el principio de funcionamiento del sistema de tratamiento propuesto.

**Filtro de sedimentos:** Primer elemento del sistema de tratamiento encargado de retener partículas sólidas grandes antes de que el flujo ingrese al lecho filtrante.

**Granulometría:** Distribución de tamaños de partículas de un material granular. Afecta directamente la porosidad, velocidad del flujo y capacidad de adsorción.

**Grupos funcionales:** Estructuras químicas activas presentes en un material adsorbente (hidroxilos, carboxilos, etc.) que interactúan con iones contaminantes.

**Hidróxido de sodio (NaOH):** Base fuerte utilizada para neutralizar muestras químicamente activadas y ajustar el pH durante el tratamiento de la biomasa.

**Impacto inercial:** Mecanismo de remoción de partículas gruesas dentro del filtro. Debido al cambio de velocidad y trayectoria, las partículas chocan contra el material filtrante y quedan retenidas.

**Intercepción:** Mecanismo físico mediante el cual partículas suspendidas quedan atrapadas entre los poros del medio filtrante mientras el flujo de agua avanza.

**Lechos filtrantes:** Capas de materiales sólidos que integran un sistema de filtración. En este trabajo se utilizan antracita y biomasa para retener contaminantes mediante mecanismos físicos y químicos.

**Materia volátil:** Porción de un material que se evapora o descompone a altas temperaturas. En la clasificación de la antracita sirve para definir su grado de pureza y calidad.

**Neutralización:** Proceso químico mediante el cual un ácido o una base es llevado a un nivel de pH estable (generalmente entre 6 y 7) para evitar reacciones agresivas o daños ambientales.

**Nitrato de plomo (II):** Compuesto químico  $Pb(NO_3)_2$  empleado como fuente estándar de plomo en los ensayos experimentales. Altamente soluble, utilizado para preparar soluciones con concentraciones controladas.

**pH:** Indicador de acidez o alcalinidad de una solución. Valores extremos afectan la solubilidad de metales, la estabilidad de biomasa y la eficiencia del proceso de remoción.

**Plomo (Pb):** Metal pesado altamente tóxico. Se bioacumula en organismos vivos y causa daño neurológico, renal y reproductivo. En la investigación se trabaja con su forma iónica  $Pb^{2+}$ .

**Sedimentación:** Proceso mediante el cual partículas sólidas suspendidas se depositan por acción de la gravedad. Es la primera etapa de tratamiento en el filtro propuesto.

**Tamizado:** Método de clasificación de partículas mediante el uso de tamices de diferentes aperturas. Determina el rango granulométrico adecuado para la activación y adsorción.

**Turbidez:** Nivel de opacidad del agua causado por partículas en suspensión. La antracita contribuye significativamente a su reducción.

**Velocidad de filtración:** Tasa a la que el fluido atraviesa el medio filtrante. Afecta directamente el tiempo de contacto y la capacidad de adsorción del sistema.

## Introducción

El presente documento es producto de la investigación llevada a cabo por la universidad santo tomas seccional Villavicencio, en el marco de la convocatoria misiones en ciencia 2024 FODEIN con código DAI-FAC-CIV-02 esta investigación se llevó a cabo entre la facultad de ingeniería civil y ciencias básicas, perteneciente al grupo de investigación geoamenazas. Dicha investigación ha sido desarrollada a partir del 01 de febrero de 2024 a la fecha 30 de noviembre de 2025, para lo cual, se realizaron los procedimientos y análisis presentados en este documento como requisito para la opción de grado para el título de ingeniería civil. Este grupo de investigación esta conformado por la ingeniera Lizeth Diaz, el químico Oscar Hinestroza, el ingeniero Iván Acosta y nosotros como coinvestigadores en función. Otro producto realizado en esta investigación es el artículo titulado “EVALUACIÓN Y DISEÑO DE FILTRO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CONTAMINADAS CON PLOMO (II) A PARTIR DE BIOMASA DESARROLLADA CON DESECHOS AGROINDUSTRIALES DE LA CÁSCARA DE YUCA (*Manihot suculenta*) Y CARBÓN MINERAL (Antracita)”.

En la investigación sobre diferentes tratamientos de aguas residuales, en el marco de la falta del recurso hídrico teniendo como región de referencia el departamento del meta, se realizaron consultas a diferentes fuentes bibliográficas, encontrando que la contaminación por plomo en Colombia es un problema crítico de carácter ambiental y social. Como lo demuestra un artículo realizado por Hernández, Gutiérrez y Zafra publicado el 22 de junio del año 2021 en el volumen 25 de Ingeniería y Universidad de la Pontificia Universidad Javeriana, en el cual se evidencio la presencia de plomo en diversas matrices, como, sangre, alimentos, suelos, aire y agua. Demostrando que se trata de una problemática extendida en el territorio y no limitada a una región específica. En lo referente al recurso hídrico, el estudio determino que el 55% de las muestras realizadas los niveles de plomo superaron los límites establecidos por la normativa ambiental colombiana, lo que demuestra el riesgo presente para los ecosistemas acuáticos, comunidades y, en general, para la seguridad ambiental del país.

Ante esta situación, resulta necesario implementar alternativas sostenibles y de bajo costo que permitan la remoción de dichos contaminantes. En este contexto, la presente investigación propone un tratamiento para aguas contaminadas con plomo (Pb) tipo II a partir de biomasa de cáscara de yuca, un subproducto agrícola disponible en la región, en combinación con antracita

como medio granular. El estudio busca demostrar la eficiencia de este sistema en la reducción de plomo tipo II en aguas residuales, contribuyendo a la protección del recurso hídrico, la salud de la población y el desarrollo sostenible de la Orinoquia.

En el desarrollo de la investigación se consideraron diversas variables clave, entre ellas la zona de afectación, el método de tratamiento y la disponibilidad de materiales, destacando en particular el uso de la yuca como recurso agrícola accesible. Con base en estos criterios, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar métodos de tratamiento que fueran ambientalmente sostenibles, eficientes, económicamente viables y técnicamente adecuados para la remoción de plomo tipo II en aguas contaminadas. Este análisis permitió delimitar las alternativas más pertinentes y fundamentar la propuesta metodológica del estudio.

### **Definición del problema**

El departamento del Meta cuenta con una amplia red de fuentes hídricas de alta relevancia ecológica e hidrológica, entre las que se destacan los ríos Meta, Guaviare, Ocoa, Guatiquía y Manacacías, entre otros afluyentes de gran importancia regional. Sin embargo, esta red hídrica se encuentra potencialmente expuesta a concentraciones elevadas de plomo, derivadas de diversas actividades productivas presentes en el territorio, como la minería, la explotación petrolera, el crecimiento industrial y la expansión urbana. Estas dinámicas incrementan el riesgo de contaminación por metales pesados, particularmente por plomo (Pb). El plomo tipo II constituye un contaminante prioritario debido a su persistencia, movilidad y elevada toxicidad para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. En este contexto, el Meta presenta la ventaja de tener una alta disponibilidad de cáscara de yuca, producto de la amplia producción agrícola del departamento. Esto facilita la generación de biomasa local y posiciona a la cáscara de yuca como una alternativa viable y nacional para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo tipo II, permitiendo desarrollar todo el proceso dentro del territorio.

Dentro de las principales actividades que generan contaminación de plomo es la industria automotriz como lo deja en evidencia un artículo realizado por Trujillo y Torres publicado el 27 de abril de 2015 esto mediante el grupo de investigación GIGAS de la universidad de los llanos, en este artículo se documentó tres sectores de la ciudad de Villavicencio, determinando que la mayor concentración se presentó en el barrio El Porvenir, un área donde se agrupan talleres de mecánica automotriz y establecimientos relacionados con el mantenimiento de vehículos. En este sector se registró un valor máximo de 4079,8 mg/kg llegando a considerarse altamente contaminado, una concentración excepcionalmente elevada que confirma la fuerte asociación entre las actividades automotrices y la liberación de plomo al ambiente. La cercanía del barrio El Porvenir al río Guatiquía sugiere un riesgo potencial de transporte de partículas contaminadas por escorrentía hacia su cauce.

Esta tendencia se reafirma en el artículo realizado por Trujillo, Sastre y Morales publicado el 16 de agosto del 2024 en la revista de Investigación Agraria y Ambiental RIAA de la Universidad de los Llanos, el cual analizó comparativamente metales pesados en polvo vial en las calles principales de los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, esto debido a que están ubicados sobre la Ruta 40, donde circulan vehículos particulares, pesados (industrias, agricultura, alimentos)

y de la industria hidrocarburos. En Puerto López se reportó una concentración de 20,9 mg/kg, sin embargo, con su presencia en el municipio de Puerto Gaitán se confirmó que el Pb es uno de los metales predominantes en estas áreas urbanas. De igual manera en este artículo se afirma que en la ciudad de Villavicencio las mayores cargas de Pb se presentan en zonas de alto flujo vehicular y servicios automotrices.

El impacto del plomo también se ha documentado directamente en los cuerpos de agua como se refleja en el artículo realizado por Patiño y Sánchez el cual se publicó el 13 de mayo de 2020 con la finalidad de opción de grado en la universidad santo tomas seccional Villavicencio, en la cual se evaluó la calidad del agua del río Ocoa entre los barrios San Luis de Ocoa y San Antonio, así como en puntos con vertimientos directos. Se determinó que el 100 % de las muestras excedieron los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 2115 de 2007, confirmando la presencia de plomo en un afluente urbano altamente influenciado por actividades vehiculares, lavado informal de autos, talleres, estaciones de servicio y escurrimiento de zonas pavimentadas.

A su vez, los impactos de la contaminación por plomo se han evidenciado en los ecosistemas acuáticos. Como se evidencia en el artículo realizado por Gonzales, Landines, Borbón, Correal, Sánchez y Rodríguez publicado el 20 de enero de 2015, en el cual se evaluó diversos tipos de bagres, como lo es la especie extraída del río Meta, encontrando que el 44 % de los especímenes de bagre rayado (*Pseudoplatystoma fasciatum*) presentaban concentraciones de Pb en sangre entre 3,6 y 8,2  $\mu\text{g}/\text{dL}$ . Aunque otras especies presentaron niveles superiores, como la especie del capitán de la sabana extraído de Cundinamarca, con 93 % de afectación estos resultados confirman la bioacumulación del metal en especies de interés pesquero de la región.

La persistencia del plomo en suelos, polvo urbano y sistemas hídricos del Meta representa un desafío significativo para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida. Esta problemática se agrava por la ausencia de un sistema integral de tratamiento de aguas residuales en Villavicencio que permita cumplir con el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003 y con los lineamientos del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. El vertimiento directo de aguas residuales sin tratamiento adecuado incluyendo residuos provenientes del sector automotriz como aceites usados, lubricantes, sedimentos metálicos y partículas de desgaste vehicular genera impactos severos en los ecosistemas acuáticos, la calidad del suelo y la salud humana. Tanto la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena

(CORMACARENA) como el POMCA regional advierten que la acumulación y transporte de estos contaminantes comprometen la biodiversidad, la calidad del recurso hídrico y la sostenibilidad del territorio.

En conjunto, las evidencias disponibles indican que la contaminación por plomo en el Meta representa una amenaza crítica para sus sistemas hídricos. La acumulación de Pb en suelos urbanos, polvo vial y zonas de actividad automotriz favorece su transporte hacia ríos y quebradas mediante escorrentía y drenaje superficial, incrementando la carga contaminante en afluentes como el río Ocoa y el río Guatiquía. La ausencia de un sistema integral de tratamiento de aguas residuales profundiza esta problemática, pues los vertimientos domésticos, industriales y vehiculares llegan directamente a los cuerpos de agua sin procesos de remoción de metales pesados. Esto genera efectos negativos en la calidad del recurso hídrico, altera la biodiversidad acuática y aumenta el riesgo de exposición para las comunidades que dependen de estos afluentes. En este contexto, la contaminación por plomo en los sistemas hídricos del departamento demanda acciones urgentes.

## Justificación

El proyecto nace de la necesidad de abordar un problema ambiental y de salud pública muy importante. Debido a que se han presentado varios casos en los que animales acuáticos, en su mayoría estudios realizados a peces, contienen Plomo en su organismo, como lo fue expuesto en una noticia redactada por el llano 7 días y publicada por el periódico El Tiempo el 17 de junio de 2013, el cual extrajo la información de un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia en el río Meta. En el cual se tomaron variables representativas en puntos específicos del río para medir concentraciones de enzimas que evidenciaran los cambios químicos en el organismo animal, en este estudio se realizaron pruebas toxicológicas, fisiológicas y reproductivas para observar lo sucedido con los bagres, en los resultados se determinó que se encontraron muestras de hidrocarburos y de plomo en la sangre del bagre rayado, el 44% de los bagres tenían rastros de plomo en la sangre y que las muestras tomadas del río Meta están entre 1.5 a 3.5 ppm de hidrocarburos totales de petróleo. Además de esto el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que es razonable predecir que el plomo y los compuestos de plomo son carcinogénicos en seres humanos basado en evidencia limitada en estudios de seres humanos y en evidencia suficiente en estudios en animales. La Environmental Protection Agency (EPA) ha determinado que el plomo es probablemente carcinogénico en seres humanos. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el plomo inorgánico es probablemente carcinogénico en seres humanos. Por esto lo que se planteara para el tratamiento de cuerpos de agua contaminados por plomo tipo II de manera innovadora y sostenible que involucre recursos locales, además de la demostración de su eficiencia; también tendrá un impacto positivo en las comunidades afectadas por los vertimientos de contaminantes cumpliendo directamente con los objetivos nacionales de sostenibilidad ambiental establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo (2022-2026) del gobierno actual en cual tiene como propósito, Colombia, potencial mundial de la vida, en búsqueda de convertir al país en líder de la protección de la vida. Se sabe que el Plomo es un metal pesado, que se encuentra en el medio ambiente debido a las actividades industriales de manufactura, autopartes, textiles, curtiembres y las industrias para la producción de sustancias químicas industriales, jabones, detergentes, productos de limpieza y plásticos. La exposición directa constante al Plomo, incluso en concentraciones bajas, puede traer efectos adversos a la salud como daño cerebral, en riñones, debilidad en las extremidades y hasta

causar la muerte. Actualmente, no se cuentan con sistemas adaptados en los cauces para la remoción de dicho contaminante, ya que muchos métodos existentes son costosos y pueden requerir de tecnología avanzada o en su defecto, generar mayor contaminación por el uso de tóxicos adicionales. La propuesta de investigación involucra la inclusión de recursos naturales de la zona por la disponibilidad, el aprovechamiento para la implementación del sistema de filtración beneficia a la investigación ya que reduce el uso de tecnologías externas y promueve la sostenibilidad ambiental promoviendo el desarrollo económico local. Esta investigación nos permitiría abrir el tratamiento de aguas contaminadas hacia un sistema viable y eficiente.

## **Objetivos**

### **Objetivos generales**

Demostrar que un filtro compuesto por una biomasa a base de desechos agrícolas como la yuca y compuestos de material granular como la antracita, realiza un óptimo tratamiento de aguas residuales con presencia de Plomo tipo II.

### **Objetivos específicos**

Identificar cual es el mejor proceso químico para activar la biomasa para el proceso de adsorción de plomo tipo II.

Diseñar un proceso para el tratamiento propuesto por medio de los materiales evaluados y disponibles en la zona.

Determinar si el tratamiento mediante estos lechos filtrantes si es óptimo y eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas por plomo tipo II.

## Estado del Arte

Esta investigación del aprovechamiento de las cascaras de yuca, para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Plomo tipo (II), es muy interesante y relevante para la sociedad en la actualidad debido a las problemáticas que se presentan por la contaminación de un líquido tanpreciado y escaso en distintas partes del país y del mundo, como lo es el agua. Además de esto, en la actualidad ya existen formas de tratar estos líquidos contaminados, pero pueden ser muy costosos o no son muy efectivos en distintas condiciones. Por esto, se han realizado varias investigaciones para poder tratar aguas contaminadas por plomo.

### Antecedentes

Los antecedentes son de gran importancia para una investigación, conocer el pasado y otros puntos de vista para ir más allá de lo ya estudiado, es por ello que se encontraron los siguientes antecedentes.

### *Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb (II)*

En este artículo elaborado por Tejada, Montiel y Acevedo publicado en febrero del 2016, en el cual se realizó el proceso de tratamiento de aguas, utilizando cascaras de yuca y ñame. En las cuales se determinó que se puede tratar el agua hasta en un 99%, con ambos tipos de cascaras.

Principalmente se presenta el proceso que se le debe realizar a la cascara de yuca y poder transformarlo en una biomasa capaz de remover metales pesados del agua, en especial el plomo. El proceso que se debe realizar es el siguiente:

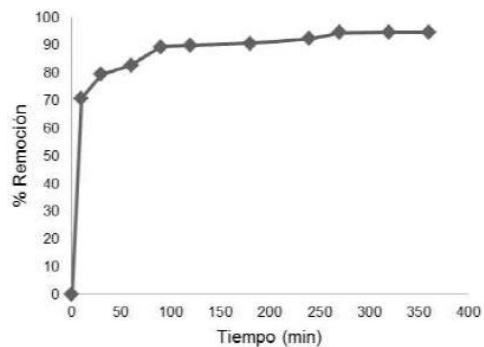
- Obtener las cascaras.
- Lavarlas 3 veces usando agua destilada.
- Secarlas por 24 horas en un horno a una temperatura de 90°C.
- Reducción de su tamaño.
- Tamizar, seleccionando partículas de tamaño de 0.5 a 1 mm.
- Modificación química, tratar la biomasa con 0.6M de ácido cítrico.

- La biomasa y la solución de ácido cítrico debe ser agitado a 200 rpm a una temperatura constante de 60°C por un tiempo de 2 horas.
- El bioadsorbente debe ser filtrado y lavado con agua destilada.
- Secar a 55°C por 24 horas.

Con la biomasa fabricada correctamente se realizaron pruebas para determinar su eficiencia. Estas se realizaron a una solución patrón de 1000 ppm de Pb (II), esta fue preparada usando  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  de grado analítico.

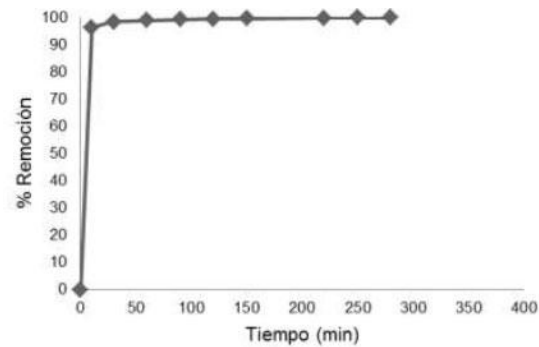
Con las pruebas realizadas se demostró que ambas muestras tienen una gran facultad de adsorber plomo del agua, pero el ñame llega a ser más eficiente por el tiempo que se demora en el proceso. Como se demuestran en las siguientes graficas, grafica 1 y 2 de la eficiencia de las biomazas a base de los productos agrícolas.

**Figura 1** Eficiencia de la yuca



*Nota.* Obtenido del artículo realizado por Tejada, Montiel y Acevedo. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642016000100003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100003)

**Figura 2** Eficiencia del ñame



*Nota.* Obtenido del artículo realizado por Tejada, Montiel y Acevedo. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642016000100003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100003)

Esta investigación demuestra la eficiencia de la remoción de plomo en el agua, usando biomazas de cascara de yuca y ñame, con una alteración adecuada de manera química. Entre estas se presenta que el ñame tiene un mejor tiempo de adsorción, esto se puede deducir que es debido a tener una mayor presencia de lignina en su composición.

**Tabla 1.** *Composición de los dos tipos de cascara*

<b>Muestra</b>	<b>Cáscara de yuca</b>	<b>Cáscara de ñame</b>
<b>Carbono (%)</b>	36,96	48,14
<b>Hidrógeno (%)</b>	3,98	5,44
<b>Nitrógeno (%)</b>	0,26	0,18
<b>Azufre (ppm)</b>	0,12	0,08
<b>Cenizas (%)</b>	1,58	4,85
<b>Pectina (%)</b>	2,84	10,98
<b>Lignina (%)</b>	2,20	27,73
<b>Celulosa (%)</b>	18,47	13,08
<b>Hemicelulosa (%)</b>	6,01	6,47

*Nota.* Muestra la composición de distintos elementos de la cascara de yuca y de la cascara de ñame, los cuales son determinantes para su caracterización. Obtenido del artículo realizado por Tejada, Montiel y Acevedo. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642016000100003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100003)

Ambas presentan una adsorción admisible y eficiente según las normativas, pero debido a la presencia de yuca en la zona de la Orinoquia y su presencia en el Meta, es más viable la disposición de la yuca. (Tejada, Montiel, & Acevedo, 2016)

### ***Carbón activado de la cáscara de plátano en la adsorción de metales pesados***

En recientes estudios, (Marcos Robles, 2025) evaluaron el uso de carbón activado derivado de cáscara de plátano para la adsorción de arsénico en aguas del río Moche (Perú). Mediante un diseño preexperimental y aplicación de diferentes dosis de adsorbente (5, 7 y 10 g), observaron reducciones en la concentración de As desde ~0,546 mg/L a aproximadamente 0,12; 0,08 y 0,06 mg/L respectivamente, con porcentajes de remoción de 78-88 %. Aunque los resultados muestran una eficiencia considerable, incluso con la mayor dosis utilizada la concentración final se mantuvo ligeramente por encima del límite permitido según estándares ambientales nacionales para agua potable. Este trabajo aporta evidencia de que residuos como la cáscara de plátano tienen gran potencial como adsorbentes económicos, y resalta la importancia de ajustar variables como la dosis y posibles tratamientos adicionales para alcanzar niveles seguros según normativas. Además, abre interrogantes respecto a la regeneración del adsorbente, su comportamiento frente a mezclas de metales pesados, y la escalabilidad local de la técnica.

***Obtención de isotermas de adsorción del plomo (ii) del efluente minero río anticono-cerro de pasco utilizando el carbón activado de cáscara de naranja***

En el estudio de (Humberto Bonilla, 2019) se evaluó la adsorción de Pb (II) del efluente minero del río Anticono (Cerro de Pasco) mediante carbón activado de cáscara de naranja activado químicamente con ácido fosfórico. Los ensayos se realizaron a pH 3 y 5, con tiempos de contacto de hasta 120 minutos, alcanzando una capacidad de adsorción de ~478,5 mg/L y una remoción del orden del 95,7 %. Las pruebas cinéticas se ajustaron mejor al modelo pseudo-segundo orden, lo que indica la predominancia de mecanismos de quimisorción, mientras que la isoterma de Freundlich fue la que mejor modeló los datos, señalando heterogeneidad en los sitios de adsorción. Este trabajo aporta evidencia valiosa de que residuos agroindustriales pueden servir como adsorbentes efectivos en aguas altamente contaminadas, aunque aspectos como la regeneración del adsorbente, su desempeño en condiciones variables de contaminación (mezclas de metales, fluctuaciones de pH, caudales mayores) siguen siendo áreas que requieren mayor investigación.

***Identificación y comparación de presencia de metales pesados: Pb, Cr y Zn en el río Ocoa y sus fuentes de origen antrópico, Villavicencio-Meta. Patiño Acosta, Y y Sánchez Medina, A. (2020)***

El muestreo en los cuerpos hídricos tuvo en cuenta la época de precipitación (alta y baja), para las precipitaciones altas los valores deben ser entre 4 mm y 15,4 mm y para precipitaciones bajas debe ser de 0 mm, esto siguiendo lo estipulado por el IDEAM.

En los cuerpos hídricos se realizaron 6 puntos de muestreo en los cuales se midieron de manera in situ, el pH, oxígeno disuelto, temperatura del agua y conductividad. Pero el procedimiento de obtención del agua fue el siguiente:

1. Se ubicaron 3 puntos de medición distribuidos en la margen derecha, izquierda y centro del cauce del río Ocoa.
2. Se tomaron 3 muestras puntuales en recipientes de plástico color ámbar de 500 ml.
3. Las tres muestras fueron mezcladas para obtener una mezcla única preparada a partir de 150 ml de cada muestra puntual.
4. En total se obtuvieron 6 muestras mezcladas por cada época de precipitación, es decir 12 muestras mezcladas.

En cambio, para el muestreo realizado directamente en vertimientos, solo se tuvo en cuenta que se debía realizar en horas de la mañana, esto debido a que es el horario de mayor actividad. En el punto de descarga de la tubería se realizó la medición del pH, oxígeno disuelto, temperatura del agua y conductividad, esto se debe realizar antes de que estos vertimientos se incorporen al cuerpo de agua. Se realizaron 8 muestras, las cuales fueron recolectadas en recipientes de plástico color ámbar de 500 ml. Para este proceso se tuvo la guía para la toma de muestras de agua residual, dictada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

El análisis del plomo se empleó el método MQuant, para poder realizar este método se debe nivelar el pH entre 3 y 6 en las muestras, ya con este nivel de pH se tomó un tubo de ensayo y se le agregó 0,5 ml del Pb-1 y 0,5 ml del reactivo Pb-2, esto se agitó por 30 segundos, después se le agregó 8 ml de la muestra obtenida. La muestra final debe tener una temperatura entre 10°C y 40°C, con esta temperatura se agita durante un minuto para homogenizarlo totalmente. Finalmente, se agregó un poco de muestra en una celda de cuarzo y se llevó al Espectrofotómetro, el cual determinó la concentración de Pb en mg/l.

Los resultados de las muestras obtenidas en el cuerpo hídrico, fueron muy negativos en el sentido de la gran presencia del Plomo en el río Ocoa. Estos niveles infligen las normas establecidas para los niveles permisibles de contaminación en el agua por plomo. Esto demuestra una gran presencia de plomo en todo el cauce del río Ocoa.

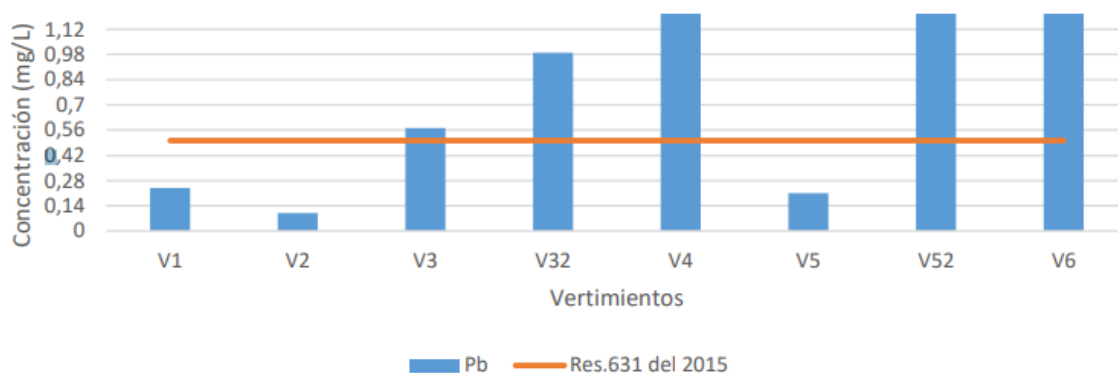
Los resultados se muestran a continuación en la tabla 2, en la cual se observa los resultados tan negativos obtenidos en esta investigación.

**Tabla 2.** Resultados negativos en los muestreos realizados en el río Ocoa.

Punto	Época	Consumo Humano Resolución 2115 del 2007 y OMS	Preservación Flora y Fauna Decreto 1594 del 84	Nivel de Excedencia de la Res. 2115 del 2007, OMS y Decreto 1594 del 84 (%)
P1	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	5100
P1	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	2700
P2	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	5300
P2	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	1700
P3	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	5000
P3	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	4500
P4	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	2800
P4	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	3000
P5	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	4000
P5	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	2100
P6	Precipitación alta	NO CUMPLE	NO CUMPLE	11600
P6	Precipitación baja	NO CUMPLE	NO CUMPLE	1400

*Nota.* Los resultados de los puntos de muestreo en el río Ocoa aportados demuestran que los niveles de contaminación por plomo no cumplen los niveles para el consumo humano, para la preservación de la flora y fauna y superan los niveles permitidos según las normativas vigentes. Estos resultados fueron obtenidos del artículo realizado por Patiño y Sánchez. <https://repository.usta.edu.co/items/af4495df-4499-41fe-bbdc-4f759fb76481>

Los resultados de los vertimientos, demuestra que en más de la mitad de los puntos muestreados supera la cantidad del plomo permitido en el agua, esto según lo estipulado en la resolución 631 del 2015. Se puede deducir que es debido a estos puntos de vertimiento, que el río Ocoa presenta estos niveles de contaminación. En la gráfica 3

**Figura 3** Niveles de plomo en los puntos de muestreo

*Nota.* Se presencia la concentración en los distintos puntos de vertimiento, los niveles alcanzados y los niveles máximos permitidos. Obtenido del artículo realizado por Patiño y Sánchez. <https://repository.usta.edu.co/items/af4495df-4499-41fe-bbdc-4f759fb76481>

## Marco Teórico

### La razón de porque usar la yuca

Como anteriormente se evidencio, según Tejada, Montiel y Acevedo en su artículo publicado en febrero del 2016, la yuca es apta y eficiente para este propósito debido a su composición de lignina. Este es un hetero polímetro complejo, el cual es considerado como un buen adsorbente efectivo para la eliminación de metales pesados. Teniendo presente esa peculiaridad de la cascara de yuca y con el procedimiento adecuado que se le efectúa de manera química, la biomasa de yuca es muy eficaz para la absorción de metales. También es debido a la facilidad con la que se puede obtener la cascara de yuca en la región.

### Contaminación por plomo

Hay diversas fuentes de contaminación por plomo en la sociedad, estas pueden variar según las zonas o actividades, como lo demuestra la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSRD) publicando esta información el 20 de agosto de 2007 en su página web, en donde se menciona las siguientes fuentes de contaminación:

- Fuentes industriales:
  - Minería y fundición de minerales de plomo.
  - Fabricación de baterías, acumuladores y soldaduras.
  - Producción de pigmentos, esmaltes y vidriados.
  - Reciclaje informal de baterías y chatarra con plomo.
- Fuentes energéticas:
  - Gasolina con plomo (aditivos como tetraetilo de plomo, ya prohibidos en la mayoría de países, pero con residuos persistentes en suelos).
  - Quema de carbón y aceites contaminados con plomo.
- Fuentes en la construcción y el hogar:
  - Pinturas antiguas con compuestos de plomo (blanco de plomo, minio).
  - Tuberías y conexiones de agua potable con plomo.
  - Soldaduras empleadas en techos y estructuras metálicas.

- Polvo doméstico contaminado con restos de pintura o aire exterior.
- Fuentes de consumo y productos:
  - Cerámicas y lozas esmaltadas con plomo.
  - Cosméticos (kohl, algunos labiales tradicionales).
  - Juguetes y utensilios pintados con pigmentos de plomo.
- Fuentes ambientales:
  - Depósitos en suelos y sedimentos por emisiones históricas.
  - Contaminación del agua por lixiviación de tuberías o residuos.
  - Ingreso a la cadena alimenticia (vegetales cultivados en suelos contaminados, peces en aguas afectadas).

### **Procesos de adsorción**

Atkins y de Paula (2018) explican que la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

Así mismo también explican que en química, la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie interfacial entre dos fases. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido.

Considérese una superficie limpia expuesta a una atmósfera gaseosa. En el interior del material, todos los enlaces químicos (ya sean iónicos, covalentes o metálicos) de los átomos constituyentes están satisfechos. En cambio, por definición la superficie representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es energéticamente favorable el reaccionar con lo que se encuentre disponible, y por ello se produce de forma espontánea.

La naturaleza exacta del enlace depende de las particularidades de los especímenes implicados, pero el material adsorbido es generalmente clasificado como fisisorbido o quimisorbido.

Romero Rojas (2021) también explica que la cantidad de material que se acumula depende del equilibrio dinámico que se alcanza entre la tasa a la cual el material se adsorbe a la superficie y la tasa a la cual se evapora, y que normalmente dependen de forma importante de la temperatura.

Cuanto mayor sea la tasa de adsorción y menor la de desorción, mayor será la fracción de la superficie disponible que será cubierta por material adsorbido en el equilibrio.

### **Espectrofotometría por técnica FTIR**

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una metodología que se emplea en la industria y en los laboratorios académicos para comprender la estructura de las moléculas individuales y la composición de las mezclas moleculares. La espectroscopia FTIR usa energía del infrarrojo medio modulada para analizar una muestra. La luz infrarroja se absorbe a frecuencias específicas directamente relacionadas con las energías de enlace vibratorio interatómico de la molécula. Cuando la energía de enlace vibratorio y la luz infrarroja media son equivalentes, el enlace puede absorber dicha energía. Los diversos enlaces de una molécula vibran con energías diferentes y, por lo tanto, absorben longitudes de onda distintas de la radiación por infrarrojos (IR). La posición (frecuencia) e intensidad de cada una de estas bandas de absorción contribuye al espectro total, lo que crea una identificación característica de la molécula. (Pavia, Lampman, Kriz, & Vyvyan, 2015)

### **Filtración**

Según Romero Rojas (2021), la filtración es una operación unitaria en donde una mezcla sólido-líquido atraviesa un medio de porosidad intermedia, para separar los sólidos. En una planta potabilizadora, los filtros retendrán las partículas de turbidez remanente y los microflóculos que no fueron removidos en el sedimentador y, al mismo tiempo, permitirán el paso del agua, liberándola así de la materia en suspensión (MES).

### **Lechos filtrantes**

Un lecho filtrante define la eficiencia del proceso y el comportamiento de la pérdida de carga, están representados en:

- Porosidad y conductividad hidráulica del lecho.
- Tipo de material filtrante.

- Filtrabilidad o capacidad de retención de sólidos.
- Capacidad de almacenamiento.
- Profundidad del lecho.

Los lechos filtrantes más usados de manera convencional son la arena y la antracita. De igual manera estos se pueden usar de manera individual o combinarlos. No obstante, la antracita presenta una mayor capacidad de almacenamiento sólido, genera menores pérdidas de carga, por ende, ciclos de operación más largos. (Lozano-Rivas, 2015)

### **Antracita**

Según el artículo realizado por Estupiñán, Vásquez y Pulido publicado en el mes de Julio de 2006 en la revista Facultad de Ingeniería No 37 de la universidad de Antioquia, la antracita es un carbón mineral de alto rango, caracterizado por su dureza, compacidad, color negro brillante y textura no foliada. Posee un bajo contenido de humedad y materia volátil, así como un elevado porcentaje de carbono fijo, lo que le otorga un alto poder calorífico y excelente estabilidad térmica. Según la ASTM Standard Classification of Coals by Rank, su composición típica incluye entre 86% y 98% de carbono (C), menos del 5% de hidrógeno (H) y oxígeno (O), alrededor de 1,5% de nitrógeno (N), menos del 1% de azufre (S) y cerca de 5% de cenizas. Gracias a su elevada pureza y a la presencia natural de microporos, mesoporos y macroporos, la antracita es un material idóneo para procesos de adsorción y puede ser sometida a activación para mejorar su capacidad de retención de contaminantes. En estos poros se desarrollan los principales fenómenos de adsorción física y, en algunos casos, química. Además, según la ASTM D2862-82, el rango granulométrico adecuado para su uso como material filtrante oscila entre 0,8 mm y 1,6 mm, lo cual evita la obstrucción de poros y garantiza un desempeño óptimo en procesos de tratamiento. En términos generales, las propiedades promedio de la antracita son:

**Tabla 3.** Valores patrón que se deben analizar en la antracita.

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>% Humedad</b>	3,535
<b>% Cenizas</b>	9,368
<b>% Materia volátil</b>	3,928
<b>% Carbono fijo</b>	83,169

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>% Azufre</b>	0,643
<b>Poder calorífico (BTU/lb)</b>	12.767,07
<b>Rango del carbón (%)</b>	96,6
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,86

*Nota.* Describe los valores de los componentes y características base del material granular a trabajar dentro de la investigación. Obtenido del artículo realizado por Estupiñán, Vásquez y Pulido [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302006000300003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000300003)

Estas características la convierten en un material altamente eficiente para su aplicación en sistemas de filtración y remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Además, de acuerdo con la norma ASTM D388 – 84, la antracita se clasifica en tres grupos según su porcentaje de materia volátil:

**Tabla 4.** Clasificación de la antracita según su porcentaje de material volátil.

<b>Grupo</b>	<b>% material volátil</b>
<b>Meta antracita</b>	< 2
<b>Antracita</b>	> 2 y < 8
<b>Semi antracita</b>	>8 y <14

*Notas.* Adaptado de la normativa de clasificación estándar de carbones por rango. [https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs\\_ora/20221211/astm/ASTM%20D388-19a.pdf?utm\\_source](https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20221211/astm/ASTM%20D388-19a.pdf?utm_source)

## **Biomasa**

La biomasa se realiza a base de cascara de yuca (Manihot esculenta). La yuca utilizada en esta investigación es cultivada en el departamento del Meta, específicamente en el municipio de El Dorado. El tipo de yuca que se siembra en esa región es una variedad introducida de Brasil, pero que de igual manera esta se ha tenido que adaptar a las condiciones del sector, este tipo de yuca es la Manihot esculenta Crantz, culturalmente conocida como la brasileña.

Esta es una variedad criolla de alto rendimiento, la cual se adapta a todo tipo de suelos, su rendimiento este sujeto al manejo agronómico, tipo de suelos, precipitaciones y daños de insectos o enfermedades. Tiene una cobertura promedio de 1.77 m, manteniendo su follaje durante todo su ciclo, la cosecha se puede iniciar a partir de los ocho meses, previos monitoreos para conocer si ya tiene el largo y grosor deseado. El contenido de almidón es superior al 30%, la convierte en una variedad de múltiples usos.

## Marco Conceptual

### Plomo

Su número atómico es el 82, tiene un peso atómico de 207, es de un color azulado, este elemento químico forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos.

En la industria, los compuestos más importantes son óxidos y tetraetilo de plomo, forma aleaciones con estaño, cobre, arsénico, bismuto, cadmio y sodio. El plomo se encuentra en metales de uranio y de torio, ya que proviene de la división radiactiva. Los minerales comerciales suelen contener poco plomo (3%), lo más común es que sea del (10%). Los minerales antes de fundirse pueden acumular hasta 40% o más de plomo. (Division Economy, 1998)

Se usa como aditivo antidetonante en la gasolina, baterías, en monitores de computadores y pantallas de televisión, joyería, latas de conserva, tintes para el pelo, grifería, pigmentos, aceites, cosmetología, aleaciones, cerámicas, municiones, soldaduras, plumadas, armamento, radiación atómica, insecticidas, etc. (LUIS LONDOÑO, 2016)

### Granulometría

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

También estos análisis se realizan mediante ensayos en el laboratorio con tamices de diferente enumeración, dependiendo de la separación de los cuadros de la maya. Los granos que pasen o se queden en el tamiz tienen sus características ya determinadas. (CONSTRUNEIC, 2022)

### Nitrato de plomo (II)

El nitrato de plomo (II),  $Pb(NO_3)_2$ , es un compuesto inorgánico ampliamente estudiado por su papel en la formación y disolución de sales de plomo. Este compuesto se presenta como un sólido cristalino blanco altamente soluble en agua, en donde se disocia en iones  $Pb^{2+}$  y  $NO_3^-$ . Narita, Okayasu y Naito (1984) demostraron que el  $Pb(NO_3)_2$  es una fuente importante para la

síntesis de otros compuestos de plomo (II), como óxidos e hidróxidos, debido a su elevada solubilidad y capacidad de hidrólisis controlada. Dichas propiedades lo convierten en un reactivo versátil dentro de la química inorgánica, especialmente en procesos donde se requiere la precipitación o transformación de especies de plomo bajo condiciones acuosas.

### **Área superficial**

“El área superficial específica aumenta al disminuir el tamaño de las partículas. Esta propiedad es importante para los procesos industriales y para las reacciones químicas.” (Microtrac, s. f.)

## **Marco Metodológico**

La investigación es de tipo cuantitativa experimental, dado que evalúa de manera controlada la eficiencia del tratamiento de aguas contaminadas con plomo tipo II mediante el uso de biomasa de yuca y antracita. A través de la medición sistemática de variables, se busca determinar la capacidad real de estos materiales para remover el contaminante y generar evidencia sólida que respalde alternativas viables para mejorar la calidad del recurso hídrico.

### **Metodología experimental**

Esta investigación contempla las siguientes experimentaciones:

- Preparación y acondicionamiento de la cascara de yuca
- Elección del ácido y su relación de biomasa/ácido.
- Características de la cascara sin modificar y modificada
- Determinación del pH en el punto de carga cero
- Preparación de muestra sintética
- Determinación de la capacidad y velocidad cinética
- Toma de muestras de agua residuales

### **Materiales**

- Cascara de yuca (limpias y secas).
- Agua destilada.
- Bandejas de aluminio.
- Horno.
- Guantes de garrucha.
- Molino.
- Tamices.
- Balanza y gramera.
- Bolsas ziploc.

- Vasos de vidrio precipitado.
- Matraz aforado.
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (1M).
- Ácido cítrico (solución al 10%).
- Hidróxido de sodio.
- Filtro (tela blanca fina).
- Placa de calentamiento.
- Papel indicador de pH.
- Mufla.
- Antracita.
- Nitrato de plomo  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ .
- Geotextil.
- Filtro.
- Equipo de seguridad (guantes, tapa bocas, bata).

### **Procedimiento**

A continuación, se detallará, explicara y se evidenciara el procedimiento que se realizó en el desarrollo de la investigación.

### ***Obtención de yuca***

Se obtuvo cascara de yuca proveniente de un punto de distribución de esta a distintos restaurantes de la ciudad de Villavicencio, la yuca que se distribuye en la ciudad es principalmente transportada desde el municipio del Dorado, Granada o de municipios aledaños a estos. Al momento de la obtención de la cascara de yuca, esta se encuentra contaminada por lodo, tierra y otros agentes orgánicos, es por ello que se procede a lavar con agua cruda todo el material, un aproximado de tres veces, removiendo el lodo y otros materiales orgánicos que se puedan encontrar en la cascara de yuca, de igual manera se va seleccionando la cascara.

**Figura 4** Cascara de yuca recién obtenida



*Nota.* Se observa la cascara de yuca sin ser seleccionada.

**Figura 5** Lavado de la cascara yuca.



*Nota.* Se evidencia el proceso de lavado de la cascara de yuca.

**Figura 6** Selección de la cascara de yuca.



*Nota.* Muestra la cascara de yuca seleccionada posterior al proceso de lavado ya limpia de excesos del material orgánico principal de la yuca y de tierra adherida a la misma.

### ***Tratamiento físico***

Después de la actividad del lavado las cascara son puestas en bandejas de secado y son introducidas al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas, esto con el fin de secar las cascara y eliminar la humedad presente en estas.

Al transcurrir las 24 horas, se utilizará el material seco para pasar por el proceso de trituración mecánica, esto se realizó con un molino industrial, el cual nos permitió moler el material a tamaños entre 75  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$  ya que estos son los requisitos para la clasificación del material.

Posterior al triturado, el material obtenido será tamizado con el fin de encontrar la granulometría necesaria, el tamaño de partícula, esto muy importante para el tratamiento químico, debido a que este proceso requiere un tamaño de partícula específico para poder ser tratada con ácido cítrico y ácido sulfúrico, para realizar una correcta carboxilación y cubra de forma óptima la superficie de la partícula el tamaño de esta es fundamental.

**Figura 7** Trituración de la cascara de yuca.

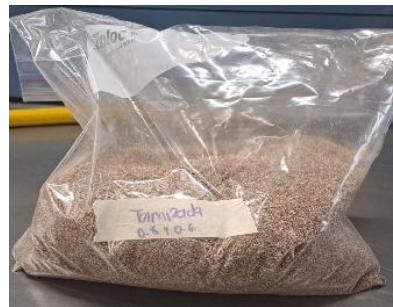
*Nota.* El molino con el que se realizó el triturado de la cascara de yuca.

**Figura 8** Cascara de yuca triturada

*Nota.* Resultado de la yuca ya triturada.

**Figura 9** Tamices #20 y #30

*Nota.* Tamices utilizados para la clasificación del triturado por su tamaño.

**Figura 10** Clasificación del triturado.

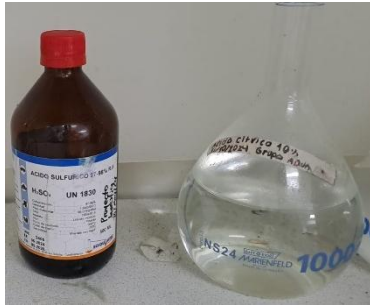
*Nota.* Clasificación adecuada para la activación química.

Después de obtener su clasificación adecuada pasara al tratamiento químico de las muestras.

### ***Preparación de elementos químicos***

Para empezar con el procedimiento químico en la cascara de yuca y posteriormente crear la biomasa, primero se deben preparar los distintos ácidos a trabajar (ácido sulfúrico, ácido cítrico) y a la misma vez el hidróxido de sodio para controlar el pH de las muestras que se van a realizar.

Para realizar los procedimientos químicos de manera segura, es fundamental usar un equipo de protección personal adecuado (guantes resistentes a químicos, gafas de seguridad y bata) y también se debe realizar la debida neutralización del ácido antes de desechar la solución para evitar daños ambientales.

**Figura 11** Preparación de químicos.

*Nota.* Preparación de químicos para la realización de los tratamientos.

**Figura 12** Elementos de seguridad

*Nota.* Uso de elementos de seguridad para manipulación de químicos.

### Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) es un líquido incoloro, altamente corrosivo y uno de los productos químicos más utilizados a nivel industrial. Se emplea principalmente en la fabricación de fertilizantes, baterías de plomo-ácido, en el tratamiento y limpieza de metales, así como en procesos de refinación de petróleo y producción de diversos compuestos químicos. A continuación, se establece el procedimiento a seguir para preparar el ácido sulfúrico.

- Como primer paso se determinó que la concentración del ácido sulfúrico es del 98%, tiene una densidad de  $1.84 \text{ g/cm}^3$ , la masa molar del  $H_2SO_4$  es  $98 \text{ g/mol}$  y la concentración del ácido concentrado es de  $18.4 \text{ M}$ .
- Realizando el cálculo del volumen del ácido sulfúrico requerido para la preparación de 1 litro de una solución de  $1 \text{ M}$  de  $H_2SO_4$  se determinó que se necesita de un  $54.35 \text{ ml}$  de ácido sulfúrico concentrado.
- Posterior a estos cálculos procedemos a verter la cantidad calculada de ácido sulfúrico concentrado a un matraz aforado de 1 litro el cual con anterioridad contenía  $500 \text{ ml}$  de agua destilada, y continuamos agregando agua hasta llegar a marcar 1 litro exacto.
- Esta solución tiene que ser mezclada hasta tener una distribución homogénea del ácido con el agua.

### *Ácido cítrico*

El ácido cítrico ( $C_6H_8O_7$ ) es un ácido orgánico débil presente de forma natural en frutas cítricas como el limón y la naranja. Se utiliza ampliamente en la industria alimentaria como conservante y acidulante, en bebidas y productos procesados, además de emplearse en productos de limpieza, farmacéuticos y cosméticos por sus propiedades antioxidantes, reguladoras de pH y quelantes de metales. A continuación, se indican los pasos a seguir para la preparación del ácido cítrico para el tratamiento posterior.

- Para su preparación debemos llegar a una solución del ácido cítrico al 10%, es decir que el 10% de la masa de la solución debe ser ácido cítrico. Entonces para su preparación en 1 litro de solución ocuparemos tan solo 100 gramos de ácido cítrico.
- Debemos verter estos 100 gramos en un vaso precipitado y agregar un aproximado de 800 ml de agua destilada y mezclar hasta diluir completamente el ácido.
- Por último, se agregará esta solución a un matraz aforado de 1 litro y se deberá añadir agua destilada al matraz aforado hasta llegar a la marca de 1 litro y mezclaremos hasta completar su homogeneidad.

### *Hidróxido de sodio*

El hidróxido de sodio (NaOH) es una base fuerte de gran reactividad y aspecto sólido blanco que se disuelve fácilmente en agua liberando calor. Se utiliza en la producción de jabones y detergentes, en el tratamiento de aguas, para neutralizar ácidos en procesos industriales, en la elaboración de papel y textiles, e incluso en aplicaciones caseras como desatascador de tuberías por su poder corrosivo sobre materia orgánica.

- Tomamos 50 gramos de óxido de sodio y lo agregamos a 500 ml de agua destilada en un matraz aforado de un litro.
- Agregamos agua destilada hasta llegar a la marca de 1 litro y procedemos a agitar hasta que la mezcla se encuentre homogénea.

### ***Tratamiento químico de las muestras***

Después de ya tener las soluciones preparadas, se realizarán tres muestras de tratamiento de la cascara de yuca, esto con la finalidad de determinar cuál de estas poseerá una mayor eficiencia ante la remoción de metales pesados, las muestras a realizaran serán las siguientes:

- Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico
- Muestra del tratamiento con ácido cítrico
- Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico y posteriormente ácido cítrico.

***Figura 13*** *Tratamientos químicos a la cascara*      ***Figura 14*** *Control del nivel de pH*



*Nota.* Tratamiento a la cascara de yuca triturada con los distintos ácidos.



*Nota.* Control del nivel de pH de la biomasa tratada químicamente.

***Figura 15*** *Filtrado y lavado de la biomasa*



*Nota.* El filtrado con una tela blanca fina y EL lavado con agua destilada.

***Figura 16*** *Resultado de la biomasa tratada*



*Nota.* Disposición de la biomasa tratada para introducirla al horno.

### ***Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico***

Para esta muestra se tomarán 200 gramos de la cascara de yuca clasificada y se realizara el siguiente proceso:

- Usaremos el litro de ácido sulfúrico ya preparado con concentración de 1M y dividiremos los 200 gramos en dos vasos precipitados sumergiendo bien el ácido y el triturado de yuca, esto para proceder a agitar el compuesto por 2 horas a una temperatura de 50°C.
- Después de este proceso neutralizaremos la muestra con hidróxido de sodio 0,5 molar hasta alcanzar un pH entre 6-7.
- Al tener este pH pasamos a lavarla la biomasa con agua destilada hasta retirar buena parte del ácido neutralizado.
- Pasamos a filtrar la biomasa ya lavada en una tela blanca fina hasta retirar gran parte del líquido que aun retiene esta y poder pasarla al horno.
- La muestra homogénea será introducida al horno a 70°C por 24 horas para eliminar la humedad restante y evitar contaminaciones por parte de hongos.
- Después de ello procedemos a empacar esta muestra en bolsas ziploc para su respectivo almacenamiento.
- Por último, se manda a caracterizar las cáscaras carboxiladas mediante técnicas de FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) para confirmar la presencia de grupos carboxilo y otros grupos funcionales introducidos por el ácido sulfúrico.

### ***Muestra del tratamiento con ácido cítrico***

Para la muestra del tratamiento con ácido cítrico se tomarán 200 gramos de cascara de yuca clasificada y seguiremos el siguiente proceso:

- Usaremos la preparación de ácido cítrico ya preparado con concentración de 1M y dividiremos los 200 gramos en dos vasos precipitados sumergiendo bien el ácido y el triturado de yuca, esto para proceder a agitar el compuesto por 1 hora a una temperatura ambiente.

- Después de este proceso neutralizaremos la muestra con hidróxido de sodio 0,5 molar hasta alcanzar un pH entre 6-7.
- Al tener este pH pasamos a lavar la biomasa con agua destilada hasta retirar buena parte del ácido neutralizado.
- Pasamos a filtrar la biomasa ya lavada en una tela blanca fina hasta retirar gran parte del líquido que aun retiene esta y poder pasarla al horno.
- La muestra homogénea será introducida al horno a 70°C por 24 horas para eliminar la humedad restante y evitar contaminaciones por parte de hongos.
- Después de ello procedemos a empacar esta muestra en bolsas ziploc para su respectivo almacenamiento.
- Por último, se manda a caracterizar las cáscaras carboxiladas mediante técnicas de FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) para confirmar la presencia de grupos carboxilo y otros grupos funcionales introducidos por el ácido cítrico.

### ***Muestra del tratamiento con ácido sulfúrico y posteriormente ácido cítrico***

Para esta muestra final se tomarán 200 gramos de la cascara de yuca clasificada y se realizara el siguiente proceso:

- Iniciaremos con el litro de ácido sulfúrico ya preparado con concentración de 1M y dividiremos los 200 gramos en dos vasos precipitados sumergiendo bien el ácido y el triturado de yuca, esto para proceder a agitar el compuesto por 2 horas a una temperatura de 50°C.
- Después de esto procedemos a filtrar la mezcla en una tela blanca fina hasta retirar gran parte del líquido que aun retiene esta.
- Tomamos la biomasa que filtramos y la sumergimos en la preparación de ácido cítrico ya preparado con concentración de 1M y dividiremos los 200 gramos en dos vasos precipitados sumergiendo bien el ácido y el triturado de yuca, esto para proceder a agitar el compuesto por 1 hora a temperatura ambiente.
- Después del tiempo de reacción procedemos a neutralizar la solución con hidróxido de sodio 0,5 molar hasta alcanzar un pH entre 6-7.

- Al tener este pH pasamos a lavarla la biomasa con abundante agua destilada hasta retirar buena parte del ácido neutralizado.
- Pasamos a filtrar la biomasa ya lavada en una tela blanca fina hasta retirar gran parte del líquido que aun retiene esta y poder pasarla al horno
- La muestra homogénea será introducida al horno a 70°C por 24 horas para eliminar la humedad restante y evitar contaminaciones por parte de hongos.
- Después de ello procedemos a empacar esta muestra en bolsas ziploc para su respectivo almacenamiento.
- Por último, se manda a caracterizar las cáscaras carboxiladas mediante técnicas como FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) para confirmar la presencia de grupos carboxilo y otros grupos funcionales introducidos por el ácido sulfúrico.

### ***Filtro***

A partir de una propuesta experimental, se estableció implementar el sistema de filtración por gravedad, esto debido a las características y beneficios que brinda en el tratamiento de agua, como no requerir energía mecánica para operar y el control de los tiempos de retención del flujo debido a las bandejas incorporadas.

### ***Diseño***

Para el diseño del filtro se tuvieron en cuenta distintos factores que podrían afectar el funcionamiento del proceso de filtración, para evitar esto se incluyeron los siguientes componentes:

- Sedimentación
- Dirección del flujo.
- Tipo de lecho filtrante.
- Cantidad de compartimientos.
- Medidas del filtro.

A continuación, se detallan:

- Sedimentación:

Para la sedimentación de partículas de gran tamaño, se optó por un filtro de sedimentos, este se incorpora al sistema de tratamiento en la entrada del caudal, para retener las partículas por decantación.

- Dirección del flujo:

Teniendo en cuenta el sistema de filtración por gravedad, la dirección de flujo será hacia abajo. Este factor es primordial para determinar de qué forma se deberá realizar el diseño del filtro. A partir de esto, se definió el tamaño del filtro, los compartimentos necesarios para el tratamiento de agua, medidas de los compartimentos externas e internas y maneras de circulación del agua.

- Tipo de lecho filtrante:

La investigación de tipo aplicada, analizó el comportamiento de dos lechos filtrantes granulares, compuestos por Antracita y biomasa de cascará de yuca (*Manihot Esculenta*), determinado como un medio dual. En el cual se determina en primera instancia la filtración con antracita y posterior la filtración con la biomasa de cascará de yuca (*Manihot Esculenta*).

- Cantidad de comportamientos:

El sistema de tratamiento este compuesto por 7 compartimientos, donde los cuales los primeros tres son compuestos por el lecho filtrante Antracita, en los siguientes tres se encontrará la biomasa de cascara de yuca (*Manihot Esculenta*), y el ultimo compartimiento es un compartimiento libre para la salida del agua ya tratada.

Los compartimientos del lecho filtrante con Antracita, debido a sus características y lo que aporta en el tratamiento de aguas contaminadas, como, remoción de turbidez, sólidos suspendidos, olores, así como la activación eficiente que quela las partículas de plomo tipo II, aumenta la adsorción de metales pesados presentes en el flujo.

El lecho filtrante de biomasa compuesto por cascara de yuca (*Manihot Esculenta*), es la encargada de realizar el tratamiento a la contaminación del agua, esto debido a la transformación química que sufre la cascara de yuca (*Manihot Esculenta*), una vez se realiza activación de sus partículas, se vuelve muy eficiente para la adsorción de metales pesados como el plomo tipo II.

- Medidas del filtro:

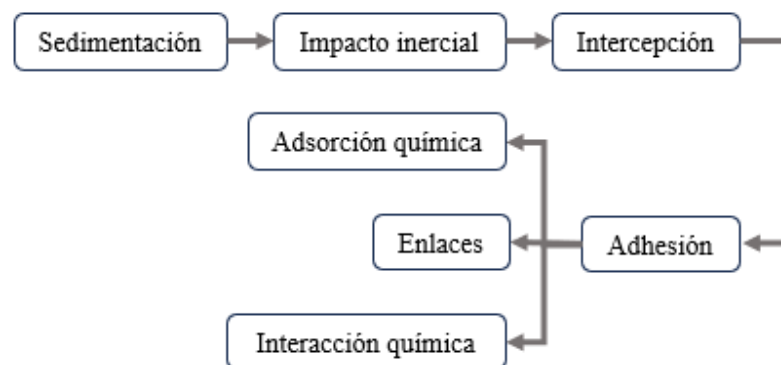
- Altura compartimientos: 15 cm
- Diámetro de los compartimientos:

- Altura total del filtro: 105 cm (115 cm)

### ***Mecanismo de remoción***

Al atravesar los diferentes estratos del lecho filtrante conformado por biomasa y antracita, el agua establece interacciones superficiales que favorecen la retención de partículas asociadas al plomo tipo II. La biomasa, previamente activada mediante el tratamiento químico correspondiente, y la antracita, por su naturaleza mineral y capacidad adsorbente, actúan de manera complementaria en los procesos de adsorción física y química, logrando la captura efectiva de los contaminantes presentes en el flujo.

**Figura 17** Diagrama de flujo del proceso de adsorción



*Nota.* Se muestra el proceso general del mecanismo de remoción del filtro. Adaptado del libro en su segunda edición “Purificación del Agua” escrito por Jairo Alberto Romero Rojas

1. Sedimentación: El flujo de agua tiene su entrada por el filtro de sedimentación, con la finalidad de que las partículas de gran tamaño sedimenten dentro de este filtro.
2. Impacto inercial: El primer compartimiento (antracita) tendrá la función de acumular sedimentos, debido a que las partículas de mayor tamaño, que aun queden en el flujo buscaran el fondo del compartimiento por la gravedad.
3. Intercepción: El flujo cuando entra en contacto con los lechos filtrantes presentes (antracita, biomasa), se removerán partículas debido a la intercepción.
4. Adhesión: Las partículas de plomo son atraídas a las capas filtrantes por fuerzas internas. Esto cubriendo los poros de los lechos filtrantes.

5. Adsorción química, enlaces, interacción química: Mediante el flujo del agua recorre todo el proceso del filtro y las partículas de plomo tienen contacto con las superficies de los lechos filtrantes (antracita, biomasa), se van efectuando la adsorción química, física y biológica.

### ***Antracita***

Para la investigación se obtuvieron dos muestras de antracita, la primera es de Santander y la segunda de Boyacá. Se realizaron los debidos ensayos para determinar la cantidad de material volátil de estos materiales granulares. Estos ensayos se realizan siguiendo un procedimiento estándar de laboratorio. Este ensayo es crítico para clasificar el carbón según su tipo y uso potencial.

***Figura 18 Antracita***



Nota. Se observa el material granular recién recibido para poder usarlo dentro de la investigación.

El procedimiento general para realizar el ensayo volátil es el siguiente:

1. Se tritura la muestra de antracita, este debe pasar por un tamiz #60 y la muestra debe estar homogenizada para asegurar que su resultado sea representativo.
2. Se pesa un gramo de la muestra anteriormente pasada por el tamiz #60 y esto debe ser con la mayor precisión posible.
3. Posterior a esto, se agrega la muestra (1 gramo) en un crisol de cerámica limpio y seco, el cual fue previamente tarado.
4. Se ingresa el crisol con la muestra en la mufla, debido a que este debe estar a una temperatura de 950° durante 7 minutos. Una recomendación para la realización de este paso, es precalentar la mufla en este caso.

5. Después del calentamiento, se retiró el crisol del horno y se dejó enfriar hasta que alcanzara la temperatura ambiente.
6. Se pesa nuevamente el crisol con la muestra enfriada para determinar la pérdida de peso debido a la volatilización.
7. Por último, se realiza el cálculo para determinar la cantidad de material volátil; usando la ecuación 1:

La ecuación 1, nos permite determinar el porcentaje de material volátil en el material granular.

$$\text{Porcentaje de material volátil} = \left( \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$

También la antracita se caracterizó con su densidad, esta se halló por medio de la masa del material por el volumen que ocupa. Para esto se realizó el siguiente procedimiento:

1. Para tener la mayor exactitud se debe limpiar toda la zona de pesaje de la balanza a utilizar.
2. Después de tener la balanza totalmente limpia, se procede a pesar y registrar la muestra en gramos
3. A continuación, se llena la probeta de 100 ml hasta el volumen de 50 ml, se sumerge totalmente la muestra de antracita y asegurándose que no contenga burbujas que puedan alterar la medición. Con la ecuación 2 se determina el volumen de la muestra.

$$\text{Volumen } (v) = v_{\text{final}} - v_{\text{inicial}} \quad (2)$$

4. Por último, se realiza el respectivo calculo para determinar la densidad del material, esto se realiza utilizando la ecuación 3:

$$\text{Densidad } (d) = \frac{\text{Masa } (m)}{\text{Volumen } (v)} \quad (3)$$

***Antracita proveniente de Santander***

Primero a esta muestra se le halló el porcentaje de material volátil usando la *Ecuación 1*, siguiendo el procedimiento explicado anteriormente.

$$\text{Porcentaje de material volátil} = \left( \frac{1,002 \text{ gr} - 0,022 \text{ gr}}{1,002 \text{ gr}} \right) \times 100$$

$$\text{Porcentaje de material volátil} = 2,196\% - \text{Antracita}$$

Posteriormente a determinar el porcentaje de material volátil, procedemos a determinar la densidad de la antracita de Santander, esto siguiendo el procedimiento explicado anteriormente.

Procedimiento:

- Peso obtenido: 10.010 g
- Volumen final: 59 ml

Usando la Ecuación 2 y 3

$$\text{Volumen } (v) = 59 - 50 \text{ ml} = 9 \text{ ml}$$

- Volumen de la muestra: 9 ml = 9 cm<sup>3</sup>

$$\text{Densidad } (d) = \frac{10.010 \text{ g}}{9 \text{ cm}^3} = 1.1122 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- Densidad: 1.1122 g/ cm<sup>3</sup>

***Antracita proveniente de Boyacá***

$$\text{Porcentaje de material volátil} = \left( \frac{1,006 \text{ gr} - 0,841 \text{ gr}}{1,006 \text{ gr}} \right) \times 100$$

$$\text{Porcentaje de material volátil} = 16.401\% - \text{Semiantracita}$$

Posteriormente a determinar el porcentaje de material volátil, procedemos a determinar la densidad de la antracita de Boyacá, esto siguiendo el procedimiento explicado anteriormente.

Procedimiento:

- Peso obtenido: 10.009 g
- Volumen final: 65 ml

Usando la Ecuación 2 y 3

$$\text{Volumen } (v) = 65\text{ml} - 50\text{ ml} = 15\text{ ml}$$

- Volumen de la muestra:  $15\text{ ml} = 15\text{ cm}^3$

$$\text{Densidad } (d) = \frac{10.009\text{ g}}{15\text{ cm}^3} = 0.6673 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- Densidad:  $0.6673\text{ g/cm}^3$

**Figura 19** Antracita en la mufla



*Nota.* Antracita en su proceso en la Mufla para determinar su % de material volátil.

**Figura 20** Reposo de la muestra de antracita



*Nota.* Reposo de la muestra en la mufla hasta alcanzar la temperatura ambiente.

### **Preparación Nitrato de plomo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$**

#### **Preparación de la Solución de Plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ )**

Para estas pruebas se realizó la preparación de solución estándar de nitrato de plomo ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) utilizando agua desionizada. Se variaron las concentraciones de  $\text{Pb}^{2+}$  entre 5, 10, 50 y 100 mg/L esto con el fin de simular distintas concentraciones de contaminación.

Para su preparación se usos una solución de 1 litro de 100 ppm de nitrato de plomo ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) en un matraz aforado.

Determinar la masa necesaria de nitrato de plomo:

La concentración de 100 ppm se refiere a que hay 100 mg de ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) por cada litro de solución.

- Masa de ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) = ppm x volumen de la solución (L)
  - Masa de ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) =  $100\text{ mg/L} \times 1\text{L} = 100\text{mg}$

Calcular la masa de nitrato de plomo a partir de su peso molecular:

El peso molecular de ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) se calcula como:

- Plomo (Pb): 207.2 g/mol
- Nitrógeno (N): 14.01 g/mol
- Oxígeno (O): 16 g/mol
  - Peso molecular de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 = 207.2 + 2 \times (14.01 + 3 \times 16) = 331.2 \text{ g/mol}$

Conversión de masa de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  en moles

$$\text{Moles de } \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 = \frac{\text{masa}}{\text{peso molecular}} = \frac{100\text{mg}}{331.2\text{g/mol}} = 0.0003026 \text{ moles}$$

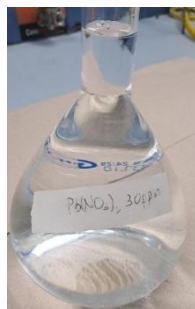
Preparación de la solución:

Pesa 100 mg de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ .

Disuelve la masa de  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  en una pequeña cantidad de agua destilada.

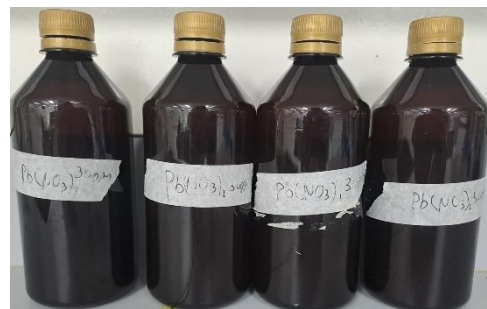
Completa con agua destilada hasta alcanzar 1 litro de solución

**Figura 21** Nitrato de plomo  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  a 30 ppm



*Nota.* Preparación de nitrato de plomo en un balón aforado a 30ppm.

**Figura 22** Muestras del Nitrato de plomo



*Nota.* Almacenamiento del Nitrato de Plomo.

### ***Toma de muestras***

Para la toma de muestras de adsorción se tuvo en cuenta una previa preparación de seguridad para evitar posibles contaminaciones de nuestra muestra.

1. Preparación previa a la toma de muestras:

- a. Limpieza de equipos: se realiza un lavado de las botellas de muestreo con agua destilada, esto para evitar contaminación cruzada, posterior a ello se desinfectaron tanto las botellas como otros equipos utilizados para el muestreo con alcohol al 70% o con solución de cloro, y como limpieza final se enjuago con agua destilada.

- b. Preparación del filtro: se verifica que el filtro vertical se encuentre correctamente alineado y con las cantidades de antracita (500g en cada una) y de biomasa de 250g, 350g y 450 g en ese orden correspondientemente y además de esto poner un geotextil adecuado para poder retener mayor tiempo el agua dentro del compartimiento.
- c. Preparación personal: tener la correcta protección para usar de forma segura el filtro y evitar contaminación por contacto directo con el agua contaminada.

### **Toma de muestras general:**

Este fue el procedimiento realizado para el ultimo muestreo realizado dentro de la investigación. El cual se quiso realizar de la manera más precisa y completa.

#### *Muestra 1:*

- Pase el agua 4 veces por la bandeja de antracita (500 g).
- Recoja el agua en una botella de muestreo estéril.
- Etiquete: “Muestra 1: 4 pasos por antracita de 500 g”.

#### *Muestra 2:*

- Pase el agua 4 veces por antracita (500 g) y 1 vez por biomasa (250 g).
- Recoja el agua en la botella de muestreo.
- Etiquete: “Muestra 2: 4 pasos por antracita de 500 g y 1 paso por biomasa de 250g”.

#### *Muestra 3:*

- Pase el agua 4 veces por antracita (500 g) y 1 vez por biomasa (350 g).
- Etiquete: “Muestra 3: 4 pasos por antracita de 500 g y 1 paso por biomasa de 350 g”.

#### *Muestra 4:*

- Pase el agua 4 veces por antracita (500 g) y 1 vez por biomasa (450 g).
- Etiquete: “Muestra 4: 4 pasos por antracita de 500 g y 1 paso por biomasa de 450 g”.

#### *Muestra 5:*

- Pase el agua 1 vez por biomasa (250 g).
- Etiquete: “Muestra 5: 1 paso por biomasa de 250 g”.

#### *Muestra 6:*

- Pase el agua 1 vez por biomasa (350 g).

- Etiqueta: “Muestra 6: 1 paso por biomasa de 350 g”.

*Muestra 7:*

- Pase el agua 1 vez por biomasa (450 g).
- Etiqueta: “Muestra 7: 1 paso por biomasa de 450 g”.

*Muestra 8 (repetición de Muestra 2):*

- Pase el agua 4 veces por antracita (500 g) y 3 veces por biomasa (250 g).
- Etiqueta: “Muestra 8: 4 pasos por antracita de 500 g y 3 pasos por biomasa de 250 g”.

*Muestra 9 (repetición de Muestra 3):*

- Pase el agua 4 veces por antracita (500 g) y 3 veces por biomasa (350 g).
- Etiqueta: “Muestra 9: 4 pasos por antracita de 500 g y 3 pasos por biomasa de 350 g”.

*Manejo post-muestreo*

- Cierre bien las botellas evitando cualquier contaminación.
- Guarde las muestras en una nevera portátil con hielo, sin permitir que se congelen.
- Transporte y almacenamiento
- Mantenga las muestras refrigeradas y protegidas del sol y de temperaturas extremas.

**Figura 23** Disposición de la biomasa



*Nota. Se procede a disponer de los lechos filtrantes en el filtro.*

**Figura 24** Vertimiento del  $Pb(NO_3)_2$



*Nota. Se vierte la muestra patrón de Nitrato de Plomo en el filtro.*

**Figura 25** Tratamiento de la muestra patrón del  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$



*Nota. Se realiza el tratamiento a la muestra patrón Nitrato de plomo para determinar la eficiencia del tratamiento.*

**Análisis de laboratorio:**

En el laboratorio, determine la concentración de plomo en cada muestra mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) u otro método validado.

## Resultados

En esta investigación se efectuaron análisis químicos a la biomasa de cáscara de yuca sometida a distintos tratamientos químicos, con el propósito de comparar el comportamiento y las propiedades aportadas por cada uno de ellos, e identificar así el tratamiento más eficiente. Adicionalmente, se evaluaron muestras previamente tratadas junto con la muestra patrón original, con el fin de determinar la eficacia del proceso aplicado.

### Resultados de los procedimientos químicos

Se aplicaron tres tratamientos químicos a la cáscara de yuca previamente triturada y tamizada, con el objetivo de activar y mejorar sus propiedades para la adsorción de metales pesados, específicamente plomo (Pb) tipo II. Una vez obtenidas las biomásas tratadas, se realizaron análisis mediante espectrofotometría en laboratorio y se evaluaron los resultados para identificar cuál de los tratamientos ofrece el mejor desempeño para su aplicación en la investigación.

#### *Muestra 1 — Tratamiento $H_2SO_4$ + cítrico*

Bandas principales: 2920 y 2850 (C–H); 1720 (C=O); 1604 (C=C); 1411 y 1369 ( $CH_2/CH_3$ ); 1242, 1149 y 1076 (C–O); 759 (aromático fuera del plano).

Lectura química: evidencia de carbonilos y matriz rica en C–O; el ácido cítrico puede promover esterificación (aumento de C=O/C–O) y el  $H_2SO_4$  hidrolizar polisacáridos (cambios en –OH/C–O).

#### *Muestra 2 — Tratamiento con ácido cítrico*

Bandas principales: 2924 (C–H); 1739 (C=O, el más intenso entre las tres); 1612 (C=C); 1411 y 1365 ( $CH_2/CH_3$ ); 1242, 1145 y 1076 (C–O); 759 (aromático fuera del plano).

Lectura química: incremento claro de carbonilos, coherente con formación de ésteres (esterificación por ácido cítrico).

### ***Muestra 3 — Tratamiento con ácido sulfúrico***

Bandas principales: 2920 y 2850 (C–H); 1732 (C=O); 1604 (C=C); 1415 y 1369 (CH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>); 1242, 1149 y 1076 (C–O). Señales adicionales a baja frecuencia: 524 y 466 cm<sup>-1</sup>, compatibles con vibraciones M–O (metal–oxígeno), ausentes en M1/M2.

Lectura química: además de C=O y C–O, posible presencia de residuos inorgánicos/minerales.

### ***Análisis FTIR de Cáscaras de Yuca (Manihot suculenta) – Informe Detallado***

El análisis FTIR se empleó para identificar grupos funcionales presentes en cáscaras de yuca sometidas a diferentes tratamientos químicos, centrándose en carbonilos, fenoles y alcoholes. Los espectros abarcan de 400 a 4000 cm<sup>-1</sup>, con porcentajes de transmitancia entre el 30% y el 100%. Las variaciones de intensidad y posición de los picos permiten inferir la presencia y abundancia relativa de determinados enlaces químicos.

- Metodología e interpretación básica del FTIR
  - Rango espectral 400–4000 cm<sup>-1</sup>: ventana típica para compuestos orgánicos.
  - % de transmitancia: las caídas (valles) indican absorciones debidas a vibraciones de enlaces.
  - Bandas guía en biomasa: ~2920/2850 (C–H alifáticos), ~1730–1740 (C=O:ésteres/ácidos/aldehídos/cetonas), ~1600 (C=C aromático/olefínico), ~1400–1370 (deformaciones CH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>), 1240–1000 (C–O en alcoholes/fenoles/ésteres/éteres).

### ***Tabla comparativa cualitativa de grupos funcionales***

Escala de intensidad relativa:

- No observado: (–)
- Débil: (+)
- Media: (++)
- Fuerte: (+++)

**Tabla 5.** Resultados obtenidos en el análisis de las muestras de tratamientos químicos

Grupo funcional	Pico(s) característicos (cm <sup>-1</sup> )	Muestra 1 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + cítrico)	Muestra 2 (Cítrico)	Muestra 3 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Observaciones
C-H (alifático)	2920, 2850	++	++	++	Comunes en biomasa.
C=O (carbonilo)	1730–1740 (1720/1732/1739)	+	+++	++	M2 presenta el C=O más intenso.
C=C (aromático/olefínico)	1604–1612	+	+	+	Relacionado con lignina/olefinas.
CH <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> (deformaciones)	1411–1369	++	++	++	Intensidades similares.
C-O (alcohol/fenol/éter/éster)	1242	++	++	++	Similares en las tres muestras.
C-O (alcohol/fenol/éter/éster)	1145–1149	++(+)	++	++(+)	M1 y M3 ligeramente mayores en ~1149.
C-O (alcohol/fenol/éter/éster)	1076	++	++	++	Similares en las tres muestras.
Aromático (fuera del plano)	759	+	+	+	Presente en las tres.
M-O (metal-oxígeno)	524, 466	-	-	+	Solo en M3.

*Nota.* Se realizó una comparativa entre los tres tratamientos químicos realizados a la cascara de yuca triturada esto mediante los resultados obtenidos del laboratorio, con la finalidad de determinar cuál es el mejor tratamiento químico para la activación de la biomasa.

### **Conclusiones comparativas del tratamiento químico de la biomasa.**

- Las tres muestras comparten señales de C-H, C=O y C-O típicas de matrices lignocelulósicas.
- Muestra 2 exhibe la mayor intensidad de C=O (1739 cm<sup>-1</sup>), compatible con esterificación por ácido cítrico.
- Muestra 3 presenta bandas a 524/466 cm<sup>-1</sup> compatibles con M-O, indicando diferencias composicionales por posibles residuos minerales/inorgánicos.
- La región C-O (1242/1145–1149/1076 cm<sup>-1</sup>) es similar en las tres, con ligera ventaja de M1 y M3 cerca de 1149 cm<sup>-1</sup>.

### **Primer muestreo de patrones de Nitrato de Plomo tratado (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.)**

Dentro de la primera toma de muestras realizados de toma de plomo total en agua, usando la técnica de ICP-OES, junto con la referencia de la norma EPA 200.7 Rev 5 Mod encontramos los siguientes resultados:

**Tabla 6.** Resultados del primer muestreo del proceso de tratamiento.

No. muestra	Parámetro	Resultado	Unidades	Incert
1	Plomo total	30,5	mg/L	+/- 10,9%
2	Plomo total	3,08	mg/L	+/- 10,9%
3	Plomo total	2,93	mg/L	+/- 10,9%

*Nota.* En este primer muestreo se evidencio una gran reducción en el plomo, lo que demuestra la eficiencia de la biomasa para el tratamiento del plomo tipo II en el agua.

Este muestre se realizó de la siguiente manera:

- La primera muestra en este estudio es una muestra patrón de nitrato de plomo sin tratar.
- La segunda muestra es de un primer proceso de tratamiento a la muestra patrón de nitrato de plomo con la biomasa de cascara de yuca.
- A la tercera muestra se le realizo dos procesos de tratamiento a la muestra patrón de nitrato de plomo con la biomasa de cascara de yuca.

### Segundo muestreo de patrones de Nitrato de Plomo tratado ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ .)

Este muestreo se efectuó de manera más amplia, haciendo pasar las muestras varias veces por las bandejas que contenían la biomasa y, posteriormente, por el material granular (antracita). El propósito fue evaluar la eficiencia de múltiples capas con el fin de la implementación de un sistema de tratamiento más efectivo.

#### *Parámetros instrumentales*

- Equipo: IRTracer-100
- Escaneos: 32
- Resolución:  $8 \text{ cm}^{-1}$ .

Una resolución de  $8 \text{ cm}^{-1}$  es adecuada para perfiles generales; para separar bandas muy cercanas se recomienda  $4 \text{ cm}^{-1}$  o menor.

*Resultados obtenidos:*

Los datos obtenidos en este muestreo, representaron sesgos dentro de las muestras, esto debido a que el agua contaminada con plomo no logro estar en total contacto con la biomasa, sin embargo, incluso sin estar en contacto con toda la biomasa y además de esto no se contaba con una biomasa en su totalidad virgen ya que fue usada en el anterior muestreo, pero a pesar de ello se obtuvo una gran efectividad en reducir la cantidad de plomo de la muestra patrón.

**Tabla 7.** Resultados obtenidos del segundo muestreo.

Item	Descripción	Resultado	Unidades
1	Muestra patrón 30 ppm	10.4	mg/l
2	1 paso por 500g de antracita	7.01	mg/l
3	2 paso por 500g de antracita	13.1	mg/l
4	3 paso por 500g de antracita	7.01	mg/l
5	4 paso por 500g de antracita	6.39	mg/l
6	4 paso por 500g de antracita + 1 paso por 250g de biomasa	11.2	mg/l
7	4 paso por 500g de antracita + 1 paso por 350g de biomasa	9.06	mg/l
8	4 paso por 500g de antracita + 1 paso por 450g de biomasa	10.7	mg/l
9	4 paso por 500g de antracita + 2 pasos por 450g de biomasa	8.63	mg/l
10	4 paso por 500g de antracita + 3 pasos por 450g de biomasa	6.43	mg/l

*Nota.* En este muestreo se presentaron sesgos dentro de los resultados, pero a pesar de esto se comprobó la eficiencia de este proceso de tratamiento en la retención de metales pesados.

*Datos sin sesgo:*

Se eliminaron las muestras atípicas dentro de los resultados dejando los datos más óptimos para continuar con un correcto análisis. Como se puede observar en la tabla presentada a continuación.

**Tabla 8.** Resultados sin sesgos del segundo muestreo.

Item	Descripción	Resultados	Unidades
1	Muestra patrón 30 ppm	10.4	mg/l
2	1 paso por 500g de antracita	7.01	mg/l
4	3 paso por 500g de antracita	7.01	mg/l
5	4 paso por 500g de antracita	6.39	mg/l
7	4 paso por 500g de antracita + 1 paso por 350g de biomasa	9.06	mg/l
9	4 paso por 500g de antracita + 2 pasos por 450g de biomasa	8.63	mg/l
10	4 paso por 500g de antracita + 3 pasos por 450g de biomasa	6.43	mg/l

*Nota.* Se eliminaron los sesgos presentados dentro de los resultados para poder analizar de mejor manera la eficiencia del proceso de tratamiento.

## Discusión

El desarrollo del presente estudio permitió evaluar la eficacia de un filtro elaborado a partir de biomasa de cáscara de yuca y antracita para la remoción de plomo tipo (II) en aguas residuales. Los resultados obtenidos evidencian que la combinación de dichos materiales constituye una alternativa funcional dentro del campo de la adsorción de metales pesados, respaldando la premisa inicial del proyecto. Sin embargo, si bien la propuesta presenta resultados alentadores, es necesario analizarlos a la luz de criterios técnicos, científicos y de aplicabilidad real con el fin de valorar con mayor rigor su alcance y pertinencia.

En primera instancia, el desempeño positivo del filtro confirma el potencial de la cáscara de yuca como adsorbente, resultado coherente con estudios que destacan la capacidad de biomásas lignocelulósicas para retener iones metálicos gracias a su composición química. No obstante, la efectividad demostrada en laboratorio no garantiza automáticamente su eficiencia en condiciones operativas a gran escala. La variabilidad físico-química del agua residual real, la presencia de otros contaminantes competidores y las fluctuaciones de pH, temperatura y carga hidráulica podrían disminuir su desempeño en aplicaciones fuera del entorno controlado. Esto sugiere que, aunque el estudio valida una alternativa prometedora, su uso práctico requiere una fase posterior de optimización y calibración en escenarios reales.

Adicionalmente, la incorporación de antracita mejoró la remoción del metal al actuar como medio granular complementario. Sin embargo, el estudio no profundizó en la comparación del desempeño de cada material por separado ni en la proporción óptima entre biomasa y antracita que maximice la capacidad de adsorción. Este vacío limita la posibilidad de identificar si la efectividad se debe principalmente a la biomasa, a la antracita o a la sinergia entre ambas. Tampoco se evaluó la capacidad de regeneración o reutilización del adsorbente, un factor clave para determinar si la propuesta es realmente sostenible o si, por el contrario, podría generar otro flujo de residuos contaminados tras su uso.

Otra consideración relevante es que el diseño del filtro se centró en la remoción de plomo tipo (II) como contaminante único. Aunque esto permitió validar la hipótesis central, no refleja las condiciones multifactoriales de las aguas residuales que suelen contener mezclas de metales pesados, sólidos suspendidos, materia orgánica y compuestos químicos que podrían interferir en los mecanismos de adsorción. Esto reduce la aplicabilidad del sistema en contextos de tratamiento

integral, por lo que futuros trabajos deberán evaluar el comportamiento del filtro frente a matrices más complejas y cargas contaminantes simultáneas.

Pese a estas limitaciones, la propuesta destaca por su enfoque en el aprovechamiento de residuos agrícolas, lo que la alinea con principios de sostenibilidad y economía circular. La transformación de la cáscara de yuca comúnmente desechada sin valorización en un insumo para el tratamiento de aguas residuales no solo aporta un beneficio ambiental, sino que también abre posibilidades para el desarrollo de tecnologías accesibles a comunidades con recursos limitados. No obstante, esta iniciativa deberá considerar la disponibilidad estacional del material, la variabilidad en su composición y los procesos requeridos para su acondicionamiento y activación, pues estos factores pueden influir en su eficiencia y costo final.

En síntesis, aunque la investigación demuestra que el filtro a base de cáscara de yuca y antracita logra una remoción efectiva de plomo tipo (II) y representa una alternativa viable y de bajo costo, su implementación requiere precaución y mayor investigación. El estudio ofrece una base valiosa, pero también deja claro que el sistema debe someterse a pruebas de durabilidad, optimización y escalabilidad antes de ser considerado como una solución complementaria dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. La evidencia invita a continuar explorando su potencial, pero desde una perspectiva más amplia, rigurosa y orientada a la aplicación real.

## Conclusiones

- El presente proyecto permitió comprobar que el uso de un sistema de tratamiento compuesto por biomasa obtenida a partir de cáscara de yuca modificada químicamente, combinada con antracita como material granular, constituye una alternativa eficiente, sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con plomo tipo (II). Esta propuesta aprovecha recursos locales y disminuye la dependencia de tecnologías costosas, lo que la convierte en una opción accesible para comunidades y municipios que enfrentan problemas de contaminación hídrica.
- La biomasa químicamente modificada junto con el uso del material granular de antracita según los resultados obtenidos se evidencia la alta remoción de plomo tipo II a pesar de no tener las condiciones más ideales.
- En esta investigación se usaron tres procesos químicos para evaluar su eficacia en la modificación de la estructura química de la biomasa, los cuales fueron con ácido cítrico, ácido sulfúrico y una combinación de ambos, según las pruebas realizadas en el espectrofotómetro se eligió por sus picos más estables en fenoles y un aumento en su propiedad quelante el uso del proceso combinado de ácido sulfúrico y ácido cítrico.
- La antracita contribuyó significativamente a la retención de sólidos, olores y metales pesados, actuando como medio granular primario; mientras que, por otro lado, la biomasa activada reforzó los procesos de adsorción física y química, permitiendo una sinergia efectiva en el sistema implementado.
- El sistema de tratamiento demostró ser viable y replicable, dado que los materiales empleados son de fácil adquisición dentro de la región y no requieren infraestructura especializada para su implementación. Esto evidencia que el método puede adaptarse a diferentes contextos, especialmente en zonas con recursos limitados, promoviendo soluciones ambientales basadas en economía circular y aprovechamiento de residuos agrícolas.
- Este trabajo evidencia que es posible desarrollar tecnologías limpias y de bajo costo a partir de recursos locales, contribuyendo directamente al cumplimiento de los objetivos nacionales de sostenibilidad ambiental y al mejoramiento de la calidad del agua en zonas afectadas por vertimientos contaminantes.

- Es necesario estudiar el manejo posterior de la biomasa saturada con plomo. Estudiar y determinar si es posible su regeneración o lograr una disposición final segura, en fin, de lograr una mayor viabilidad del proyecto y que de esta manera escale a niveles industriales o se puede aplicar a un nivel comunitario.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2016, mayo 6). *Resúmenes de salud pública: Plomo (Pb)*. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs13.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html)
- Agrosavia. (2024). *Manual para la producción y escalamiento de semilla de yuca*. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/39823/Ver\\_Documento\\_39823.pdf](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/39823/Ver_Documento_39823.pdf)
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM D388-19a: Standard classification of coals by rank*. ASTM International.
- Atkins, P. (2018). *Física química*. Editorial Médica Panamericana.
- Bonilla, H., & Torres, C. (2019). Obtención de isothermas de adsorción del plomo (II) de efluentes mineros utilizando carbón activado de cáscara de naranja. *Ciencia y Desarrollo*, 21. 29-36. <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/727>
- Construneic. (2022, abril 30). *Ensayo de granulometría en mecánica de suelos*. <https://construneic.com/mecanica-de-suelos/granulometria/>
- Díaz, L. J. (2013, junio 17). El bagre rayado del río Meta está contaminado. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12877063>
- Díaz, S. M., Varona-Uribe, M. E., Sánchez-Infante, C. I., & Idrovo, A. J. (2020). Exposición a plomo y mercurio en poblaciones ribereñas del río Bogotá: Un estudio multimétodo. *Revista de Salud Pública*, 21(1). 1-8. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-00642019000100001](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-00642019000100001)
- Estupiñán, H. A., & Valencia, C. (2006). Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para aplicaciones en hidrometalurgia. *Revista Facultad de Ingeniería*, (37), 31-40. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n37/n37a03.pdf>
- González-M., J. A., & Maldonado-Ocampo, J. A. (s. f.). Evaluación de marcadores de exposición a contaminantes en especies de bagres colombianos (Siluriformes). *Biota Colombiana*. 15(Supl.1). 40-51. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/341>
- Hernández-Rodríguez, C. B., García-Martínez, A. M., Gómez-Méndez, A. M., & Muñoz-Arias, M. (2021). Niveles de plomo reportados en diferentes matrices ambientales en Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 25. [https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/IUED/25%20\(2021\)/47762366019/index.html](https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/IUED/25%20(2021)/47762366019/index.html)

- Londoño, P. L. (2016). Los riesgos de los metales pesados para la salud humana y el ambiente. *Boletín de la Sociedad Antioqueña de Astronomía*, 14(2), 87–96. <http://scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
- Lozano-Rivas, W. A. (2015). *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*. Universidad Piloto de Colombia.
- Microtrac. (s. f.). *Specific surface area*. <https://www.microtrac.com/applications/knowledge-base/specific-surface-area/>
- Narita, E. O. (1984). The formation and solubility of lead(II) compounds prepared by hydrolysis of lead(II) nitrate. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 57(2), 309–310.
- Patiño Acosta, Y. F., & Sánchez Medina, A. C. (2020). *Identificación y comparación de metales pesados (Pb, Cr y Zn) en el río Ocoa y fuentes antrópicas asociadas, Villavicencio-Meta* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11634/28002>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. R. (2015). *Introducción a la espectroscopía* (5.ª ed.). Cengage Learning.
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365–385. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018327971>
- Robards, K., & Worsfold, . (2011). Cadmium toxicology and analysis: A review. *Analytical Methods*, 3(3), 549–568. <https://doi.org/10.1039/an9911600549>
- Robles Lora, M. A., Vilchez Moscol, . J., Ecurra Lagos, . J. C., & Diaz Diaz, N. del P. (2025). Carbón activado de cáscara de plátano en la adsorción de metales pesados. *Revista Alfa*, 9(5). 153-163. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i25.33>
- Romero Rojas, J. A. (2021). *Purificación del agua*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Tejada, C. N., Montiel, Z., & Acevedo, D. (2016). Aprovechamiento de cáscaras de yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Pb(II). *Información Tecnológica*, 27(1), 89–98. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642016000100003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000100003)

- Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2015). Niveles de contaminación en sectores urbanos de Villavicencio mediante el índice de geoacumulación. *Orinoquia*, 19(1), 45–56. [https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/344/pdf\\_36](https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/344/pdf_36)
- Trujillo-González, J. M., Pérez, E., & Espinosa, L. (2024). Análisis comparativo de metales pesados en polvo vial de municipios del Meta, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1). 339-356. <https://doi.org/10.22490/21456453.8243>
- United Nations Environment Programme. (1998). *Copper: Environmental health criteria 200*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/29476>