



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS  
COMO ADSORBENTES PARA LA REMOCIÓN DE PLOMO EN EL RÍO TAHUANDO**

**IVAN STEFAN NARANJO GALINDO**

**TUTORA: MORAIMA CRISTINA MERA AGUAS**

**IBARRA – ECUADOR**

**FEBRERO, 2025**

Ibarra, 24 de febrero de 2025

## CERTIFICACIÓN TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Integración Curricular titulado ***EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS COMO ADSORBENTES PARA LA REMOCIÓN DE PLOMO (P) EN EL RÍO TAHUANDO***, presentado por el estudiante Ivan Stefan Naranjo Galindo con cédula de ciudadanía N° 171880834-6, para obtener el Título de Ingeniero Ambiental.

Certifico que el trabajo cumple con todos los parámetros establecidos, mediante el cual el estudiante demuestra el desarrollo de competencias en el campo de conocimiento de su profesión con un nivel de argumentación coherente, para ser sometido a la evaluación por parte de los lectores.

Adicionalmente, se adjunta el certificado de porcentaje de originalidad de TURNITIN.

### Tesis Stefan Naranjo

INFORME DE ORIGINALIDAD



ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

< 1%

★ [www.eriesjournal.com](http://www.eriesjournal.com)

Fuente de Internet

Mgs. Moraima Mera  
**TUTOR DE TRABAJO**  
C.C.: 1001743721


## PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El tribunal examinador, aprueba el presente trabajo en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra:

(f):  .....

Mgs. Moraima Mera

C.C. 100174372-1

(f):  .....

MSc. Diego Mejía

C.C.: 100191296-1

(f):  .....

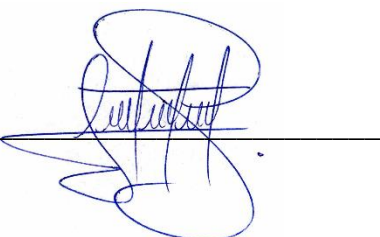
Dr. Rubén Del Toro

C.C.: 175754447-1

## ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Ivan Stefan Naranjo Galindo*, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derechos de disponer de sus derechos o autorizar las utilidades de sus obras o prestaciones a título gratuito y oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 14 de febrero de 2025

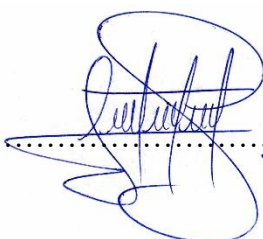
(f): 

*Ivan Stefan Naranjo Galindo*

C.C.: 171880834-6

## AUTORIA

Yo, *Ivan Stefan Naranjo Galindo*, portador de la cédula de ciudadanía N° 171880834-6, declaro que el presente trabajo de investigación es de total responsabilidad del autor, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.

(f):.....

*Ivan Stefan Naranjo Galindo*

C.C.: 171880834-6

## **DEDICATORIA**

Una dedicatoria especial para quienes supieron, desde el inicio, que mis límites están más allá del horizonte, y que, incluso en la tormenta la marea no me arrastraría.

Te lo dije mamá, te lo dije que lo lograría...

## AGRADECIMIENTO

No cabrían palabras suficientes para expresar mi gratitud hacia quienes confiaron en mí desde el principio y depositaron sus esperanzas en la búsqueda de mis sueños. Gracias a toda mi familia por su cariño.

Un especial agradecimiento a mi madre, Betty, por ser la razón de quien soy hoy y de quien aspiro a ser cada día; a mi padre, Edgar, por darme las herramientas con las que he construido mi vida; a Evelin cuya confianza en mí me motivó a superarme a diario; y a Mauricio por asegurarse de que, incluso en mis momentos más ocupados, no me olvide de lo esencial. A Melissa, la compañera de vida que siempre ha sabido levantarme cuando mi mundo parecía estar al revés, celebrar cada uno de mis logros y estar presente sin importar el tiempo ni la distancia. A mi abuela Amparo, que representa la calidez de una segunda madre, y a la memoria de mi Oma, quien desde el cielo se llena de orgullo con cada paso que doy.

A Emilio, el colega que estuvo presente en mis más largos desvelos y siempre supo cómo alegrar mi día con su presencia.

Gracias también a las personas que conocí durante esta travesía, a mis amigos de carrera, con quienes los buenos momentos nunca faltaron: Matías, Kevin y Lizbeth. A mis docentes, que con pasión y ejemplo inculcaron en mí los valores y conocimientos que hoy me definen, especialmente a Moraima Mera, cuya guía y apoyo durante toda mi carrera me impulsaron a ser mejor.

Por último, y no menos importante, quiero agradecerme a mí, por creer en mí, por nunca trazar límites, no conformarme ni ceder ante lo fácil, y apostar siempre por más. Por hacer de cada desafío un peldaño, de cada sueño una meta y de cada caída, un motivo para levantarme. Por ser yo.

*Say No More.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN TUTOR .....	ii
PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iii
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS.....	iv
AUTORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I .....	3
INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO II.....	5
OBJETIVOS .....	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos Específicos.....	5
2.3. Hipótesis .....	5
2.3.1. Hipótesis Estadísticas: .....	5
CAPÍTULO III.....	6
ESTADO DEL ARTE .....	6
3.1. Eficiencia de materiales lignocelulósicos en la remoción de metales pesados.....	6
3.1.1. Materiales lignocelulósicos: propiedades y composición.....	6
3.1.2. Parámetros operativos.....	9
3.1.3. Estudios previos sobre la remoción de metales pesados con materiales lignocelulósicos .....	11
3.2. Impacto ambiental y salud pública de la contaminación por metales pesados .....	14
3.2.1. Efectos en ecosistemas acuáticos.....	14
3.2.2. Riesgos para la salud humana .....	16
3.2.3. Regulaciones ambientales.....	17

3.3.	Estudios previos sobre el río Tahuando. ....	18
3.3.1.	Sitios de muestreo .....	18
3.3.2.	Datos obtenidos de concentraciones de plomo .....	20
CAPÍTULO IV.....		21
MATERIALES Y MÉTODOS.....		21
4.1.	Geolocalización.....	21
4.1.1.	Provincia .....	21
4.1.2.	Cantón .....	21
4.1.3.	Parroquias .....	22
4.1.4.	Sector .....	22
4.1.5.	Coordenadas geográficas .....	23
4.1.6.	Gráfica de localización .....	23
4.2.	Variables.....	25
4.2.1.	Variable independiente.....	25
4.2.2.	Variables dependientes.....	26
4.2.3.	Variables controladas .....	26
4.3.	Diseño experimental .....	27
4.3.1.	Análisis funcional .....	27
4.3.2.	Unidades experimentales .....	28
4.3.3.	Factores de estudio.....	29
4.3.4.	Tratamientos.....	30
4.3.5.	Esquema ANOVA .....	31
4.4.	Manejo específico del experimento .....	32
4.4.1.	Caracterización de plomo en el río Tahuando.....	32
4.4.2.	Metodología para la remoción de plomo .....	35
CAPÍTULO V.....		40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		40
5.1.	Caracterización de plomo en el río Tahuando.....	40
5.2.	Resultados de la remoción de plomo .....	42
5.3.	Análisis de resultados .....	44

5.3.1.	Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas .....	44
5.3.2.	Resultados ANOVA .....	45
5.3.3.	Prueba de significancia .....	46
5.4.	Interpretación y discusión .....	47
CAPÍTULO VI.....		49
CONCLUSIONES .....		49
CAPÍTULO VII .....		50
RECOMENDACIONES.....		50
CAPÍTULO VIII.....		51
BIBLIOGRAFÍA .....		51
CAPÍTULO IX.....		65
ANEXOS .....		65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Puntos de muestreo de estudio previo .....	18
<b>Tabla 2.</b> Concentraciones de plomo en el río Tahuando según estudio previo .....	20
<b>Tabla 3.</b> Puntos de muestreo río Tahuando .....	22
<b>Tabla 4.</b> Coordenadas geográficas de puntos de muestro río Tahuando .....	23
<b>Tabla 5.</b> Análisis de varianza ANOVA.....	31
<b>Tabla 6.</b> Resultados de absorbancia de estándares .....	34
<b>Tabla 7.</b> Concentraciones de plomo en el río Tahuando.....	41
<b>Tabla 8.</b> Concentraciones finales y porcentaje de remoción .....	43
<b>Tabla 9.</b> Pruebas de normalidad y homogeneidad.....	44
<b>Tabla 10.</b> Resultados del análisis de varianza ANOVA. ....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Grupos hidroxilo.....	7
<b>Figura 2.</b> Grupos carboxilo .....	8
<b>Figura 3.</b> Grupos fenólicos.....	8
<b>Figura 4.</b> Grupos éter .....	9
<b>Figura 5.</b> Puntos de muestro río Tahuando según estudio previo .....	19
<b>Figura 6.</b> Puntos de muestreo río Tahuando.....	24
<b>Figura 7.</b> Curva de calibración de estándares de plomo .....	34
<b>Figura 8.</b> Aleatorización de unidades experimentales .....	39
<b>Figura 9.</b> Comparación de porcentajes de remoción entre tratamientos.....	46

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Cálculo de unidades experimentales .....	29
<b>Ecuación 2.</b> Cálculo del porcentaje de remoción.....	38

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Toma de muestras río Tahuando.....	65
<b>Anexo 2.</b> Preparación de muestras.....	65
<b>Anexo 3.</b> Lectura de muestras .....	66
<b>Anexo 4.</b> Preparación de materiales lignocelulósicos .....	66
<b>Anexo 5.</b> Preparación de filtros .....	67
<b>Anexo 6.</b> Montaje del experimento .....	67
<b>Anexo 7.</b> Lectura de concentraciones final.....	68

## RESUMEN

La contaminación por metales pesados, como el plomo en cuerpos de agua representa un riesgo crítico para la salud pública y los ecosistemas. En el río Tahuando (Ecuador), se detectó una concentración media de plomo de 0.030 ppm, 30 veces superior al límite permisible (0.001 ppm) establecido en la Tabla 2 (Criterios de Calidad Admisibles para la Preservación de la Vida Acuática y Silvestre en Aguas Dulces, Marinas y de Estuarios) del Acuerdo Ministerial 097-A del Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2015). Este estudio evaluó la eficiencia de materiales lignocelulósicos de bagazo de caña y cascarilla de café como adsorbentes naturales para la remoción de plomo, utilizando carbón activado como referencia. Las muestras de agua contaminada se sometieron a un proceso de adsorción en condiciones controladas, y las concentraciones residuales de plomo se cuantificaron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) con módulo de llama, utilizando una mezcla de aire-acetileno para la atomización. Los resultados mostraron que el carbón activado alcanzó la mayor eficiencia (95.08%), seguido por la cascarilla de café (75.73%) y el bagazo de caña (65.11%). Aunque el carbón activado demostró superioridad técnica, los materiales lignocelulósicos destacan como alternativas económicas y de bajo impacto ambiental, con potencial para integrarse en estrategias de biorremediación de aguas contaminadas. Este trabajo aporta evidencia científica para la gestión sostenible de recursos hídricos en zonas afectadas por metales pesados, promoviendo el uso de residuos agrícolas como soluciones viables y ecológicas.

**Palabras clave:** metales pesados, biorremediación, adsorbentes naturales, recursos hídricos, residuos agrícolas.

## ABSTRACT

Heavy metal contamination, such as lead, in water bodies poses a critical risk to public health and ecosystems. In the Tahuando River (Ecuador), an average lead concentration of 0.030 ppm was detected, 30 times higher than the permissible limit (0.001 ppm) established in Table 2 (Acceptable Quality Criteria for the Preservation of Aquatic and Wildlife in Freshwater, Marine, and Estuarine Waters) of Ministerial Agreement 097-A from the Ministry of Environment, Water, and Ecological Transition (2015). This study evaluated the efficiency of lignocellulosic materials, specifically sugarcane bagasse and coffee husk, as natural adsorbents for lead removal, using activated carbon as a reference. Contaminated water samples underwent an adsorption process under controlled conditions, and residual lead concentrations were quantified using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) with a flame module, using an air-acetylene mixture for atomization. The results showed that activated carbon achieved the highest efficiency (95.08%), followed by coffee husk (75.73%) and sugarcane bagasse (65.11%). Although activated carbon demonstrated superior technical performance, lignocellulosic materials stand out as cost-effective and environmentally friendly alternatives, with potential for integration into bioremediation strategies for contaminated water. This study provides scientific evidence for the sustainable management of water resources in areas affected by heavy metals, promoting the use of agricultural waste as viable and ecological solutions.

**Keywords:** heavy metals, bioremediation, natural adsorbents, water resources, agricultural waste.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua ha generado una creciente preocupación a nivel mundial debido a sus efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Entre estos metales, el plomo es especialmente peligroso por su toxicidad, persistencia en el ambiente y capacidad de bioacumulación en la cadena trófica (Giusto, 2015). Su presencia en fuentes hídricas se debe principalmente a actividades antropogénicas como la minería, la industria y la disposición inadecuada de residuos (Londoño et al., 2016). En Ecuador, esta problemática es evidente en cuerpos de agua como el río Tahuando, donde estudios previos han identificado concentraciones de plomo que superan ampliamente los límites permisibles establecidos en normativas ambientales (García, 2020).

Frente a esta problemática, la búsqueda de soluciones eficientes, económicas y sostenibles para la remoción de plomo del agua es de gran importancia. En este contexto, el uso de materiales lignocelulósicos como adsorbentes ha demostrado ser una alternativa viable, gracias a su abundancia, bajo costo y capacidad de adsorción de metales pesados. Estos materiales, compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina, poseen grupos funcionales que facilitan la captura de contaminantes en soluciones acuosas (Vera et al., 2016). Su aplicación no solo contribuye a la mejora de la calidad del agua, sino que también fomenta el aprovechamiento de residuos agrícolas, promoviendo un enfoque de economía circular y sostenibilidad ambiental.

Este estudio busca evaluar la eficiencia de materiales lignocelulósicos, específicamente el bagazo de caña y la cascarilla de café, en la remoción de plomo del agua del río Tahuando. Como referencia, se utilizará carbón activado, un adsorbente comercial ampliamente empleado en tratamientos de agua. La metodología incluirá experimentos de adsorción en condiciones controladas y análisis mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) para cuantificar la concentración de plomo antes y después del tratamiento.

Los resultados de esta investigación aportarán información valiosa sobre el potencial de estos materiales como alternativas ecológicas en la remediación de aguas contaminadas, con posibles aplicaciones en estrategias locales de tratamiento de agua. Además, este trabajo busca generar conocimiento que contribuya a la toma de decisiones en el ámbito ambiental y a la

implementación de tecnologías sostenibles en comunidades afectadas por la contaminación del agua.

## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de materiales lignocelulósicos como adsorbentes para la remoción de plomo en el agua del río Tahuando con la finalidad de mejorar su calidad del agua.

#### 2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de plomo en el agua del río Tahuando mediante métodos analíticos.
- Analizar la eficiencia de materiales lignocelulósicos como alternativa sostenible en la remoción de plomo en el agua del río Tahuando.

#### 2.3. Hipótesis

El uso de materiales lignocelulósicos para remover plomo del agua proveniente del río Tahuando tiene una significativa reducción de la concentración de dicho contaminante.

##### 2.3.1. Hipótesis Estadísticas:

- **Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):** No existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción de plomo entre los materiales lignocelulósicos evaluados y el testigo comercial.
- **Hipótesis Alternativa (H<sub>a</sub>):** Existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción de plomo entre los materiales lignocelulósicos evaluados y el testigo comercial.

## CAPÍTULO III

### ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. Eficiencia de materiales lignocelulósicos en la remoción de metales pesados

##### 3.1.1. *Materiales lignocelulósicos: propiedades y composición*

Según Prinsen (2010), los materiales lignocelulósicos están compuestos principalmente por tres componentes: celulosa, hemicelulosa y lignina, cada uno con propiedades únicas que contribuyen a su potencial como adsorbentes en la remoción de metales pesados, como el plomo. Estos materiales se encuentran en una amplia variedad de residuos orgánicos, como bagazo de caña, madera, cáscaras de frutas, lo que los hace abundantes, renovables y sostenibles (Tejada, Villabona, et al., 2015).

**3.1.1.1. Composición química.** Los materiales lignocelulósicos son predominantemente compuestos por tres biopolímeros principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, cada uno con propiedades y estructuras únicas que los hacen adecuados para diversas aplicaciones, incluida la remoción de metales pesados de soluciones acuosas (Prinsen, 2010).

**Celulosa.** La celulosa es el principal componente estructural de las paredes celulares de las plantas y representa entre el 30% y el 50% de la biomasa lignocelulósica (Canché et al., 2005). Además Franco et al. (2009), mencionan que es un polímero lineal formado por unidades de glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1,4-glicosídicos, y su estructura cristalina le confiere una alta resistencia mecánica, pero también limita su accesibilidad en su forma natural.

**Hemicelulosa.** La hemicelulosa, según Romero et al. (2014), es un polímero más complejo que la celulosa, compuesto por diferentes azúcares (como xilosa, arabinosa, galactosa, entre otros). Se encuentra en menor proporción que la celulosa (alrededor del 20-35%) y tiene una estructura más ramificada, lo que le confiere mayor solubilidad en agua (Hernández et al., 2015).

**Lignina.** Un estudio realizado por Maceda et al. (2021), indica que la lignina es un polímero complejo y heterogéneo que forma una red tridimensional que conecta las fibras de celulosa y hemicelulosa en las paredes celulares. Representa aproximadamente entre el 15% y el 30% de la biomasa lignocelulósica. Chávez y Domine (2013), aseguran que, a diferencia de la celulosa y la

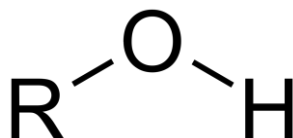
hemicelulosa, la lignina no es un carbohidrato, sino un polímero fenilpropanoide, compuesto principalmente de unidades de lignina, con enlaces éter y carbonados.

**3.1.1.2. Propiedades adsorbentes.** Los materiales lignocelulósicos, según mencionan Tejada, Herrera, et al. (2015), por su composición química, presentan diversos grupos funcionales que desempeñan un papel crucial en la adsorción de contaminantes metálicos. Estos grupos permiten la interacción con los metales pesados de varias maneras.

**Grupos hidroxilo (-OH).** En un estudio realizado sobre la adsorción de Ni (II) y Pb (II) por Tejada, Herrera, et al. (2015), se determinó que, en la celulosa y hemicelulosa, los grupos hidroxilo son altamente polares y tienen la capacidad de formar enlaces de hidrógeno con los metales pesados. Estos grupos pueden unirse a cationes metálicos, favoreciendo su captura (Porrás et al., 2012).

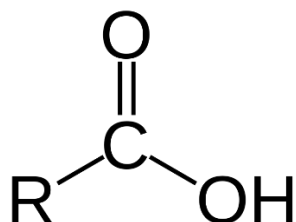
**Figura 1.**

*Grupos hidroxilo*



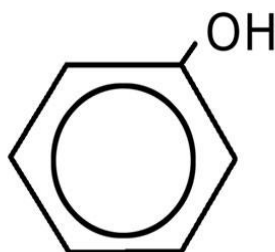
*Nota.* Representación de los grupos hidroxilo presentes en la estructura de los materiales evaluados. Adaptado de McMurry (2008) *Química Orgánica* (7<sup>a</sup> ed., pp. 33-48). Cengage Learning.

**Grupos carboxilo (-COOH).** Los grupos carboxilo, mencionados por Asimbaya et al. (2015), se encuentran principalmente en la hemicelulosa y en pequeñas cantidades en la lignina, son ácidos y pueden formar complejos con metales pesados. Tejada et al. (2014), aseguran que, su capacidad para donar electrones permite que los iones metálicos se adhieran a estos grupos, facilitando la remoción de contaminantes del agua.

**Figura 2.***Grupos carboxilo*

*Nota.* Representación de los grupos carboxilo presentes en la estructura de los materiales evaluados. Adaptado de McMurry (2008) *Química Orgánica* (7<sup>a</sup> ed., pp. 33-48). Cengage Learning.

**Grupos fenólicos (-OH en lignina).** Los grupos fenólicos en la lignina tienen una gran capacidad de quelación con metales pesados, especialmente plomo, debido a su estructura química que puede formar complejos estables (Gómez et al., 2013). Estos grupos permiten que la lignina actúe como un excelente adsorbente para metales pesados en soluciones acuosas (García et al., 2005).

**Figura 3.***Grupos fenólicos*

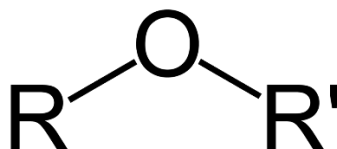
*Nota.* Representación de los grupos hidroxilo presentes en la estructura de los materiales evaluados. Adaptado de McMurry (2008) *Química Orgánica* (7<sup>a</sup> ed., pp. 33-48). Cengage Learning.

**Grupos éter (-O-).** Según Prinsen (2010), los grupos éter, presentes en la lignina y la hemicelulosa, también juegan un papel en la adsorción de metales pesados, aunque en menor medida en comparación con los grupos carboxilo y fenólicos según Barroso (2010). Sin embargo,

la interacción de los grupos éter con cationes metálicos puede mejorar la estabilidad de los complejos formados.

**Figura 4.**

*Grupos éter*



*Nota.* Representación de los grupos hidroxilo presentes en la estructura de los materiales evaluados. Adaptado de McMurry (2008) *Química Orgánica* (7<sup>a</sup> ed., pp. 33-48). Cengage Learning.

**3.1.2. Parámetros operativos**

La adsorción de metales pesados utilizando materiales lignocelulósicos está influenciada por diversos parámetros operativos (Tejada, Villabona, et al., 2015). Estos factores determinan la efectividad de la interacción entre los grupos funcionales del adsorbente y los contaminantes presentes en la solución (Tejada et al., 2014).

**3.1.2.1. pH del medio y su influencia en la adsorción.** El pH del medio es uno de los factores más relevantes en la adsorción de metales pesados. Según Parra y Pérez (2023), el comportamiento de los materiales lignocelulósicos está directamente relacionado con el grado de ionización de sus grupos funcionales y la especiación del metal. A pH bajos, los sitios activos del adsorbente están protonados, lo que genera repulsión electrostática hacia los cationes metálicos. Sin embargo, a un pH más elevado, los grupos carboxilo y fenólicos comienzan a desprotonarse, aumentando su capacidad para formar complejos estables con los metales (Mena y Pérez, 2021).

En el caso del plomo, se ha reportado que el rango de pH óptimo para la adsorción utilizando lignina o materiales modificados oscila entre 4 y 6, donde los iones metálicos están mayoritariamente en forma soluble (Fernandez et al., 2020). Fuera de este rango, los resultados

pueden variar; un pH muy alto podría llevar a la precipitación de hidróxidos metálicos, mientras que un pH extremadamente bajo reduce significativamente la eficiencia de adsorción (Sanchez et al., 2020).

**3.1.2.2. Tiempo de contacto y su relación con la capacidad de adsorción.** En el estudio realizado por Tejada, Herrera, et al. (2015), se menciona que el tiempo de contacto es crucial para determinar la eficiencia del proceso de adsorción. Durante las primeras etapas, los iones metálicos se adsorben rápidamente debido a la disponibilidad de sitios activos en la superficie del material lignocelulósico (Tejada et al., 2014). Este proceso inicial es impulsado por el fuerte gradiente de concentración entre el metal en solución y los sitios adsorbentes.

Estudios indican que la mayoría de los materiales lignocelulósicos alcanzan una adsorción significativa en los primeros 60 minutos, pero el equilibrio se establece generalmente entre 2 y 4 horas (Tejada et al., 2014). Después de este período, la velocidad de adsorción disminuye, ya que los sitios activos comienzan a saturarse y el gradiente de concentración se reduce (Parra y Pérez, 2023). Además Parra y Pérez (2023), destacan que prolongar el tiempo de contacto más allá de este punto no necesariamente mejora la eficiencia, haciendo importante optimizar este parámetro según el tipo de material y las condiciones experimentales.

**3.1.2.3. Concentración inicial del metal.** La concentración inicial del metal en solución determina el gradiente de concentración que impulsa el proceso de adsorción (Ramírez y Enríquez, 2015). Según Jiang et al. (2020), concentraciones bajas de plomo favorecen una adsorción eficiente, ya que los sitios activos del adsorbente no se saturan rápidamente. En cambio, a concentraciones más altas, el adsorbente puede alcanzar su límite de capacidad, disminuyendo la eficiencia de remoción.

Además, investigaciones muestran que la capacidad máxima de adsorción (medida en mg/g) puede variar dependiendo del material lignocelulósico utilizado y de su nivel de modificación química (Ebrahimi et al., 2022). Por ende, optimizar la relación entre la cantidad de adsorbente y la concentración inicial del contaminante es clave para maximizar la eficiencia del proceso.

### **3.1.3. Estudios previos sobre la remoción de metales pesados con materiales lignocelulósicos**

El uso de materiales lignocelulósicos como adsorbentes en la remoción de metales pesados ha sido ampliamente explorado en la literatura científica debido a su sostenibilidad, abundancia y efectividad (Parra y Pérez, 2023). Estos estudios destacan la aplicación de residuos agrícolas y forestales, así como la optimización de su capacidad adsorbente mediante tratamientos específicos (Mena y Pérez, 2021). A continuación, se analizan investigaciones relevantes que avalan su utilidad.

**3.1.3.1. Estudios sobre el uso de residuos agrícolas.** El uso de residuos agrícolas en la remoción de metales pesados ha sido objeto de numerosas investigaciones en los últimos años debido a su bajo costo, sostenibilidad y eficiencia adsorbente. Estos materiales, ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, contienen grupos funcionales que interactúan con metales pesados a través de mecanismos como intercambio iónico, formación de complejos y adsorción física (Quiñones et al., 2013).

Dentro de los residuos agrícolas más estudiados para la remoción de metales pesados destacan el bagazo de caña y la cascarilla de café, los cuales han mostrado una gran capacidad para adsorber iones de plomo ( $Pb^{2+}$ ), cadmio ( $Cd^{2+}$ ), cobre ( $Cu^{2+}$ ) y zinc ( $Zn^{2+}$ ) en soluciones acuosas. Su eficiencia puede optimizarse mediante modificaciones químicas, cambios en el pH del medio, ajuste del tiempo de contacto y variaciones en la concentración inicial del metal (Peña, 2021).

**Bagazo de caña.** El bagazo de caña de azúcar es un subproducto del procesamiento industrial de la caña, que constituye alrededor del 30% del peso total de la caña procesada (Resano et al., 2022). Su composición química incluye celulosa (50%), hemicelulosa (25%) y lignina (20%), además de una estructura porosa con una elevada proporción de grupos hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH) y fenólicos (-OH) que facilitan la adsorción de metales pesados (Vera et al., 2016).

Diversos estudios han demostrado la eficacia del bagazo de caña en la remoción de plomo en soluciones acuosas. Por ejemplo, Vera et al. (2016), realizaron un estudio en el que se comparó

la eficiencia del bagazo de caña natural y tratado con NaOH para la adsorción de  $Pb^{2+}$  y  $Cd^{2+}$ , encontrando que el bagazo tratado presentó una eficiencia de remoción del 84% para plomo y del 79% para cadmio, debido a la mayor disponibilidad de sitios activos en su superficie.

Otro estudio realizado por Cascaret et al. (2020), evaluó la remoción de cobre ( $Cu^{2+}$ ) usando bagazo de caña modificado con ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). Los resultados indicaron que el tratamiento químico mejoró la capacidad de adsorción en más de un 30% en comparación con el bagazo sin tratar. Además, se identificó que el pH óptimo para la adsorción de  $Cu^{2+}$  se encontraba entre 4.5 y 6.0, evitando la precipitación del metal en forma de hidróxidos.

Además, investigaciones de Raj et al. (2022), demostraron que el bagazo de caña puede ser reutilizado en múltiples ciclos de adsorción sin una pérdida significativa de eficiencia. Se encontró que, tras cinco ciclos de regeneración química utilizando soluciones diluidas de HCl, la capacidad de remoción de  $Pb^{2+}$  se mantenía por encima del 70%, lo que refuerza su viabilidad como material sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas. Los factores que afectan la adsorción en bagazo de caña son:

- **pH del medio:** Estudios indican que el pH óptimo para la adsorción de  $Pb^{2+}$  con bagazo de caña se encuentra entre 4 y 6, mientras que para otros metales como el  $Zn^{2+}$  y  $Cd^{2+}$ , valores de 5 a 7 mejoran la eficiencia (Ezeonuegbu et al., 2021).
- **Tiempo de contacto:** La adsorción es rápida en los primeros 30 minutos, alcanzando el equilibrio en aproximadamente 120 minutos (Amangandi, 2017)
- **Concentración inicial del metal:** A concentraciones bajas de  $Pb^{2+}$  (<1 mg/L), la remoción puede superar el 90%, pero a concentraciones mayores (>5 mg/L), el bagazo tiende a saturarse y su eficiencia disminuye. (Torres, 2024)

**Cascarilla de café.** La cascarilla de café, también conocida como pergamino, es un subproducto del procesamiento del grano de café, representando aproximadamente el 12% del peso total del café cosechado (Manals y Salas, 2018). Su estructura fibrosa, compuesta por celulosa (24.5%), hemicelulosa (29.7%) y lignina (23.7%), le confiere propiedades adsorbentes favorables para la remoción de metales pesados.

Quintana et al. (2008), evaluaron el uso de carbón activado derivado de cascarilla de café en la adsorción de níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ ), encontrando una eficiencia superior al 85% en condiciones controladas de pH y temperatura. Así mismo, Kang et al. (2022), investigaron la remoción de  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Hg}^{2+}$  mediante un sistema de filtración con cascarilla de café tratada con  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , alcanzando eficiencias de hasta 87% para plomo y 80% para mercurio.

Un estudio adicional de Carvajal y Marulanda (2020), demostró que la activación química de la cascarilla con NaOH mejora su capacidad de adsorción en un 40%, debido a un aumento en la porosidad y en la cantidad de sitios activos disponibles para la interacción con metales pesados. Los factores que intervienen en la adsorción de la cascarilla de café son:

- **Superficie específica:** Tras la activación química, la cascarilla de café puede alcanzar una superficie específica de 800-900  $\text{m}^2/\text{g}$ , comparable a la de algunos carbones activados comerciales (Manals y Salas, 2018).
- **pH óptimo:** Se ha determinado que el rango de pH 5-6 es el más adecuado para la remoción de  $\text{Pb}^{2+}$ , mientras que para  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Ni}^{2+}$  valores más ácidos (pH 4-5) mejoran la adsorción (Kang et al., 2022).
- **Tiempo de contacto:** Estudios muestran que la adsorción alcanza un equilibrio tras 90-150 minutos, dependiendo de la modificación química aplicada (Quintana et al., 2008).

**Carbón activado.** El carbón activado es un material carbonáceo altamente poroso, con una superficie interna que puede alcanzar hasta 1500  $\text{m}^2/\text{g}$ , lo que le confiere una notable capacidad de adsorción (Hernández et al., 2017). Aunque no es un material lignocelulósico, se emplea frecuentemente como referencia en estudios de adsorción debido a su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes (Reyes et al., 2016). Su estructura porosa y la presencia de grupos funcionales en su superficie facilitan la adsorción de metales pesados como plomo, mercurio, cadmio y cromo. Por ejemplo, se ha demostrado que el carbón activado puede eliminar eficazmente estos metales mediante múltiples mecanismos, incluyendo la adsorción física y química. Además, su eficacia puede incrementarse mediante tratamientos que introducen grupos funcionales oxigenados en su superficie, mejorando la adsorción de iones metálicos (Torres, 2024). Estas

características hacen del carbón activado un estándar en investigaciones sobre la remoción de metales pesados en soluciones acuosas.

**3.1.3.2. Comparación de la eficiencia de materiales lignocelulósicos con otras tecnologías de adsorción.** En comparación con tecnologías convencionales, como las resinas de intercambio iónico o el carbón activado, los materiales lignocelulósicos ofrecen ventajas significativas en términos de costos y sostenibilidad (Bianco y De Sousa, 2013). Valdés et al. (2022), asegura que, aunque la capacidad de adsorción de lignocelulósicos puede ser menor en algunos casos, su disponibilidad y bajo impacto ambiental los convierten en una opción viable para aplicaciones a gran escala.

Por ejemplo, estudios han mostrado que el bagazo de caña tratado químicamente alcanza eficiencias comparables a las del carbón activado en la remoción de metales como el cobre, con eficiencias destacables (Duany et al., 2022). Estas comparaciones subrayan el potencial de los lignocelulósicos como soluciones complementarias o alternativas a tecnologías más costosas.

Los materiales lignocelulósicos, como el bagazo de caña y la cascarilla de café, han demostrado capacidades de adsorción competitivas para metales pesados, con valores reportados en el rango de aproximadamente 28.4 a 112 mg/g (Iwuozor et al., 2022; Pastrana y Mora, 2017). En comparación, tecnologías convencionales como el carbón activado presentan capacidades en torno a 95–150 mg/g (Bashir et al., 2016), mientras que las resinas de intercambio iónico pueden alcanzar entre 120 y 200 mg/g (Miros et al., 2022). La principal ventaja de los adsorbentes lignocelulósicos radica en su muy bajo costo –generalmente entre USD 0.5 y 2.0 por kilogramo– y su sostenibilidad ambiental, puesto que se obtienen a partir de subproductos agrícolas que no requieren procesos de síntesis complejos (Jadoun et al., 2023).

## **3.2. Impacto ambiental y salud pública de la contaminación por metales pesados**

### **3.2.1. *Efectos en ecosistemas acuáticos***

La contaminación por metales pesados, como el plomo, tiene efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos (Giusto, 2015). A continuación, se presentan los principales impactos documentados en estudios recientes.

- **Toxicidad para organismos acuáticos.** Los metales pesados son altamente tóxicos para diversas formas de vida acuática (Pabón et al., 2020). Un estudio sobre anfípodos de agua dulce, específicamente la especie *Hyaella azteca*, demostró que la exposición a metales pesados como el plomo afecta negativamente su crecimiento y reproducción, lo que puede llevar a una disminución de las poblaciones y alterar la estructura de la comunidad acuática (Giusto, 2015).
- **Bioacumulación y biomagnificación.** La bioacumulación de metales pesados en organismos acuáticos es un fenómeno bien documentado. Ortega et al. (2020), indican que, los metales se acumulan en los tejidos de los organismos a lo largo del tiempo, lo que puede resultar en biomagnificación a medida que se asciende en la cadena trófica. Según Sánchez et al. (2021), esto significa que los depredadores superiores, como aves y mamíferos acuáticos, pueden experimentar niveles tóxicos de plomo debido a su consumo de presas contaminadas. Esto indica que esta acumulación puede tener efectos adversos significativos en la salud de las especies depredadoras y en el equilibrio del ecosistema (Argota et al., 2012).
- **Alteraciones en la composición del hábitat.** La contaminación por metales pesados también altera las condiciones químicas del hábitat acuático. Según Giusto (2015), la presencia de estos contaminantes puede reducir el oxígeno disuelto y afectar la calidad del agua. Lo cual es crítico para la supervivencia de organismos acuáticos, mostrando así que los metales pesados pueden afectar la diversidad de especies y la salud general del ecosistema. (Incahuanaco et al., 2021).
- **Efectos en ciclos biogeoquímicos.** Los metales pesados pueden interferir con ciclos biogeoquímicos esenciales dentro de los ecosistemas acuáticos (Doria y Deluque, 2015). Según Sánchez et al. (2021), pueden afectar el ciclo del nitrógeno y del fósforo, alterando la productividad primaria y afectando toda la red alimentaria. Esto puede resultar en problemas como eutrofización, donde el exceso de nutrientes provoca un crecimiento descontrolado de algas, afectando aún más a los organismos acuáticos (Sepúlveda, 2015). Estos efectos resaltan la necesidad urgente de abordar la contaminación por metales pesados para proteger no solo a los organismos acuáticos, sino también a los ecosistemas en su conjunto.

### 3.2.2. *Riesgos para la salud humana*

La contaminación por metales pesados, como el plomo, representa un riesgo significativo para la salud humana debido a su toxicidad y capacidad de bioacumulación (Bravo y Quispe, 2019). A continuación, se detallan los principales riesgos asociados a la exposición a metales pesados, con un enfoque en el plomo.

- **Efectos neurológicos.** Según Robles (2024), el plomo es conocido por su capacidad de causar daño neurológico, especialmente en niños. La exposición al plomo puede resultar en una disminución del coeficiente intelectual, problemas de comportamiento y dificultades de aprendizaje. Estudios han demostrado que incluso niveles bajos de plomo en sangre pueden afectar el desarrollo cognitivo y neurológico en niños (Londoño et al., 2016).
- **Efectos cardiovasculares.** La exposición crónica al plomo se ha asociado con un aumento en la presión arterial y un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares (Saborío y Hidalgo, 2015). Investigaciones según Robles (2024), indican que el plomo puede contribuir al desarrollo de hipertensión y enfermedades cardíacas debido a su efecto tóxico en el sistema cardiovascular.
- **Efectos en el sistema reproductivo y desarrollo infantil.** La exposición al plomo puede tener efectos adversos en el sistema reproductivo tanto en hombres como en mujeres. En mujeres, según la Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF] (2020), se ha observado que el plomo puede causar problemas de fertilidad y complicaciones durante el embarazo, como abortos espontáneos y partos prematuros; al igual que en el desarrollo adecuado de los niños, en donde se encuentra una relación de dicha exposición con problemas de comportamiento y de salud mental. En hombres, la exposición al plomo puede reducir la calidad del esperma y afectar la fertilidad (Tellerias y Paris, 2008).

### 3.2.3. *Regulaciones ambientales*

Las regulaciones ambientales en Ecuador son esenciales para controlar la contaminación por metales pesados y proteger tanto el medio ambiente como la salud pública. A continuación, se presentan algunos aspectos clave de las normativas vigentes en Ecuador relacionadas con la contaminación por plomo:

**3.2.3.1. Acuerdos ministeriales.** En Ecuador, la normativa ambiental establece límites máximos permisibles para la concentración de metales pesados en aguas residuales industriales y domésticas. El Acuerdo Ministerial No. 097-A del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica establece los límites permisibles de contaminantes en los cuerpos de agua, incluyendo el plomo con un valor máximo permisible de 0,0001 mg/L según especifica la Tabla 2 de dicho Acuerdo Ministerial denominada: Criterios de Calidad Admisibles para la Preservación de la Vida Acuática y Silvestre en Aguas Dulces, Marinas y de Estuarios. (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2015a). Este acuerdo es fundamental para garantizar que las industrias cumplan con los estándares ambientales y minimicen su impacto en los cuerpos de agua.

El Acuerdo Ministerial No. 061 del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, emitido en 2024, refuerza las regulaciones sobre la gestión de residuos peligrosos, incluyendo aquellos que contienen metales pesados como el plomo (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2015b). Este acuerdo establece procedimientos para el manejo adecuado de estos residuos, desde su generación hasta su disposición final, con el objetivo de prevenir la contaminación de los recursos hídricos.

**3.2.3.2. Sanciones y cumplimiento.** El cumplimiento de las regulaciones ambientales es crucial para su efectividad. Las sanciones por incumplimiento pueden incluir multas, cierre de instalaciones y otras medidas legales. Según el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE] (2017), el Código Orgánico del Ambiente de Ecuador establece las sanciones aplicables a las industrias que no cumplen con las normativas ambientales. Estas sanciones están diseñadas para disuadir a las

industrias de violar las normativas y asegurar que se tomen medidas correctivas adecuadas.

### 3.3. Estudios previos sobre el río Tahuando.

#### 3.3.1. *Sitios de muestreo*

En un estudio previo realizado por García (2020), se llevó a cabo la caracterización de contaminantes en el Río Tahuando en el tramo Olmedo-Ibarra, donde se mencionan 7 puntos de muestreo.

**Tabla 1.**

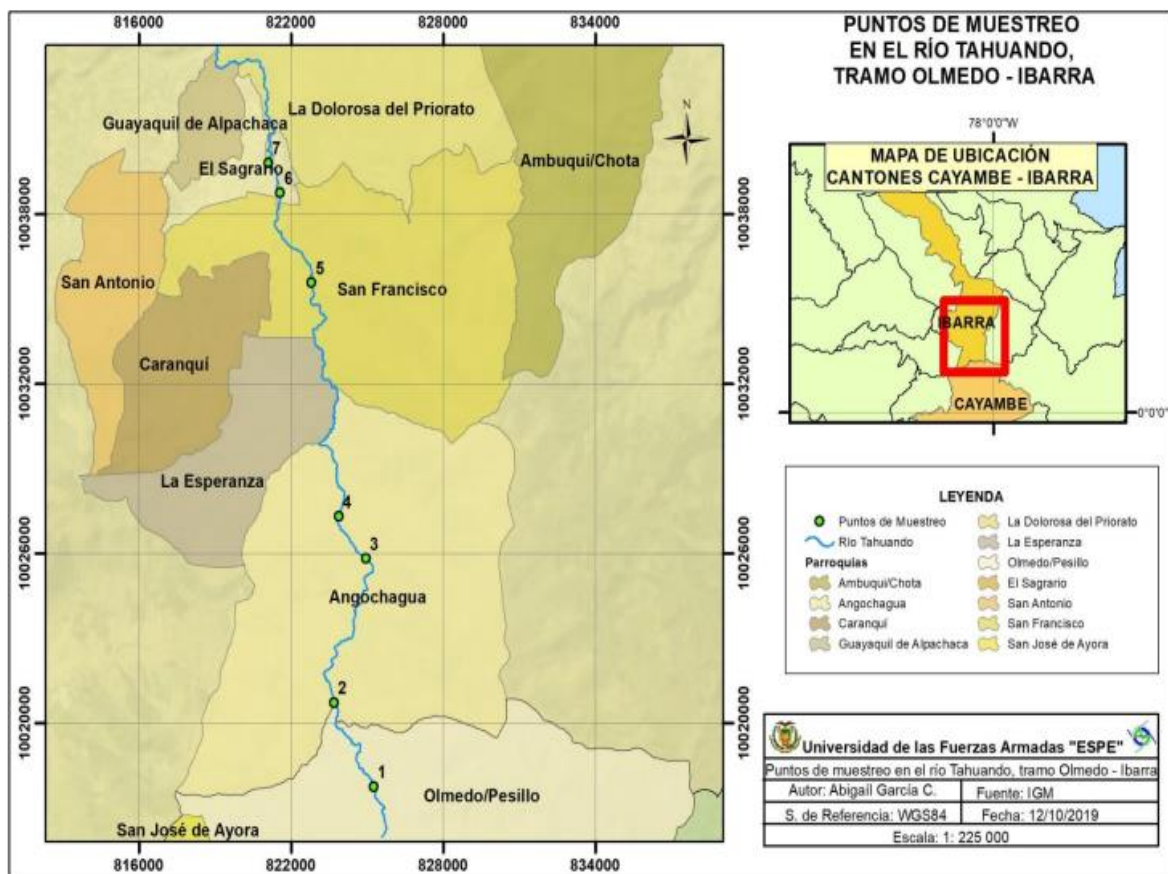
*Puntos de muestreo de estudio previo*

<b>Punto</b>	<b>Lugar</b>
1	Olmedo/Pesillo
2	Inicio Angochagua
3	Guaraczapas
4	Angochagua
5	Romerillo Alto
6	Antes PTAR Ibarra
7	Después PTAR Ibarra

*Nota.* Adaptado de “Evaluación de la concentración de contaminantes emergentes en el río Tahuando, en Ibarra – Ecuador”, por García, (2020) p. 24.

**Figura 5.**

*Puntos de muestro río Tahuando según estudio previo*



*Nota. Adaptado de "Evaluación de la concentración de contaminantes emergentes en el río Tahuando, en Ibarra – Ecuador", por García, (2020), p. 32.*

### 3.3.2. *Datos obtenidos de concentraciones de plomo*

Según García (2020), los datos obtenidos de plomo, expresados por mg/L en los puntos de muestreo seleccionados, fueron los siguientes:

**Tabla 2.**

*Concentraciones de plomo en el río Tahuando según estudio previo*

<b>Punto</b>	<b>Pb (ppm)</b>
1	0.045
2	0.054
3	0.042
4	0.033
5	0.037
6	0.020
7	0.045
Media	0.039
*C. Calidad	0.001

*Nota.* Adaptado de “*Evaluación de la concentración de contaminantes emergentes en el río Tahuando, en Ibarra – Ecuador*”, por García, (2020), p. 42.

\* Criterios de Calidad según *Acuerdo Ministerial 097-A*, MAATE, 2015.

## CAPÍTULO IV

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 4.1. Geolocalización

##### 4.1.1. *Provincia*

La provincia de Imbabura, ubicada en la región norte de Ecuador, se extiende sobre una superficie de 4 599 km<sup>2</sup> y cuenta con una población de 398 244 habitantes según datos del (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2010). Según Imbaquingo et al. (2022), la provincia se caracteriza por una diversidad climática que incluye zonas cálidas y secas, como la Hoya del Chota, y áreas subtropicales andinas, como Intag y Lita. Barba et al. (2022), mencionan que, la economía provincial se sustenta en actividades como la agricultura, la artesanía y el turismo, siendo famosa por sus textiles y mercados artesanales. Además, Imbabura ha sido designada como Geoparque Mundial por la UNESCO, lo que resalta su importancia geológica y cultural (Gobierno Autónomo Descentralizado [GAD] Provincial de Imbabura, 2024).

##### 4.1.2. *Cantón*

El cantón Ibarra, ubicado en la provincia de Imbabura, Ecuador, se extiende sobre una superficie de 1 111.27 km<sup>2</sup> y se sitúa a una altitud de 2 204 metros sobre el nivel del mar (Asociación de Municipalidades Ecuatorianas, 2024). El cantón está conformado por parroquias urbanas como San Francisco, El Sagrario, Alpachaca, Caranqui y Priorato, y parroquias rurales como Lita, La Carolina, Salinas, Ambuquí, La Esperanza, Angochagua y San Antonio de Ibarra (Alcaldía de Ibarra, 2022). El clima es templado seco mediterráneo, con una temperatura promedio de 17 °C (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2024). La economía local se basa en el comercio, turismo, servicios educativos, agroindustria y manufacturas.

#### 4.1.3. *Parroquias*

La toma de muestras abarca las parroquias de Ibarra: Angochahua, La Esperanza, San Francisco, El Sagrario, Guayaquil de Apachaca, La Dolorosa del Priorato; y limitando con la parroquia Imbaya perteneciente al cantón San Antonio.

#### 4.1.4. *Sector*

Los puntos considerados según Villegas (2023), dentro del análisis de estudio del proyecto de investigación “Ciudad y Paisaje” son los siguientes:

**Tabla 3.**

*Puntos de muestreo río Tahuando*

<b>Punto</b>	<b>Lugar</b>
1	La Rinconada
2	Punhuaico
3	Tres Cascadas
4	Cantera San José
5	Romerillo Alto
6	La Victoria
7	Tahuando Punto Final

*Nota.* Los puntos de muestreo fueron establecidos en el Estudio Geomorfológico y de Calidad Ambiental del río Tahuando del proyecto de investigación “Ciudad y Paisaje” (PUCESI. 2022).

#### 4.1.5. *Coordenadas geográficas*

**Tabla 4.**

*Coordenadas geográficas de puntos de muestro río Tahuando*

<b>Punto</b>	<b>*X (UTM)</b>	<b>*Y (UTM)</b>
1	823995	10027606
2	823228	10029817
3	823233	10032216
4	822742	10035752
5	821358	10037763
6	821548	10038798
7	819068	10044388

*Nota.* Los puntos de muestreo fueron establecidos en el Estudio Geomorfológico y de Calidad Ambiental del río Tahuando del proyecto de investigación “Ciudad y Paisaje” (PUCESI, 2022).

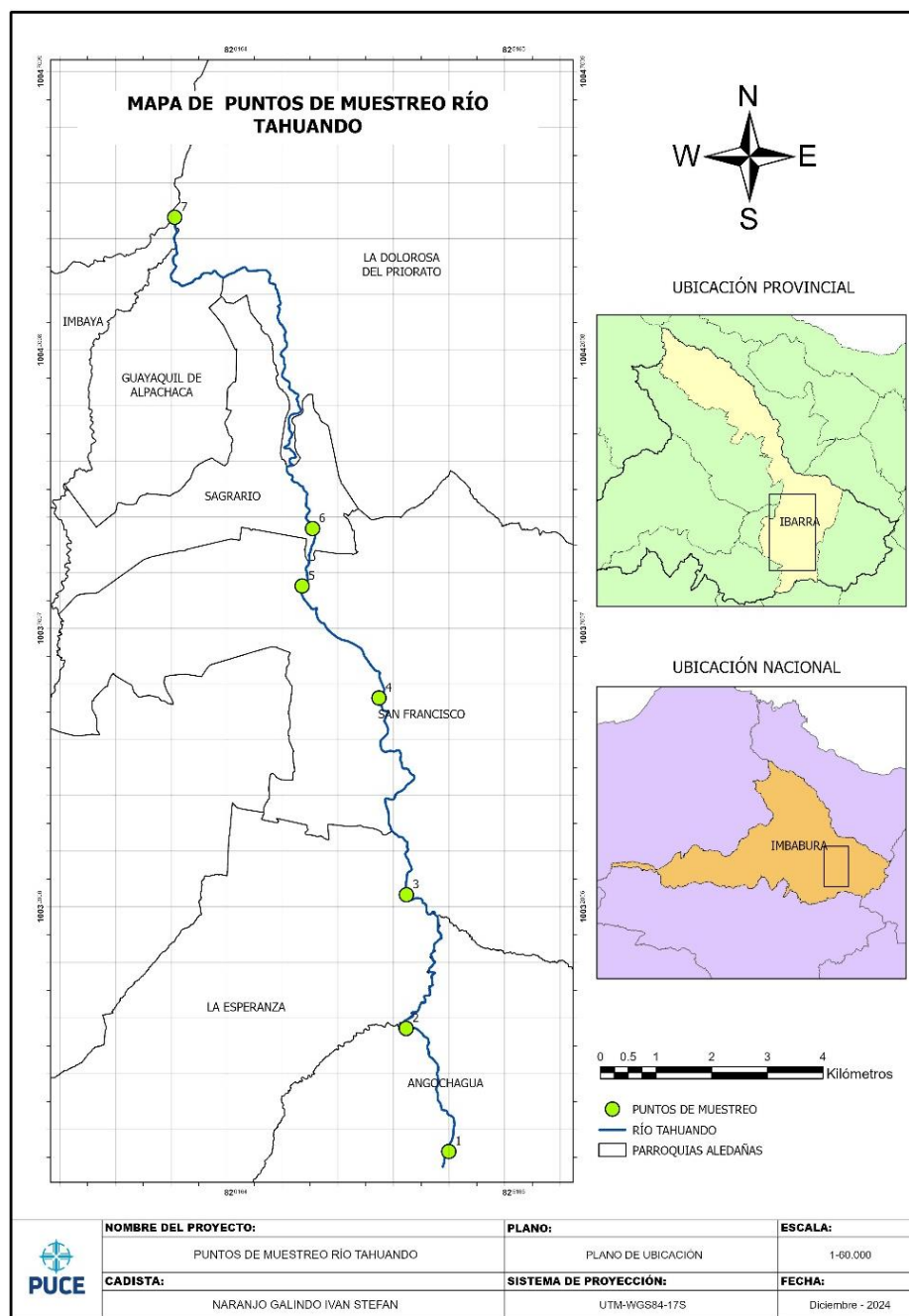
\*Las coordenadas geográficas X, Y están representadas en el sistema WGS84, proyección UTM, Zona 17S.

#### 4.1.6. *Gráfica de localización*

La representación cartográfica de la zona de estudio fue realizada utilizando el software ArcGIS Pro versión 3.2 (Esri, 2023). Este mapa muestra la geolocalización de las áreas de muestreo en el río Tahuando, indicando los puntos específicos donde se realizaron las mediciones de plomo. El uso de este software permitió integrar y analizar datos espaciales con precisión, facilitando la visualización y el análisis geográfico necesarios para el estudio.

**Figura 6.**

*Puntos de muestreo río Tahuando*



*Nota.* Mapa de puntos de muestreo establecidos en el Estudio Geomorfológico y de Calidad Ambiental del río Tahuando del proyecto de investigación “Ciudad y Paisaje” (PUCESI, 2022). Generado con ArcGIS Pro [Software] versión 3.2 (Esri, 2023).

## 4.2. Variables

Rodríguez et al. (2021), afirman que en un diseño experimental es fundamental identificar las variables involucradas, ya que estas permiten analizar la influencia de los tratamientos en el resultado final y controlar las condiciones para garantizar la validez de los datos obtenidos.

En el presente estudio, se establecen y describen las variables que guían el desarrollo del experimento para evaluar la eficiencia de remoción de plomo mediante tres tratamientos distintos. Estas variables se dividen en independientes, dependiente y controladas, las cuales son fundamentales para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados (Morales, 2012).

### 4.2.1. *Variable independiente*

La variable independiente se define como aquella que es manipulada deliberadamente para observar su efecto en los resultados del experimento (Cauas, 2015). La variable independiente de este estudio es el tipo de tratamiento empleado para la remoción de plomo en muestras de agua destilada. Los tratamientos seleccionados fueron diseñados en función de su potencial adsorbente, basado en sus propiedades físico-químicas y disponibilidad.

- **Bagazo de caña:** Material lignocelulósico rico en celulosa y hemicelulosa, conocido por su capacidad de adsorción debido a la presencia de grupos funcionales como hidroxilos y carboxilos en su estructura (Prado et al., 2012). Estudios previos han demostrado que materiales lignocelulósicos pueden actuar como adsorbentes eficaces para metales pesados (Primera et al., 2011).
- **Cascarilla de café:** Manals y Salas (2018), indican que la cascarilla de café es un residuo agroindustrial compuesto también de materiales lignocelulósicos y que contiene compuestos como lignina y celulosa. Además (Quintana et al., 2008), en su estudio analizan su estructura porosa lo cual lo hace un potencial adsorbente natural.
- **Carbón activado (testigo):** Este material según Navarro y Vargas (2010), se emplea como referencia debido a su alta capacidad de adsorción, ampliamente reconocida en el tratamiento de aguas residuales. Su inclusión permite comparar la eficiencia de los materiales alternativos con un adsorbente convencional (Leyva et al., 2004).

#### 4.2.2. *VARIABLES DEPENDIENTES*

Según Villasís y Miranda (2016), la variable dependiente es aquella que se mide en el experimento y depende directamente de las modificaciones en la variable independiente. La variable dependiente en esta investigación es la eficiencia de remoción de plomo (%), que se calcula a partir de la concentración inicial y final del metal pesado en las muestras tratadas. Esta eficiencia es un indicador directo de la capacidad adsorbente de cada tratamiento. El valor de esta variable permite identificar el tratamiento con mejor desempeño y establecer comparaciones cuantitativas entre ellos.

#### 4.2.3. *VARIABLES CONTROLADAS*

Las variables controladas son aquellas que se mantienen constantes en todas las unidades experimentales para minimizar su influencia en los resultados y garantizar que las diferencias observadas sean atribuibles únicamente a la variable independiente (Pérez, 2007). Para garantizar la comparabilidad de los resultados y minimizar las fuentes de error, se controlaron las siguientes variables experimentales:

- **Volumen de la muestra.** Se utilizaron 100 ml de agua destilada por unidad experimental, asegurando que todas las muestras tuvieran la misma cantidad de agua y concentración inicial de plomo (Rice et al., 2017).
- **Concentración inicial de plomo.** Todas las muestras fueron preparadas con una concentración inicial de 0.06 ppm de plomo, simulando las condiciones máximas encontradas en la caracterización del Río Tahuando.
- **Método de medición.** La cuantificación de plomo en las muestras se realizó mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) con módulo de llama, utilizando una mezcla de aire-acetileno para la atomización, técnica que ofrece alta precisión y sensibilidad para este tipo de análisis (Welz y Sperling, 1998).
- **Tiempo de contacto.** Aunque no se estableció un tiempo fijo para cada tratamiento, este se medirá durante la ejecución del experimento. Si el tiempo de filtrado no afecta la

comparabilidad, se considerará como una constante para todas las unidades experimentales (Gupta y Ali, 2012).

### **4.3.Diseño experimental**

El diseño experimental establece la estructura y los procedimientos necesarios para realizar el experimento, garantizando la confiabilidad y validez de los resultados (Cárdenas y Cortés, 2000). El diseño experimental seleccionado para este estudio es un Diseño Completamente al Azar (DCA), el cual según Hadi (2019), se caracteriza por asignar los tratamientos de manera aleatoria a las unidades experimentales, asegurando que todas las condiciones externas y fuentes de error se distribuyan de forma homogénea. Este diseño es particularmente adecuado para investigaciones donde las unidades experimentales son homogéneas entre sí según lo afirma (Recio y Aliaga, 2016). Como en este caso, donde las muestras de agua destilada con 0.06 ppm de plomo se mantienen bajo las mismas condiciones controladas. El DCA según Cea (2014), permite evaluar el efecto del factor principal, que en este estudio corresponde al tipo de material adsorbente (bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado), sobre la variable dependiente, la eficiencia de remoción de plomo. Este enfoque estadístico es simple y efectivo, garantizando que las diferencias observadas entre tratamientos sean atribuibles únicamente a los tratamientos aplicados, eliminando la influencia de otros factores (Collazo et al., 2010).

#### **4.3.1. *Análisis funcional***

El análisis funcional en un diseño experimental tiene como objetivo establecer la relación entre las variables estudiadas y el sistema bajo análisis (Galarza y Vera, 2012). En este caso, el análisis funcional permite identificar cómo los diferentes tratamientos adsorbentes (bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado) influyen en la remoción de plomo de soluciones acuosas simuladas. Esta etapa es esencial, ya que asegura que el experimento esté diseñado para responder claramente a la pregunta de investigación y para verificar la hipótesis planteada (Montaño y Uyaguari, 2014).

En síntesis, análisis funcional considera los mecanismos físico-químicos que intervienen en el proceso de adsorción, como las interacciones entre los grupos funcionales del material adsorbente y los iones de plomo en solución en este caso. Asimismo, detalla cómo cada

componente del sistema experimental (tratamientos, condiciones iniciales, unidades experimentales, etc.) contribuye al propósito general del estudio, que es evaluar la eficiencia de remoción de plomo. En este estudio, el análisis funcional se centra en los siguientes aspectos:

- **Propósito del análisis.** Determinar la capacidad de remoción de plomo de tres materiales adsorbentes mediante un proceso de filtración por gravedad y cuantificar la eficiencia obtenida en cada tratamiento.
- **Relación entre variables.** La eficiencia de remoción de plomo (variable dependiente) está influenciada por el material adsorbente utilizado (variable independiente) (Bhardwaj et al., 2025). A su vez, la uniformidad en las condiciones experimentales (volumen de agua, concentración inicial de plomo, método de medición, etc.) asegura que las diferencias observadas se deban únicamente al tratamiento aplicado (Largitte et al., 2016).
- **Mecanismo de acción.** La remoción de plomo se basa en la adsorción, un proceso en el que los iones de plomo se adhieren a la superficie de los materiales adsorbentes mediante interacciones electrostáticas, formación de enlaces químicos débiles o atrapamiento físico en poros del adsorbente (Barabi et al., 2022).

#### **4.3.2. Unidades experimentales**

En un diseño experimental, las unidades experimentales (UE) representan los elementos básicos sobre los cuales se aplican los tratamientos y se realizan las mediciones (Ortega et al., 2021). Según (Vargas y Navarro, 2017) cada unidad experimental debe ser homogénea y estar bajo las mismas condiciones experimentales para garantizar que las diferencias observadas en los resultados sean atribuibles únicamente a los tratamientos evaluados. La correcta definición de las UE es fundamental para la validez del experimento, ya que asegura que las comparaciones entre tratamientos sean precisas y reproducibles (Condo y Pazmiño, 2015).

En este caso, las UE son los biofiltros preparados con cada tratamiento, que están diseñados para evaluar la eficiencia de remoción de plomo mediante dicho sistema de filtración con diferentes materiales adsorbentes, manteniendo constantes las condiciones iniciales de las muestras (volumen, concentración de plomo y método de medición).

**Ecuación 1.**

*Cálculo de unidades experimentales*

$$3 \text{ Tratamientos} \times 3 \text{ Repeticiones} = 9 \text{ Unidades Experimentales}$$

*Nota.* En este estudio, se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado con 3 tratamientos y 3 repeticiones por tratamiento, lo que resultó en un total de 9 unidades experimentales.

El uso de tres repeticiones por tratamiento según Gutiérrez y De La Vara (2008) permite obtener datos estadísticamente representativos y reducir el impacto de variaciones aleatorias en los resultados. Esto asegura que las conclusiones sobre la eficiencia de remoción de plomo sean confiables y válidas.

**4.3.3. Factores de estudio**

Los factores de estudio en un diseño experimental son las variables independientes que se manipulan para observar sus efectos sobre la variable dependiente (Melo et al., 2020). Estos factores pueden tener uno o varios niveles, que corresponden a las diferentes condiciones o tratamientos evaluados en el experimento. La correcta identificación de los factores de estudio y sus niveles permite estructurar el análisis y garantizar que las diferencias observadas en los resultados sean atribuibles a las manipulaciones realizadas (Vera, 2018).

En el caso de esta investigación, el factor principal de interés es el material adsorbente, ya que es el elemento que varía entre tratamientos y cuyo efecto sobre la eficiencia de remoción de plomo será analizado. El experimento contempla un único factor de estudio:

**4.3.3.1. Tipo de material adsorbente.** Este factor corresponde al material utilizado en los filtros de jeringa, que actúa como adsorbente para remover plomo de las muestras acuosas. En dicho caso, corresponden al bagazo de caña y cascarilla de café como materiales lignocelulósicos, y el carbón activado como testigo comercial. Su manipulación permite evaluar su influencia sobre la variable dependiente, la eficiencia de remoción de plomo.

#### **4.3.4. Tratamientos**

En un diseño experimental, los tratamientos son las combinaciones específicas de los niveles de los factores de estudio que se aplican a las unidades experimentales (Melo et al., 2020). Cada tratamiento representa una condición experimental distinta, cuyo efecto se mide en la variable dependiente. En este caso, los tratamientos corresponden a los diferentes materiales adsorbentes que se utilizarán para evaluar su capacidad de remoción de plomo.

Los tratamientos son fundamentales para probar la hipótesis planteada, ya que permiten comparar y determinar cuál de los materiales adsorbentes es más eficiente (Montgomery, 2014). Además, al incluir un tratamiento testigo (en este caso, el carbón activado), se establece una referencia que ayuda a evaluar la efectividad relativa de los materiales alternativos propuestos. Los tratamientos están definidos por los materiales adsorbentes utilizados en los filtros de jeringa. Se tienen los siguientes tratamientos:

- **T1: Bagazo de caña.** Este material lignocelulósico, abundante y de fácil adquisición, contiene grupos funcionales como hidroxilos y carboxilos que pueden interactuar con los iones de plomo mediante mecanismos de adsorción (Resano et al., 2022). Es una alternativa sostenible para la remoción de contaminantes en el agua.
- **T2: Cascarilla de café.** Residuo agrícola con propiedades adsorbentes debido a su contenido lignocelulósico y su superficie rica en grupos funcionales (Manals et al., 2018). Es una opción ecológica y económica para el tratamiento de aguas contaminadas.
- **T3: Carbón activado (control).** Adsorbente comercial ampliamente utilizado por su elevada área superficial y estructura microporosa, que lo hace altamente eficiente en la remoción de metales pesados (Reyes et al., 2016). Actúa como referencia para comparar la eficiencia de los materiales alternativos.

Cada tratamiento será aplicado a tres repeticiones, lo que garantiza la obtención de datos confiables y permite realizar un análisis estadístico robusto de los resultados (Condo y Pazmiño, 2015). Los resultados obtenidos para cada tratamiento serán comparados mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción de plomo entre los materiales adsorbentes.

#### 4.3.5. *Esquema ANOVA*

El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos (Cayuela, 2014). En un diseño completamente al azar, el ANOVA permite evaluar si las variaciones en los resultados considerada en este caso la variable dependiente, son atribuibles a los tratamientos aplicados o factor de estudio, o al error experimental (Mercado, 2023).

En este estudio, el ANOVA será utilizado para analizar la eficiencia de remoción de plomo de los tres materiales adsorbentes (bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado). Este análisis estadístico es fundamental para validar las hipótesis del experimento, ya que permite determinar si las diferencias observadas en la eficiencia de remoción son significativas desde un punto de vista estadístico (Siegel y Wagner, 2022).

#### **Tabla 5.**

*Análisis de varianza ANOVA.*

Fuente de Variación	Grados de Libertad
Tratamientos	2
Residuos	6
Total	8

*Nota.* Se presenta la descomposición de los grados de libertad en el análisis de varianza. Tabla generada con R [Software] versión 4.4.2 (R Core Team, 2024).

#### **4.4. Manejo específico del experimento**

El manejo específico del experimento detalla los procedimientos, condiciones y controles aplicados durante la ejecución del diseño experimental. Este apartado garantiza la correcta implementación del estudio, asegurando la homogeneidad en el tratamiento de las unidades experimentales, el cumplimiento de los protocolos establecidos y la minimización de posibles fuentes de error. El manejo adecuado del experimento es esencial para obtener resultados confiables y reproducibles.

##### **4.4.1. Caracterización de plomo en el río Tahuando**

La caracterización de metales en cuerpos de agua es un paso crucial para determinar los niveles de contaminación y planificar estrategias de remediación (Castro, 2022). En este estudio, se realizó una caracterización del plomo en el Río Tahuando, tomando en cuenta su distribución espacial en varios puntos del río. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se empleó el Método 3005A de digestión ácida, que permite la preparación de muestras para el análisis de metales mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992). Este método es adecuado para medir metales totales recuperables o disueltos en agua, siguiendo protocolos establecidos para la preservación y manejo de muestras.

**4.4.1.1. Toma de muestras en el río Tahuando.** Se seleccionaron siete puntos de muestreo a lo largo del río, representativos de diferentes zonas de actividad humana y posibles fuentes de contaminación. Estos puntos incluyeron áreas cercanas a descargas residuales y zonas de menor impacto.

Las muestras se recolectaron en botellas previamente lavadas y pretratadas con detergentes, ácidos y agua destilada, siguiendo las recomendaciones del Método 3005A (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

**4.4.1.2.Preparación de las muestras.** Cada muestra fue acidificada en el momento de la recolección con 5 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado por cada litro de muestra, según lo establecido en el método (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992). Esto asegura la preservación de las muestras y la estabilización de los metales disueltos.

Para el análisis de metales totales recuperables, no se realizó filtración previa, siguiendo lo indicado en la sección 6.3.1 del método (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

**4.4.1.3.Digestión ácida (Método 3005A).** Un alícuota de 100 mL de muestra fue transferida a un vaso de precipitados y se le añadieron 2 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado y 5 mL de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) concentrado (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

La mezcla se calentó en una placa a una temperatura de 90-95 °C, sin permitir que hierva, hasta reducir su volumen a 15-20 mL (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992). Este paso facilita la liberación de metales ligados a partículas o compuestos orgánicos.

Una vez enfriada, la solución fue diluida nuevamente a 100 mL con agua destilada y filtrada para eliminar partículas insolubles que podrían interferir en el análisis (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

**4.4.1.4.Análisis mediante AAS.** Las muestras preparadas fueron analizadas utilizando Espectrometría de Absorción Atómica, con atomización por llama aire-acetileno (marca GBC), técnica validada para la cuantificación precisa de metales traza como el plomo en matrices acuosas complejas (Albalawi et al., 2021). Para minimizar interferencias derivadas de la matriz ambiental, se seleccionó la longitud de onda de 283.3 nm, menos sensible que la línea de 217.0 nm pero más robusta frente a absorciones no específicas en el ultravioleta cercano. El sistema incorporó una lámpara de cátodo hueco de plomo y corrección de fondo con deuterio ( $\text{D}_2$ ), esencial para contrarrestar efectos de absorción molecular en la región UV. Se prepararon 5 estándares para la calibración de la curva, la que, más adelante ayudaría en la determinación de las concentraciones de plomo. Donde los valores de absorbancia

fueron determinados mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica, con el equipo SensAA Dual, y su respectivo software GBC SavantAA Software (GBC Scientific Equipment, 2009).

**Tabla 6.**

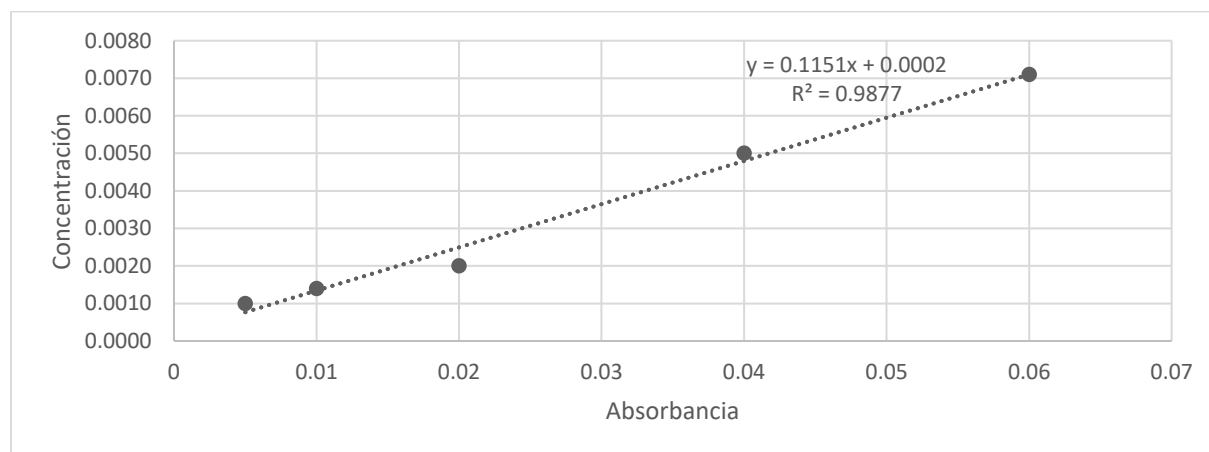
Resultados de absorbancia de estándares

Estándares	Concentración (ppm)	Absorbancia
1	0.005	0.0010
2	0.01	0.0014
3	0.02	0.0020
4	0.04	0.0050
5	0.06	0.0071

*Nota.* Tabla generada con GBC SavantAA Software [Software] versión 4.4.2 (GBC Scientific Equipment, 2009).

**Figura 7.**

*Curva de calibración de estándares de plomo*



*Nota.* Gráfica generada con GBC SavantAA Software [Software] versión 4.4.2 (GBC Scientific Equipment, 2009).

La curva de calibración muestra una relación lineal fuerte entre la concentración de los estándares de plomo y la absorbancia medida por AAS, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9877. Este alto valor refleja una alta precisión y fiabilidad en la medición de concentraciones de plomo. Esto asegura que la curva es adecuada para la cuantificación de plomo en las muestras analizadas.

#### **4.4.2. Metodología para la remoción de plomo**

El presente apartado describe detalladamente los procedimientos utilizados para llevar a cabo los experimentos destinados a evaluar la eficiencia de remoción de plomo mediante los tres diferentes materiales adsorbentes.

**4.4.2.1.Preparación de las soluciones experimentales.** Cada unidad experimental estuvo compuesta por 100 ml de agua destilada con una concentración inicial de plomo de 0.06 ppm, simulando el valor máximo obtenido en la caracterización del Río Tahuando, esto con el fin de facilitar la lectura previa y final posterior a la remoción. Las soluciones fueron preparadas utilizando estándares de plomo certificados (Certipur®) para garantizar la exactitud de la concentración inicial.

**4.4.2.2.Preparación de los tratamientos.** Para el desarrollo del experimento, se prepararon tres tratamientos con materiales adsorbentes: bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado (control). Cada material fue sometido a procedimientos específicos para garantizar condiciones homogéneas y adecuadas para el proceso de filtración.

**Bagazo de caña.** El bagazo de caña se obtuvo de un establecimiento dedicado a la venta de caña y jugo de caña al por mayor ubicado en el Cantón Cotacachi, Provincia de Imbabura, donde este residuo es desechado diariamente en costales. Se seleccionaron las muestras asegurándose de que estuvieran en buen estado, es decir, libres de signos de deterioro, daño o presencia de materia orgánica en descomposición.

El bagazo seleccionado fue reducido de tamaño utilizando una máquina chipiadora perteneciente a la Granja ECAA ubicada en las instalaciones de la Pontificia Universidad Católica

del Ecuador Sede Ibarra, obteniendo fragmentos aproximados de 10 cm. Posteriormente, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- **Lavado:** Las muestras fueron lavadas exhaustivamente con agua destilada para eliminar cualquier impureza superficial, como partículas de suciedad o restos no deseados (Amangandi, 2017).
- **Secado:** Las muestras fueron secadas siguiendo los parámetros establecidos en el estudio realizado por Oré et al. (2015), en una estufa a 90 °C durante 6 horas para reducir la humedad inicial del material. Luego, se dejaron enfriar a temperatura ambiente.
- **Molienda:** Las muestras secas se pasaron por un molino de cuchillas de laboratorio, reduciendo su tamaño hasta obtener partículas muy pequeñas.
- **Tamizado:** Finalmente, las partículas obtenidas fueron tamizadas a un tamaño de 600  $\mu\text{m}$  para garantizar uniformidad en el material adsorbente utilizado en el experimento (Vera et al., 2016).

**Cascarilla de café.** La cascarilla de café fue proporcionada por el laboratorio de Física de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra (PUCESI). Para equiparar las condiciones de este material con las del bagazo de caña, se realizó el siguiente mismo procedimiento de lavado, secado y finalmente el tamizado a un tamaño de 600  $\mu\text{m}$  para obtener una distribución homogénea de partículas.

**Carbón activado.** El carbón activado utilizado como control fue de grado comercial, adquirido de la bodega de reactivos de la PUCESI. Dado que este material ya contaba con características técnicas adecuadas para su uso en laboratorio, únicamente fue sometido al proceso de tamizado a un tamaño de 600  $\mu\text{m}$ , garantizando uniformidad con los otros tratamientos adsorbentes.

**4.4.2.3.Preparación de los filtros.** Se utilizaron jeringas de 10 ml previamente esterilizadas como sistema de filtración para evaluar la eficiencia de los diferentes materiales

adsorbentes en la remoción de plomo. Cada jeringa fue preparada de la siguiente manera:

- Se colocó aproximadamente 0.25 g de algodón en la punta para evitar que los materiales adsorbentes se filtren junto con el agua.
- Se añadieron 5 g del material adsorbente correspondiente al tratamiento. Los materiales adsorbentes fueron previamente secados y, si fue necesario, tamizados para garantizar una distribución homogénea dentro del filtro.
- Los materiales adsorbentes se compactaron adecuadamente en el interior de la jeringa para optimizar el proceso de filtración.
- Finalmente, se cubrieron los materiales con una capa adicional de aproximadamente 0.25 g de algodón para prevenir la pérdida de material por volatilización o arrastre durante el filtrado.

Para asegurar la uniformidad en el proceso, se diseñó un soporte que permitió que todas las jeringas se filtraran por gravedad de manera simultánea. Este diseño garantizó condiciones homogéneas durante el experimento.

**4.4.2.4.Filtración por gravedad.** Las muestras de agua fueron pasadas a través de las jeringas por gravedad, asegurando que el flujo fuera constante y sin intervención externa que pudiera alterar el proceso. Se registró un tiempo aproximado de 6 horas en que las muestras terminaran de ser filtradas en su totalidad.

**4.4.2.5.Recolección de las muestras filtradas.** El agua filtrada fue recolectada en recipientes esterilizados siguiendo la metodología 3005A Methods para asegurar una lectura pertinente de las muestras evitando así contaminación durante el manejo (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

**4.4.2.6.Medición de plomo remanente.** Las muestras fueron analizadas mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) con módulo de llama, utilizando una mezcla de aire-acetileno para la atomización para determinar la concentración de plomo remanente después del tratamiento. La eficiencia de remoción fue calculada utilizando la fórmula:

**Ecuación 2.**

*Cálculo del porcentaje de remoción.*

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Donde:

*C<sub>i</sub>*: Concentración inicial de plomo (0.06 ppm).

*C<sub>f</sub>*: Concentración final de plomo después del tratamiento.

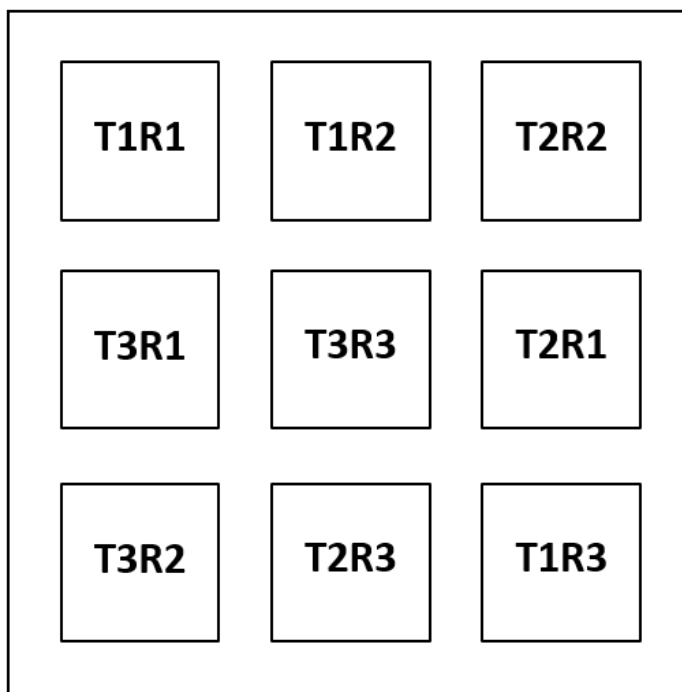
*Nota.* La fórmula presentada detalla el proceso para obtener los porcentajes de remoción pertinentes una vez obtenidos los datos.

**4.4.2.7. Control de condiciones experimentales.** Todas las unidades experimentales fueron manejadas bajo las mismas condiciones ambientales, con una temperatura ambiente de 19°C y presión constante para evitar que factores externos influyeran en los resultados. Los materiales adsorbentes fueron manejados con cuidado en condiciones estériles para cada instrumento que intervino en el proceso de remoción para mantener sus propiedades adsorbentes intactas.

**4.4.2.8. Repeticiones y aleatorización.** Cada tratamiento fue aplicado a tres unidades experimentales, y el orden de ejecución fue completamente aleatorizado con el Software R versión 4.4.2 (R Core Team, 2024) para reducir sesgos experimentales.

**Figura 8.**

*Aleatorización de unidades experimentales*



*Nota.* Se presenta la aleatorización de las unidades experimentales en los diferentes tratamientos y repeticiones. La asignación fue realizada con R [Software] utilizando funciones de generación de números pseudoaleatorios para garantizar imparcialidad en la distribución de los tratamientos versión 4.4.2 (R Core Team, 2024).

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1. Caracterización de plomo en el río Tahuando

La caracterización inicial de las concentraciones de plomo en el agua del Río Tahuando se realizó en siete puntos de muestreo, obteniendo valores que se presentan en la Tabla 7. Que oscilan entre 0.014 ppm en el punto inicial (sector de La Rinconada) y 0.058 ppm en el punto final (punto final del río). Estos resultados superan ampliamente el límite máximo permisible (LMP) de 0.001 ppm establecido en la Tabla 2 (Criterios de Calidad Admisibles para la Preservación de la Vida Acuática y Silvestre en Aguas Dulces, Marinas y de Estuarios) del Acuerdo Ministerial 097-A (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2015a). Los resultados obtenidos en todos los puntos de muestreo superan significativamente este límite, lo que indica que el agua del río no cumple con los estándares establecidos para la protección de la salud humana y los ecosistemas. La media de 0.030 ppm sugiere una contaminación considerable que podría estar relacionada con descargas urbanas o industriales en la cuenca, así como fuentes naturales. Estos resultados cumplen con el primer objetivo específico al determinar la concentración de plomo en el río mediante métodos analíticos, evidenciando niveles superiores a los límites normativos, estableciendo la línea base de contaminación antes del tratamiento con materiales adsorbentes. Dichos datos proporcionan la base para evaluar la eficiencia de los materiales utilizados en los experimentos para la remoción de plomo, descritos en las siguientes secciones.

**Tabla 7.***Concentraciones de plomo en el río Tahuando*

<b>Punto</b>	<b>Pb (ppm)</b>
1	0.014
2	0.017
3	0.025
4	0.016
5	0.036
6	0.047
7	0.058
Media	0.030
*C. Calidad	0.001

*Nota.* Se muestran las concentraciones de plomo (Pb) en distintos puntos del río Tahuando, obtenidas mediante análisis espectrofotométrico.

\* Criterios de Calidad según *Acuerdo Ministerial 097-A*, (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2015a)

La presencia de concentraciones elevadas de plomo en el punto 1 del río Tahuando, un sector sin incidencia antrópica directa, puede atribuirse a procesos naturales asociados a la geología local y la dinámica hidrológica de la cuenca. Estudios en regiones montañosas similares han demostrado que la lixiviación natural de metales pesados desde formaciones rocosas ricas en minerales sulfurados o carbonatados, como las presentes en la provincia de Imbabura, contribuye a la liberación de plomo en cuerpos de agua, incluso en ausencia de actividades humanas (Alloway, 2013). Adicionalmente, fenómenos como la erosión de suelos volcánicos y la meteorización química de rocas pueden movilizar metales hacia los cursos fluviales, tal como lo reporta Kabata-Pendias (2010), en su análisis de fuentes naturales de contaminación en recursos hídricos. A esto se suma la posible influencia de precipitaciones ácidas, que incrementan la solubilidad de metales en suelos y sedimentos, facilitando su transporte hacia el agua (Balas et al., 2019). Estas condiciones naturales explican por qué, en algunos casos, los niveles de plomo superan el LMP

establecido (0.001 ppm), tal como ocurre en el punto 1, donde factores geogénicos y no antropogénicos son los principales responsables de la contaminación

## **5.2.Resultados de la remoción de plomo**

Los tres tratamientos evaluados en esta investigación (bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado) presentan diferencias en su eficiencia de remoción de plomo. El carbón activado exhibió la mayor eficiencia promedio (95.08%), seguido por la cascarilla de café (75.73%) y el bagazo de caña (65.11%). Estas variaciones están relacionadas con las propiedades físico-químicas de los materiales adsorbentes. Si bien los tratamientos con materiales lignocelulósicos lograron una reducción significativa, solo el carbón activado alcanzó valores finales dentro de los límites establecidos por la EPA y la OMS (10-15  $\mu\text{g/L}$  o 0.010-0.015 ppm). (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2017; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2011).

Este análisis cumple con el segundo objetivo específico, al demostrar que materiales lignocelulósicos pueden ser una alternativa sostenible para la remoción de plomo, aunque su eficiencia es menor en comparación con el carbón activado.

**Tabla 8.***Concentraciones finales y porcentaje de remoción*

Tratamiento	Repetición	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Remoción (%)
Bagazo de Caña	1	0.060	0.0218	63.67
	2	0.060	0.0166	72.35
	3	0.060	0.0244	59.32
Cascarilla de Café	1	0.060	0.0114	81.04
	2	0.060	0.0149	75.25
	3	0.060	0.0175	70.90
Carbón Activado	1	0.060	0.0037	93.78
	2	0.060	0.0033	94.50
	3	0.060	0.0018	96.96

*Nota.* Se presentan los valores finales de concentración de plomo (ppm) y el porcentaje de remoción obtenido en cada tratamiento. La concentración inicial de plomo en todas las muestras fue de 0.060 ppm.

Los resultados de la Tabla 8 revelan diferencias en la eficiencia de remoción de plomo entre los materiales evaluados, lo cual está directamente relacionado con sus propiedades físico-químicas. El carbón activado mostró la mayor eficiencia (95.08%), atribuible a su alta superficie específica ( $\approx 1500 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y porosidad, que facilitan la adsorción física y química de iones metálicos (Chand et al., 2005). Este material es ampliamente reconocido como estándar en tratamientos de aguas contaminadas debido a su capacidad para formar complejos estables con metales pesados (Dąbrowski et al., 2005).

En comparación, la cascarilla de café alcanzó una eficiencia del 75.73%, lo que la posiciona como un adsorbente intermedio en términos de eficacia. Estudios previos como el de Demiral y Güngör (2016), han reportado que su contenido de lignina y grupos fenólicos contribuyen significativamente a la adsorción de plomo, ya que estos compuestos actúan como sitios activos en la quelación de iones de plomo. Asimismo, su estructura fibrosa y porosa

proporciona una mayor capacidad de retención de metales pesados en comparación con otros residuos agroindustriales (Quintana et al., 2008).

Por otro lado, el bagazo de caña registró una eficiencia moderada del 65.11%, lo que Foo y Hameed (2010) en su estudio explican que es debido a su menor densidad de grupos funcionales carboxílicos y su superficie rugosa, lo que reduce la interacción con los iones de plomo. Sin embargo, su bajo costo y disponibilidad lo posicionan como una alternativa viable en regiones con escaso acceso a tecnologías costosas.

Estos hallazgos refuerzan la idea de que, aunque el carbón activado es el adsorbente más eficiente, los materiales lignocelulósicos son opciones prometedoras para la remediación de aguas en contextos de economía circular (Maia et al., 2021).

### 5.3. Análisis de resultados

#### 5.3.1. Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas

Antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA), se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas, fundamentales para garantizar la validez de los resultados.

**Tabla 9.**

*Pruebas de normalidad y homogeneidad*

Supuesto	Prueba estadística	Valor estadístico	p-valor	Interpretación
Normalidad de los residuos	Shapiro-Wilk	W = 0.94113	0.5938	Datos normales
Homogeneidad de varianzas	Bartlett	K2 = 2.4569	0.2927	Varianzas homogéneas

*Nota.* La prueba Shapiro-Wilk confirmó que los residuos tienen una distribución normal ( $p > 0.05$ ). La prueba de Bartlett indicó homogeneidad de varianzas ( $p > 0.05$ ). Tabla generada con R [Software] versión 4.4.2 (R Core Team, 2024).

### 5.3.2. Resultados ANOVA

Para evaluar la existencia de diferencias significativas en la remoción de plomo entre los tratamientos analizados, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 10, muestran que la eficiencia de remoción de plomo varió significativamente entre los tratamientos, con un valor de  $p < 0.001$ , lo que indica una diferencia altamente significativa.

El valor de F obtenido (26.59) confirma que al menos uno de los tratamientos presenta una eficiencia de remoción distinta a los demás. El coeficiente de variación (CV) del 6.26% sugiere que la variabilidad dentro de los datos es baja, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados experimentales.

**Tabla 10.**

*Resultados del análisis de varianza ANOVA.*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Valor-p
Tratamientos	2	1385.1	692.6	26.59	0.000856***
Residuos	6	145.3	24.2		
Total	8	1530.4			

Promedio General de remoción: 78.64%

Coeficiente de variación (CV): 6.26%

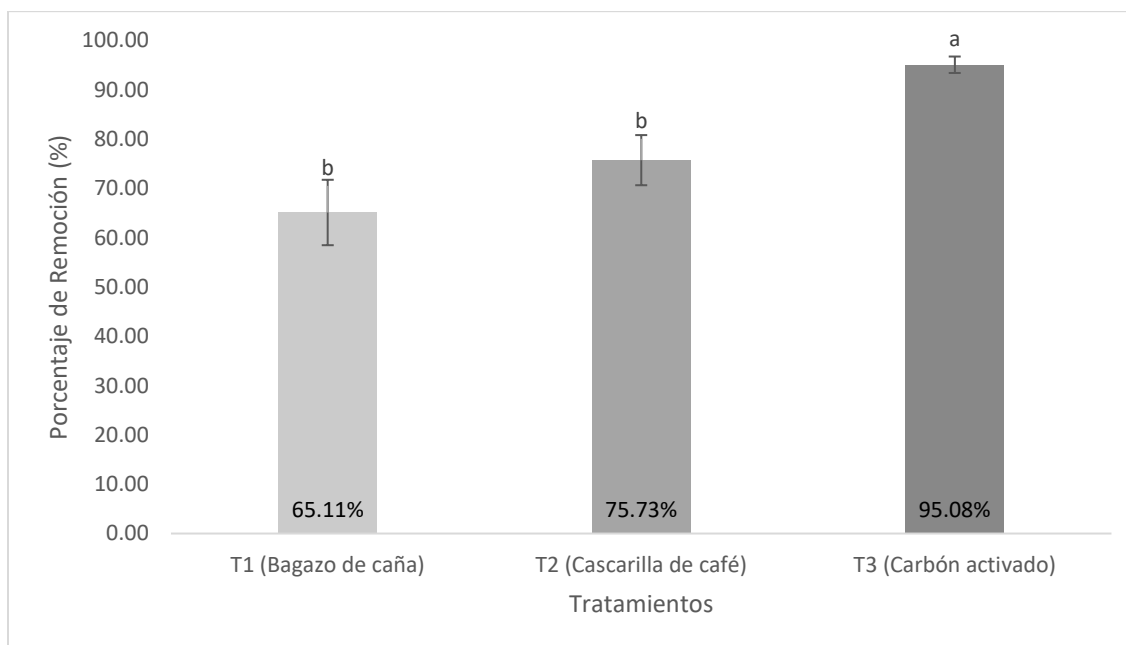
*Nota.* Los valores significativos están indicados con códigos de significancia: \*\*\*:  $p < 0.001$  (alta significancia); \*\*:  $p < 0.01$  (significancia moderada); \*:  $p < 0.05$  (significancia baja); ns: no significativo. Tabla generada con R [Software] versión 4.4.2 (R Core Team, 2024).

### 5.3.3. Prueba de significancia

Dado que el análisis de varianza (ANOVA) indicó diferencias altamente significativas entre los tratamientos ( $p < 0.001$ ), se realizó una prueba de comparaciones múltiples (Tukey 5%) para identificar cuáles tratamientos presentan diferencias estadísticamente significativas en la remoción de plomo.

#### Figura 9.

*Comparación estadística de porcentajes de remoción entre tratamientos*



*Nota.* Barras de porcentaje de remoción de plomo de los diferentes tratamientos y sus respectivas barras de error.

La gráfica muestra el porcentaje de remoción de plomo en los diferentes tratamientos con sus respectivas barras de error, que representan el intervalo de confianza de los datos. Se observa que el tratamiento T3 presenta la mayor remoción de plomo, con un valor cercano al 95%, seguido por el tratamiento T2 con un 75% de remoción, y el tratamiento T1 con un 65%. Las barras de error indican una variabilidad relativamente baja dentro de los tratamientos, sugiriendo que los resultados son consistentes y confiables.

El análisis estadístico confirma que el tratamiento T3 (carbón activado) es significativamente superior a los demás en la remoción de plomo, consolidándose como el mejor adsorbente evaluado. Además, la prueba de comparaciones múltiples indicó que los tratamientos T1 (bagazo de caña) y T2 (cascarilla de café) no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí, es decir, sus desempeños en la remoción de plomo pueden considerarse equivalentes desde un punto de vista estadístico. Sin embargo, matemáticamente, la cascarilla de café presenta una mayor remoción en comparación con el bagazo de caña, lo que indica una diferencia numérica, aunque no significativa desde el punto de vista estadístico.

Estos resultados destacan la importancia de considerar tanto el análisis estadístico como la diferencia numérica al seleccionar materiales adsorbentes para la remediación de plomo en agua contaminada.

#### **5.4. Interpretación y discusión**

En el presente estudio, se evaluó la eficiencia de tres materiales lignocelulósicos para la remoción de plomo de agua, utilizando bagazo de caña, cascarilla de café y carbón activado como tratamientos experimentales. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas en la eficiencia de remoción entre los materiales estudiados.

El tratamiento T3, perteneciente al carbón activado que presentó el mayor porcentaje de remoción (cerca del 95%), se muestra como el más eficiente en la eliminación de plomo, lo que indica una alta capacidad de adsorción de este metal pesado. Este rendimiento superior según (Mendoza, 2012) puede estar relacionado con las propiedades específicas del material utilizado en este tratamiento, que podría tener una mayor área superficial o características de afinidad química para el plomo. La baja variabilidad, indicada por las barras de error, refuerza la confiabilidad de estos resultados.

El tratamiento T2 o cascarilla de café, con un porcentaje de remoción promedio del 75%, mostró un rendimiento intermedio en comparación con el T3, mientras que el tratamiento T1 de bagazo de caña, presentó el porcentaje de remoción más bajo (aproximadamente 65%). Los resultados obtenidos confirman que los materiales lignocelulósicos, en particular el bagazo de caña y la cascarilla de café, son eficaces en la remoción de plomo del agua. La mayor eficiencia observada en estos materiales podría atribuirse a su estructura porosa y a su capacidad para

adsorber metales pesados debido a la presencia de grupos funcionales en su superficie (Parra y Pérez, 2023). La cascarilla de café, por ejemplo, contiene fibras de celulosa que, en contacto con el plomo, facilitan la formación de complejos metálicos que contribuyen a su eliminación (Carvajal y Marulanda, 2020).

Estos resultados son consistentes con otras investigaciones que han demostrado la eficacia de los materiales lignocelulósicos en la remoción de metales pesados. Diversos estudios como los de Amangandi (2017), Quintana et al. (2008) y Vera et al. (2016) han señalado que materiales como el bagazo de caña, la cascarilla de café, y otros residuos orgánicos, presentan un alto potencial de adsorción de plomo, especialmente cuando se encuentran en formas adecuadas de procesamiento.

Sin embargo, se debe destacar que, aunque el carbón activado muestra una excelente eficiencia, los materiales lignocelulósicos usados en este estudio también ofrecen un rendimiento aceptable, lo que los convierte en opciones viables dependiendo de los recursos disponibles y el costo de implementación.

Los hallazgos obtenidos en este estudio demuestran que los materiales lignocelulósicos pueden reducir significativamente la concentración de plomo en el agua, aunque no siempre alcanzan los valores normativos. Esto reafirma la importancia de explorar combinaciones o modificaciones para mejorar su desempeño y cumplir con estándares de calidad del agua. De esta manera, se ha dado respuesta a los objetivos específicos planteados, proporcionando evidencia científica sobre la viabilidad de estos materiales en procesos de remediación ambiental.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

El análisis muestra que el río Tahuando presenta niveles detectables de plomo, lo que sugiere su presencia debido a fuentes tanto naturales como antropogénicas. Los depósitos naturales de plomo en formaciones geológicas ricas en este metal podrían ser una de las principales causas, con la erosión de suelos o la liberación desde depósitos minerales contribuyendo a la contaminación. Aunque las actividades humanas, como la minería, pueden amplificar los niveles, es importante reconocer la influencia de las fuentes naturales en la contaminación del río Tahuando.

Los resultados muestran que el bagazo de caña y la cascarilla de café, aunque no alcanzan la eficiencia del carbón activado, presentan eficiencias considerables en la remoción de plomo del agua bajo las condiciones experimentales. Estos materiales lignocelulósicos son opciones viables y sostenibles, especialmente en regiones donde están disponibles como subproductos agrícolas. Además, son accesibles, ecológicos y de bajo costo, lo que los convierte en alternativas atractivas para sistemas de tratamiento de aguas a gran escala.

Este estudio contribuye al conocimiento sobre el uso de materiales lignocelulósicos en la remoción de metales pesados, particularmente en el contexto de la contaminación por plomo en cuerpos de agua. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones sobre el potencial de estos materiales como una alternativa económica y ecológica en procesos de remediación ambiental. Si bien se lograron los objetivos propuestos, es importante destacar que la evaluación se realizó en condiciones controladas de laboratorio. Para trasladar estos resultados a un contexto real, como sistemas de tratamiento de agua a gran escala, sería pertinente realizar estudios piloto que evalúen la eficiencia de estos adsorbentes en condiciones operativas reales. Asimismo, un análisis costo-beneficio y un estudio del impacto social podrían evidenciar la viabilidad económica y los beneficios para la salud pública y el medio ambiente. Estas líneas de investigación futuras permitirían establecer un puente entre la validación experimental y la implementación de soluciones sostenibles en el tratamiento de aguas contaminadas.

## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

Aunque los tratamientos empleados en esta investigación mostraron un rendimiento positivo, se recomienda explorar otros materiales lignocelulósicos o combinaciones de materiales que puedan mejorar la capacidad de adsorción de metales pesados como el plomo. La investigación de otros residuos agrícolas o industriales podría ofrecer alternativas más económicas o sostenibles.

Es fundamental realizar estudios de escalabilidad para evaluar si los tratamientos utilizados en este estudio pueden ser replicados en condiciones de campo o en plantas piloto. La viabilidad de usar estos materiales a mayor escala dependerá de factores como la disponibilidad de los materiales, el costo de procesamiento y la eficiencia en condiciones ambientales reales.

Es recomendable realizar estudios sobre el impacto ambiental de los tratamientos lignocelulósicos utilizados. Aunque estos materiales son considerados sostenibles, es fundamental asegurarse de que su uso no genere efectos secundarios perjudiciales, como la liberación de metales o compuestos tóxicos durante su uso o disposición.

## CAPÍTULO VIII

### BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental [EPA]. (1992). *Method 3005A acid digestion of waters for total recoverable or dissolved metals for analysis by FLAA or ICP spectroscopy*.
- Agencia de Protección Ambiental [EPA]. (2017). *Lo que usted puede hacer para reducir el plomo en el agua potable*. [https://19january2017snapshot.epa.gov/lead/lo-que-usted-puede-hacer-para-reducir-el-plomo-en-el-agua-potable\\_.html#:~:text=Existen%20dos%20acciones%20principales%20por,partes%20por%20bill%C3%B3n%20\(ppb\)](https://19january2017snapshot.epa.gov/lead/lo-que-usted-puede-hacer-para-reducir-el-plomo-en-el-agua-potable_.html#:~:text=Existen%20dos%20acciones%20principales%20por,partes%20por%20bill%C3%B3n%20(ppb).).
- Albalawi, I., Hogan, A., Alatawi, H., & Moore, E. (2021). A sensitive electrochemical analysis for cadmium and lead based on Nafion-Bismuth film in a water sample. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 34, 100454. <https://doi.org/10.1016/J.SBSR.2021.100454>
- Alcaldía de Ibarra. (2022). *Plan de Trabajo*. <https://www.ibarra.gob.ec/site/wp-content/uploads/2023/06/PLAN-DE-TRABAJO.pdf>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils* (B. J. Alloway, Ed.; Vol. 22). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Amangandi, Á. (2017). *Remoción de plomo en agua residual mediante bioabsorción obtenida del bagazo de caña de azúcar*. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/7860>
- Amangandi, A. (2017). *Remoción de plomo en agua residual mediante bioabsorción obtenida del bagazo de caña de azúcar*. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.
- Argota, G., González, Y., Argota, H., Fimia, R., & Iannacone, J. (2012). Desarrollo y bioacumulación de metales pesados en *Gambusia punctata* (Poeciliidae) ante los efectos de la contaminación acuática. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 13(5), 1-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63624365020>
- Asimbaya, C., Rosas, N., Endara, D., & Guerrero, V. H. (2015). Obtención de Carbón Activado a partir de Residuos Lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto. *Revista Politécnica*, 36(3), 24-24. [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/537](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/537)

- Asociación de Municipalidades Ecuatorianas [AME]. (2024). *Cantón Ibarra - AME*.  
[https://ame.gob.ec/2010/05/20/canton-ibarra/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ame.gob.ec/2010/05/20/canton-ibarra/?utm_source=chatgpt.com)
- Balas, V., Le Hoang, S., Jha, S., Khari, M., & Kumar, R. (2019). Internet of Things in Biomedical Engineering. En *Internet of Things in Biomedical Engineering*. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817356-5.00005-X>
- Barabi, A., Seidi, S., Manouchehri, M., & Alizadeh, R. (2022). Lead analysis by  $\mu$ SPE/FF-AAS: A comparative study based on dimethylglyoxime functionalized silica-coated magnetic iron/graphene oxides. *Analytical Biochemistry*, 653, 114739.  
<https://doi.org/10.1016/J.AB.2022.114739>
- Barba, D. F. C., Patiño, M. F. C., Borja, L. R. B., & Romero, M. B. P. (2022). Acciones para el aprovechamiento turístico de los cantones de la provincia de Imbabura. *Siembra*, 9(2), e3850-e3850. <https://doi.org/10.29166/SIEMBRA.V9I2.3850>
- Barroso, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería*.
- Bashir, M. J. K., Mau Han, T., Jun Wei, L., Choon Aun, N., & Abu Amr, S. S. (2016). Polishing of treated palm oil mill effluent (POME) from ponding system by electrocoagulation process. *Water Science and Technology*, 73(11), 2704-2712. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.123>
- Bhardwaj, A., Bansal, M., Garima, Wilson, K., Gupta, S., & Dhanawat, M. (2025). Lignocellulose biosorbents: Unlocking the potential for sustainable environmental cleanup. *International Journal of Biological Macromolecules*, 294, 139497.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.139497>
- Bianco, E. R., & De Sousa, C. M. (2013). *Montaje, arranque y evaluación de una planta de adsorción de metales pesados (NI Y V) sobre Lignina a escala piloto*.  
<http://saber.ucv.ve/handle/10872/3447>
- Bravo, C. P., & Quispe, L. S. (2019). Metales pesados: Fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. *Ciencias*, 2(1), 20-36. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>
- Canché, G., De Los Santos, J. M., Andrade, S., & Gómez, R. (2005). Obtención de Celulosa a Partir de los Desechos Agrícolas del Banano. *Información tecnológica*, 16(1), 83-88.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642005000100012>

- Cárdenas, L. E. R., & Cortés, L. R. (2000). Exploración al diseño experimental. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 9, 51-59. <https://doi.org/10.18359/RCIN.1688>
- Carvajal, E., & Marulanda, F. (2020). Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44-55. <https://doi.org/10.21500/20275846.4477>
- Cascaret, D., Rodríguez, J., Ricardo, C., Quesada, O., & Bahín, L. (2020). Utilización de bagazo de caña de azúcar natural y tratado ecucúmicamente, como material adsorbente para Cu 2+. *Revista Cubana de Química*, 32(2), 331-344. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212020000200331&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212020000200331&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Castro, D. (2022). *Caracterización geológica e hidrogeológica de la cuenca alta del río Cutuchi : PIM-20-03: recursos hídricos subterráneos en el área de Mulaló: Estudio hidrodinámico e hidrogeoquímico, identificación de zonas peligrosas de contaminación y remoción de metales pesados mediante materiales y compuestos nanoestructurados*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23384>
- Cauas, D. (2015). Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación. *gc.scalahed.com*, 1-11. <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24762w/Definiciondelasvariables,enfoqueytipodeinvestigacion.pdf>
- Cayuela, L. (2014). *Modelos lineales: Regresión, ANOVA y ANCOVA*. [https://tauniversity.org/sites/default/files/modelos\\_lineales\\_regresion\\_anova\\_y\\_ancova.pdf](https://tauniversity.org/sites/default/files/modelos_lineales_regresion_anova_y_ancova.pdf)
- Cea, N. (2014). *Aplicación de un experimento bifactorial en un diseño completamente aleatorio para determinar los efectos de la altura de las zonas y los manejos*. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/7591>
- Chand, R., Meenakshi, B., Roop, G., Bansal, C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>
- Chávez, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323629266003>

- Collazo, M. V., Muñiz, M. M., Alonsol, C., & Frutos, G. (2010). *El análisis estadístico en la Farmacopea Europea: diseño completamente aleatorizado en un bioensayo de factor VIII*. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/26435>
- Condo, L. A., & Pazmiño, J. (2015). *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias* (Vol. 1). <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2019-09-17-214206-dise%C3%B1o%20experimental%20en%20el%20desarrollo%20del%20conocimiento%20cient%C3%ADfico%20de%20las%20ciencias%20agropecuarias-comprimido.pdf>
- Dąbrowski, A., Podkościelny, P., Hubicki, Z., & Barczak, M. (2005). Adsorption of phenolic compounds by activated carbon—a critical review. *Chemosphere*, 58(8), 1049-1070. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2004.09.067>
- Demiral, H., & Güngör, C. (2016). Adsorption of copper(II) from aqueous solutions on activated carbon prepared from grape bagasse. *Journal of Cleaner Production*, 124, 103-113. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.084>
- Doria, C., & Deluque, H. (2015). Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia. *RIAA, ISSN-e 2145-6453, Vol. 6, N° 1, 2015, págs. 123-131, 6(1), 123-131*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5590945&info=resumen&idioma=SPA>
- Duany, S., Arias, T., Bessy, T., & Rodríguez, D. (2022). *Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852022000100094&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852022000100094&script=sci_arttext)
- Ebrahimi, M., Hassanpour, M., Rowlings, D. W., Bai, Z., Dunn, K., O'Hara, I. M., & Zhang, Z. (2022). Effects of lignocellulosic biomass type on nutrient recovery and heavy metal removal from digested sludge by hydrothermal treatment. *Journal of Environmental Management*, 318, 115524. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115524>
- Esri. (2023). *ArcGIS Pro [Software]* (3.2). Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com>
- Ezeonuegbu, B. A., Machido, D. A., Whong, C. M. Z., Japhet, W. S., Alexiou, A., Elazab, S. T., Qusty, N., Yaro, C. A., & Batiha, G. E. S. (2021). Agricultural waste of sugarcane bagasse as efficient adsorbent for lead and nickel removal from untreated wastewater: Biosorption,

- equilibrium isotherms, kinetics and desorption studies. *Biotechnology Reports*, 30, e00614. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2021.E00614>
- Fernandez, M., Florez, D., Yactayo, M., Lovera, D., Quispe, J., Landauro, C., & Pardave, W. (2020). Remoción de metales pesados desde efluentes mineros, mediante cáscaras de frutas. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(1), 21-28. <https://doi.org/10.15649/2346030X.627>
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF]. (2020, julio 29). *Un tercio de los niños del mundo están envenenados con plomo, revela estudio de UNICEF | Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2020/07/1478121>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2009.09.013>
- Franco, A. G., Yépes, P. N. M., & Sánchez, H. A. V. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia Et Technica*, XV(42), 284-289. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916714053>
- Galarza, C., & Vera, F. (2012). *Análisis de Varianza Funcional para medir el efecto de recubrimientos revestibles de almidón en características físico-químicas de papayas durante las dos primeras semanas del período de maduración post-cosecha*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/rest/bitstreams/79201/retrieve>
- García, A. (2020, junio 24). *Evaluación de la concentración de contaminantes emergentes en el río Tahuando, en Ibarra - Ecuador*. 42-43. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/22376/1/T-ESPE-043719.pdf>
- García, Y., Reynoso, O., & Arellano, J. (2005). Potencial del bagazo de Agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis*, (3), 0-undefined. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000314>
- GBC Scientific Equipment. (2009). *GBC SavantAA Software [Software]* (01-1005-00). GBC Scientific Equipment.
- Giusto, A. (2015). *Efectos de la contaminación por metales pesados sobre anfipodos de agua dulce y su aplicación en estudios de toxicidad de sedimentos*. [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n5691\\_Giusto.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5691_Giusto.pdf)

- Gobierno Autónomo Descentralizado [GAD] Provincial de Imbabura. (2024). *Prefectura de Imbabura - Datos Generales*. <https://www.imbabura.gob.ec/index.php/imbabura/datos-generales>
- Gómez, V. E., Velásquez, J. A., & Quintana, G. C. (2013). *Lignina como adsorbente de metales pesados*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/6881>
- Gupta, V. K., & Ali, I. (2012). Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling. *Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling*, 1-212. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05782-4>
- Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- Hadi, Y. (2019). Experimental design to analyze the effect of writing format on student reading comprehension on paper media using completely randomized factorial design. *JEMIS (Journal of Engineering & Management in Industrial System)*, 6(2), 95-104. <https://doi.org/10.21776/UB.JEMIS.2018.006.02.4>
- Hernández, J., García, A., Conejo, F., Oliva, A., & Ardila, A. (2015). *Aprovechamiento de Eichhornia crassipes (lirio acuático) proveniente de la zona de Yuriria, Guanajuato, como fuente de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa*. <https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/03/01-aprovechamiento-de-eichhornia-crassipes-proveniente-de-la-zona-de-yuririra1.pdf>
- Hernández, M., Otero, A., Falcón, J., & Yperman, Y. (2017). Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO<sub>3</sub>. *Revista Cubana de Química*, 29(1), 26-38. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212017000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212017000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Imbaquingo, L. E. C., Cabezas, T. E. G., & Pereira, J. P. B. (2022). Evaluación de las potencialidades turísticas de la parroquia rural Seis de Julio de Cuellaje. *Siembra*, 9(1), e3420-e3420. <https://doi.org/10.29166/SIEMBRA.V9I1.3420>
- Incahuanaco, J., Montalván, R., & Dávila, Y. (2021). Contaminación por metales pesados (As, B, Cd, Cr, Cu, Fe, y Pb) en sedimentos superficiales del estuario Boca del Río, Ilo, Moquegua, Perú 2021. *Sincretismo*, 2(1). <https://revistas.unam.edu.pe/index.php/sincretismo/article/view/26>

- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2024). *visor de estaciones*. <https://inamhi.gob.ec/info/visor>
- Iwuozor, K. O., Oyekunle, I. P., Oladunjoye, I. O., Ibitogbe, E. M., & Olorunfemi, T. S. (2022). A Review on the Mitigation of Heavy Metals from Aqueous Solution using Sugarcane Bagasse. *Sugar Tech*, 24(4), 1167-1185. <https://doi.org/10.1007/S12355-021-01051-W>
- Jadoun, S., Fuentes, J. P., Urbano, B. F., & Yáñez, J. (2023). A review on adsorption of heavy metals from wastewater using conducting polymer-based materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109226. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.109226>
- Jiang, S., Xi, J., Deng, W., Dai, H., Fang, G., & Wu, W. (2020). Low-cost and high-wet-strength paper-based lignocellulosic adsorbents for the removal of heavy metal ions. *Industrial Crops and Products*, 158, 112926. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112926>
- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. En *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/B10158/TRACE-ELEMENTS-SOILS-PLANTS-ALINA-KABATA-PENDIAS/ACCESSIBILITY-INFORMATION>
- Kang, L. Le, Zeng, Y. N., Wang, Y. T., Li, J. G., Wang, F. P., Wang, Y. J., Yu, Q., Wang, X. M., Ji, R., Gao, D., & Fang, Z. (2022). Removal of pollutants from wastewater using coffee waste as adsorbent: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103178. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2022.103178>
- Largitte, L., Brudey, T., Tant, T., Dumesnil, P. C., & Lodewyckx, P. (2016). Comparison of the adsorption of lead by activated carbons from three lignocellulosic precursors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 219, 265-275. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2015.07.005>
- Leyva, R., Díaz, P., Guerrero, R., Mendoza, J., & Aragón, A. (2004). Adsorción de Cd(II) en solución acuosa sobre diferentes tipos de fibras de carbón activado. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48(3), 196-202. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0583-76932004000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

- Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., Terrazas, T., Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2722137>
- Maia, L. C., Soares, L. C., & Alves Gurgel, L. V. (2021). A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption. *Journal of Environmental Management*, 288, 112397. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112397>
- Manals, E., & Salas, D. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. *scielo.sld.cu*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852018000100013&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852018000100013&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Manals, E., Salas, D., & Penedo, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. *Tecnología Química*, 38, 169-181.
- McMurry, J. (2008). Química Orgánica. En <https://humanidades.com/>. Cengage Learning Latin America. [https://books.google.com/books/about/Qu%C3%ADmica\\_Org%C3%A1nica.html?hl=es&id=QPEOrVaIv98C](https://books.google.com/books/about/Qu%C3%ADmica_Org%C3%A1nica.html?hl=es&id=QPEOrVaIv98C)
- Melo, O., López, L., & Melo, S. (2020). *Diseño de experimentos : métodos y aplicaciones*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79912>
- Mena, M., & Pérez, X. (2021). Capacidad adsorbente de metales pesados utilizando materiales Lignocelulósicos en aguas contaminadas: Revisión sistemática. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75447>
- Mendoza, E. (2012). *Remoción de Pb (II) de soluciones mediante carbón activado: Experimentos en lotes*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9347/197380.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mercado, A. (2023). Analysis of variance: ANOVA. *Translational Sports Medicine*, 157-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91259-4.00099-0>

- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2015a). *Acuerdo Ministerial No. 061*. [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento\\_acuerdo-ministerial-061.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_acuerdo-ministerial-061.pdf)
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2015b). *Acuerdo Ministerial No. 097-A*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. [https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\\_ORGANICO\\_AMBIENTE.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)
- Miros, P., Sobczak, P., & Kopania, E. (2022). *Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions with the Use of Lignins and Biomass*. <https://doi.org/10.2478/ftce-2022-0013>
- Montaño, T., & Uyaguari, C. (2014). *Diseño, construcción y análisis funcional-experimental de una cocina solar combinada (PARVATI - TIPO CAJA) para el laboratorio de energías renovables de la CIEM-UNL*. <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/12027>
- Montgomery, D. (2014). *Diseño y análisis de experimentos*. En *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley. [https://catalogobiblioteca.puce.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=269086&query\\_desc=kw%2Cwrld%3A%20dise%C3%B1o%20experimental](https://catalogobiblioteca.puce.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=269086&query_desc=kw%2Cwrld%3A%20dise%C3%B1o%20experimental)
- Morales, P. (2012). *Tipos de variables y sus implicaciones en el diseño de una investigación*. [gc.scalahed.com. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25732w/morales.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25732w/morales.pdf)
- Navarro, P., & Vargas, C. (2010). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. *revistademetalurgia.revistas.csic.es*, 46(3), 227-239. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0929>
- Oré, F., Lavado, C., & Bendezú, S. (2015). Biosorción de Pb (II) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (*Zea mays*) biosorption of lead Pb (II) from residual waters of mine by corncob (*Zea mays*). *Rev Soc Quím Perú*, 81(2).
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2011). *Drinking water: a major source of lead exposure in Karachi, Pakistan | Volume 17, issue 11 | EMHJ volume 17, 2011*. <https://www.emro.who.int/emhj-volume-17/volume-17-issue-11/article-14.html>

- Ortega, E. R., Doria, M. C., Arenas, G. V., Dávila, F. S., Zare, E. G., & Ordoñez, E. S. (2020). Bioacumulación de metales pesados en tres especies de peces bentónicos del río Monzón, región Huánuco. En *REBIOL* (Vol. 40, Número 1, pp. 69-78). <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/2997/3764>
- Ortega, J., Valverde, A., Castro, C., Indacochea, B., Alcívar, J., Vera, M., & Vera, R. (2021). *Diseños experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios*. <https://mawil.us/wp-content/uploads/2022/09/disenos-experimentales-teoria-y-practicas-para-experimentos-agropecuarios.pdf>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Parra, J., & Pérez, E. (2023). Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 18-27. <https://doi.org/10.18684/RBSAA.V21.N1.2023.1610>
- Pastrana, J., & Mora, N. (2017). Evaluación de la capacidad de adsorción del residuo de café molido en la remoción de Mercurio (II) en matrices acuosas. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 182, 87-94. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2013.02.102>
- Peña, A. (2021). Estudio de la remoción de Cd (II) en medio acuoso utilizando la cascarilla de arroz como bioadsorbente. *Universidad Nacional de Ingeniería*. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/21816>
- Pérez, A. (2007). Las variables en el método científico. *scielo.org.pe*, 73, 171-177. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2007000300007&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2007000300007&script=sci_arttext&tlng=en)
- Porrás, M. E., Muñoz, C. P., Gil, A. M., & Quintana, G. C. (2012). *Obtención de espumas de poliuretano con materiales lignocelulósicos*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7032>
- Prado, M., Anzaldo, J., Becerra, B., Palacios, H., Vargas, J., & Rentería, M. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica

- mixta. *scielo.org.mx*, 18(3), 37-51. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-04712012000300004&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-04712012000300004&script=sci_arttext)
- Primera, O., Colpas, F., Meza, E., & Fernández, R. (2011). Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(136), 387-396. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-39082011000300012&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000300012&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Prinsen, P. (2010). *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas*. <https://digital.csic.es/handle/10261/66265>
- Quintana, G., Velásquez, J., Gómez, C., & Echavarría, Y. (2008). Adsorción de NI(II) en carbón activado de cascarilla de café. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7188>
- Quiñones, E., Tejada, C., Arcia, C., & Ruiz, V. (2013). Remoción de plomo y níquel en soluciones acuosas usando biomasas lignocelulósicas: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 479-489. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262013000200023&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000200023&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing [Software]* (4.4.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Raj, V., Chauhan, M. S., & Pal, S. L. (2022). Potential of sugarcane bagasse in remediation of heavy metals: A review. *Chemosphere*, 307, 135825. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135825>
- Ramírez, J. H., & Enríquez, M. K. (2015). Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del seudotallo de plátano. *Acta Agronómica*, 64(3), 209-213. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169940048002>
- Recio, R., & Aliaga, J. (2016). Uso del diseño completamente aleatorio para determinar la edad de comienzo de los mejores resultados en los lanzadores del martillo (Original). *Olimpia: Publicación científica de la facultad de cultura física de la Universidad de Granma, ISSN-e 1817-9088, Vol. 13, Nº. 41, 2016 (Ejemplar dedicado a: octubre-diciembre), págs. 139-152, 13(41), 139-152.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6210845&info=resumen&idioma=SPA>

- Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., Barranzuela, J. L., Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Información tecnológica*, 33(2), 247-258. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000200247>
- Reyes, E. D., Cerino, F. de J., & Suárez, M. A. (2016). *Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa*.
- Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition*. <https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>
- Robles, M. (2024). La Seguridad alimentaria: Riesgo asociados Metales Pesados sobre la salud humana. En *Journal of American Health* (Vol. 7, Número 2). <https://jah-journal.com/index.php/jah/article/view/198>
- Rodríguez, C., Oré, J., & Vargas, D. (2021). *Las variables en la metodología de la investigación científica*. 78. [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=5jFJEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA23&dq=variables&ots=3elwBzw19W&sig=S\\_eoGIIBA-VOVoqX1VLTnY6b5Us](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=5jFJEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA23&dq=variables&ots=3elwBzw19W&sig=S_eoGIIBA-VOVoqX1VLTnY6b5Us)
- Romero, E., Montero, G., Toscano, L., Pérez, L., Torres, R., & Beleño, M. (2014). Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulosa; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/profile/Gisela-Montero/publication/282365664\\_Determinacion\\_de\\_los\\_principales\\_componentes\\_de\\_la\\_biomasa\\_ligonocelulosica\\_celulosa\\_hemicelulosa\\_y\\_lignina\\_de\\_la\\_paja\\_de\\_trigo\\_para\\_su\\_posterior\\_pretratamiento\\_biologico/links/560ebdbc08ae483375172df7/Determinacion-de-los-principales-componentes-de-la-biomasa-ligonocelulosica-celulosa-hemicelulosa-y-lignina-de-la-paja-de-trigo-para-su-posterior-pretratamiento-biologico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gisela-Montero/publication/282365664_Determinacion_de_los_principales_componentes_de_la_biomasa_ligonocelulosica_celulosa_hemicelulosa_y_lignina_de_la_paja_de_trigo_para_su_posterior_pretratamiento_biologico/links/560ebdbc08ae483375172df7/Determinacion-de-los-principales-componentes-de-la-biomasa-ligonocelulosica-celulosa-hemicelulosa-y-lignina-de-la-paja-de-trigo-para-su-posterior-pretratamiento-biologico.pdf)
- Saborío, L., & Hidalgo, L. (2015). *Consumo de arsénico y riesgo cardiovascular*. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-00152015000100013&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-00152015000100013&script=sci_arttext)
- Sanchez, J., González, R., Blancas, F., & Fonseca, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2020.0.261>

- Sánchez, M., Gaytán, J., Prieto, F., & Cabrera, R. (2021). Evaluación Rápida de Potencial de Riesgo Genotóxico (ERPRG) asociada a metales pesados en agua potable: Caso de estudio Zimapán, Hidalgo, México. *PÁDI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 114-120. <https://doi.org/10.29057/ICBI.V9I17.7140>
- Sepúlveda, G. (2015). *Estudio biogeoquímico del embalse Suata de acuerdo al contenido de metales pesados en sus sedimentos, aguas y peces*. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/8172>
- Siegel, A. F., & Wagner, M. R. (2022). ANOVA: Testing for Differences Among Many Samples and Much More. *Practical Business Statistics*, 485-510. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820025-4.00015-4>
- Tejada, C., Herrera, A. P., & Núñez, J. R. (2015). Adsorción competitiva de Ni (II) y Pb (II) sobre materiales residuales lignocelulósicos. *Investigaciones Andina*, 17(31), 1355-1367. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-81462015000201355&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81462015000201355&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Tejada, C., Villabona, Á., & Garcés, L. (2015). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992015000100010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992015000100010&script=sci_arttext)
- Tejada, L., Tejada, C., Marimón, W., & Villabona, Á. (2014). Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* Y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución. *Luna Azul*, 39, 124-142. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-24742014000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742014000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Tellerias, L., & Paris, E. (2008). Impacto de los tóxicos en el neurodesarrollo. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 55-63. <https://doi.org/10.4067/S0370-41062008000700010>
- Torres, C. (2024). *Adsorción de metales pesados en agua usando carbón activado modificado mediante tratamiento ácido*. Universidad de Concepción. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/11961>
- Valdés, E. M., Mendoza, D. I., Reynel, H. E., Aguayo, I. A., & Bonilla, A. (2022). Activated carbon manufacturing via alternative Mexican lignocellulosic biomass and their application in water treatment: Preparation conditions, surface chemistry analysis and heavy metal adsorption

- properties. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 9-26.  
<https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2022.08.039>
- Vargas, J., & Navarro, J. (2017). Determinación del tamaño y la forma de unidad experimental, con el método de curvatura máxima, para ensayos de rendimiento de maíz (*Zea mays*), Guanacaste, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 135-144.  
[http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1659-42662017000100135&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-42662017000100135&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Vera, J. (2018). *Resumen y principios de diseño experimental*.  
<https://www.uteq.edu.ec/es/investigacion/libro/11>
- Vera, L., Uguña, M., García, N., Flores, M., & Vázquez, V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, ISSN 0001-9704, Vol. 73, Nº. 573, 2016, págs. 43-49, 73(573), 43-49.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5467346&info=resumen&idioma=ENG>
- Villasís, M., & Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación IV: las variables de estudio. *revistaalergia.mx*, 63(3), 303-310.  
<http://revistaalergia.mx/ojs/index.php/ram/article/view/199>
- Villegas, D. F. (2023). *Evaluación toxicológica del río Tahuando*.  
<https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/42797>
- Welz, B., & Sperling, M. (1998). Atomic Absorption Spectrometry. *Atomic Absorption Spectrometry*. <https://doi.org/10.1002/9783527611690>

## CAPÍTULO IX

### ANEXOS

#### Anexo 1.

##### *Toma de muestras río Tahuando*



*Nota.* El muestreo se realizó en 7 puntos del río, no se recurrió a sitios de propiedad privada.

#### Anexo 2.

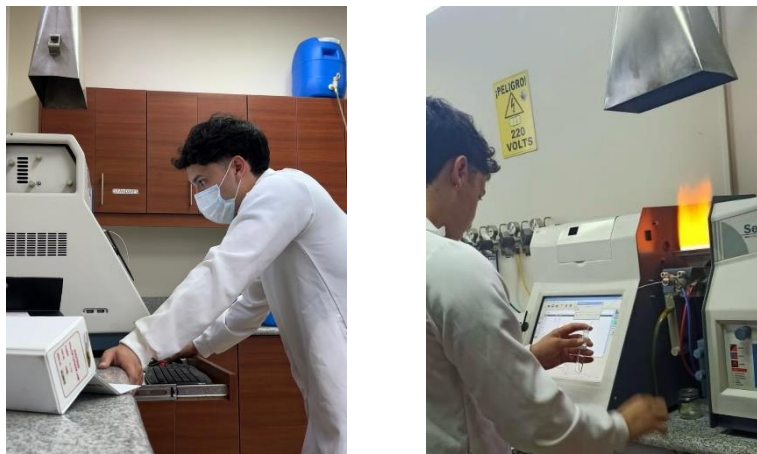
##### *Preparación de muestras*



*Nota.* Las muestras recogidas fueron preparadas según el método 3005A (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1992).

### Anexo 3.

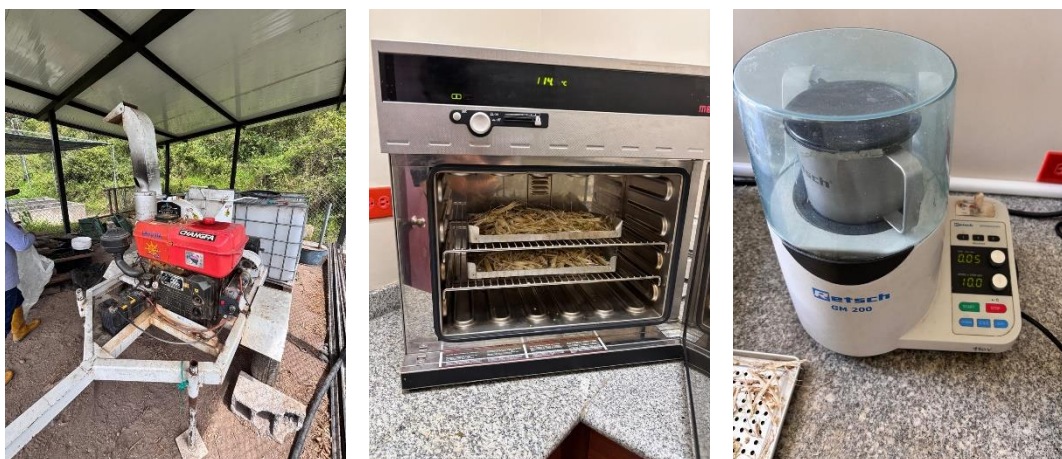
#### *Lectura de muestras*



*Nota.* La lectura de concentraciones de Pb se llevó mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. Equipo SensAA Dual. GBC SavantAA Software (GBC Scientific Equipment, 2009).

### Anexo 4.

#### *Preparación de materiales lignocelulósicos*



*Nota.* Los materiales lignocelulósicos fueron sometidos a tratamiento de secado a 90°C y tamizado de 0.6mm.

**Anexo 5.***Preparación de filtros*

*Nota.* Los filtros fueron preparados en iguales condiciones para cada uno de los tratamientos y sus respectivas repeticiones.

**Anexo 6.***Montaje del experimento*

*Nota.* Las muestras fueron filtradas por gravedad mediante los filtros preparados con ayuda de un soporte improvisado con gradillas.

**Anexo 7.***Lectura de concentraciones final*

*Nota.* La lectura de concentraciones de Pb luego de la filtración, se llevó mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. Equipo SensAA Dual. GBC SavantAA Software (GBC Scientific Equipment, 2009).