

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO APLICANDO PSEUDOTALLO DE *Musa paradisiaca* L. EN SOLUCIONES ACUOSAS A NIVEL DE LABORATORIO, 2024.

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

PORTILLO ROBLES, GIANELLA JHADE

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°078-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 20 de junio de 2025, a horas 8:30 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO APLICANDO PSEUDOTALLO DE *Musa paradisiaca* L. EN SOLUCIONES ACUOSAS A NIVEL DE LABORATORIO, 2024.”

Presentado por la Bachiller: **PORTILLO ROBLES, GIANELLA JHADE** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“EXCELENTE”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 01 de julio de 2025

Mblgo.M.Sc. LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO
PRESIDENTE

Ing. MSc. SANDRA L. ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO



Ing. MSc. PATRICIA P. ROMERO USHUÑAHUA
MIEMBRO

Ing. MSc. ABBY S. DA CRUZ RODRIGUEZ
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 225 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

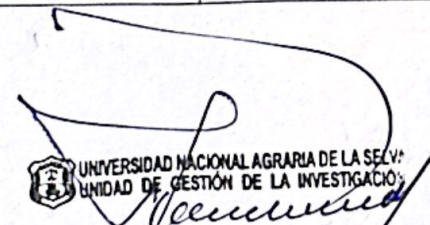
Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO APLICANDO PSEUDOTALLO DE <i>Musa paradisiaca</i> L. EN SOLUCIONES ACUOSAS A NIVEL DE LABORATORIO, 2024.	PORTILLO ROBLES, GIANELLA JHADE	12 % Doce

Tingo María, 07 de julio de 2025


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomás Menacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO APLICANDO PSEUDOTALLO DE *Musa paradisiaca* L. EN SOLUCIONES ACUOSAS A NIVEL DE LABORATORIO, 2024.

Autor : PORTILLO ROBLES, Gianella Jhade

Asesor : Ing. MSc. DA CRUZ RODRIGUEZ, Abby Solange.

Área de investigación : Ciencia y Tecnología Ambiental – Pibiot.

Grupo de investigación : Ciencia y Tecnología Ambiental.

Línea de investigación : Tecnologías para reducir la contaminación.

Lugar de ejecución : Laboratorio Central de Investigación

Duración : 6 meses

Financiamiento : S/. 5,135.00FEDU : S/.00.00

Propio : S/.5,135.00

Otros : S/.00.00

Tingo MaríaPerú, 2024

DEDICATORIA

*A mis padres **José Grabiél Portillo Mendoza** y **Lilian Violeta Robles Figueroa** , por su amor incondicional, implacable tenacidad y sabias palabras de motivación, por ser soporte continuo e importante que me permite continuar soñando para alcanzar metas personales y profesionales. Su ejemplo de trabajo en equipo, dedicación y consejos para valorar el tiempo ha sido determinante para superar cualquier adversidad en la vida.*

*A mis hermanas **Katherine Grabiela Portillo Robles** y **María de los Ángeles Portillo Robles** por ser mis compañeras de vida, protegerme, llenarme de su afecto que es fortaleza. Su respaldo en cada etapa de mi vida me permite ser mejor y creer en mí.*

AGRADECIMIENTO

*Mis primeras palabras de agradecimiento las dedico a nuestro divino señor **Dios**, quien en su cuantiosa sabiduría a sido mi guía constante y me otorgo unos padres maravillosos que me criaron en un ambiente de armonía, educación, respeto y valores que han sido fundamentales pilares en mi vida personal y formación académica.*

*Estaré siempre eternamente agradecida con mi madre **Lilian Violeta Robles Figueroa**, quien a sido mi mejor amiga, compañera y guía con su amor incondicional en los momentos más difíciles.*

*A mi padre **José Grabiél Portillo Mendoza** quien me ha brindado su protección, cuidados, cariño y un respaldo absoluto en mis decisiones, a mis hermanas Katherine Gabriela Portillo Robles y María de los Ángeles Portillo Robles, quienes han sido mi punto de apoyo en todas mis vivencias, así como mis mayores admiradores y los mejores hermanos que podría tener, con sus palabras me motivaron a creer en mí y que podría cumplir todas mis metas con sacrificio y mucha tenacidad.*

*Agradecer a mi asesora **Ing. M.Sc. Abby Solange Da Cruz Rodríguez** por su esfuerzo y dedicación, los conocimientos impartidos, su persistencia, paciencia que han sido fundamentales para poder desarrollar este trabajo de investigación; a sabido inculcar en mí el sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico.*

*Extiendo mi agradecimiento y reconocimiento a la **Universidad Nacional Agraria de la Selva**, por brindarme la oportunidad de formar parte de su selecto alumnado en una formación académica llena de conocimientos, profesionalismo, competitividad, y la inculcación de valores éticos que harán de mi una profesional exitosa.*

*Especialmente a la **Especialidad de Ingeniería Ambiental** que ha sabido impartir su vasto conocimiento a través de una plana docente admirable, con la premisa de formar excelentes profesionales que puedan desempeñarse en un ambiente laboral competitivo. Aportando con dedicación y entrega, soluciones ambientales para una sociedad en desarrollo constante.*

ÍNDICE

Página	
I.	INTRODUCCIÓN 1
1.1.	Objetivos 2
1.1.1.	Objetivo general 2
1.1.2.	Objetivos específicos 2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA..... 3
2.1.	Antecedentes 3
2.1.1.	Internacionales 3
2.1.2.	Nacionales 6
2.1.3.	Locales 7
2.2.	Marco teórico..... 8
2.2.1.	Generalidades del plátano 8
2.2.1.1.	Definición 8
2.2.1.2.	Taxonomía 8
2.2.1.3.	Variedades 8
2.2.1.4.	Pseudotallo de plátano 9
2.2.1.5.	Usos y beneficios del pseudotallo de plátano 10
2.2.2.	Contaminación del agua 10
2.2.3.	Adsorbentes 12
2.2.3.1.	Tipos de adsorbentes 12
2.2.3.2.	Características de material absorbente 12
2.2.4.	Técnicas analíticas para caracterización del material adsorbente 13
2.2.4.1.	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) 13
2.2.4.2.	Difracción de Rayos X (XRD) 14
2.2.4.3.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)..... 14
2.2.4.4.	Análisis Térmico..... 15
2.2.5.	Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) 16

2.2.5.1. Modelos en RSM.....	17
2.2.5.2. Diseño Box-Behnken.....	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. Lugar de ejecución.....	19
3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio	19
3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio	19
3.2. Materiales y equipos.....	20
3.2.1. Materia prima.....	20
3.2.2. Material de campo	20
3.2.3. Materiales de laboratorio.....	20
3.2.4. Equipos.....	20
3.2.5. Insumos	20
3.2.6. Softwares usados.....	20
3.3. Criterio y análisis de estudio	21
3.3.1. Nivel de investigación.....	21
3.3.2. Tipo de investigación	21
3.3.3. Método de investigación	21
3.3.4. Operacionalización de variables	22
3.3.5. Diseño de investigación	22
3.3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	23
3.3.7. Análisis de datos	24
3.4. Metodología Experimental	24
3.4.1. Caracterización del adsorbente de pseudotallo de <i>M. Paradisiaca</i> (Bellaco).	24
3.4.1.1. Análisis fisicoquímico del pseudotallo de plátano.....	26
3.4.1.2. Identificación de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) del pseudotallo de plátano. ...	26

3.4.1.3. Morfología y distribución granulométrica del pseudotallo de plátano.	27
3.4.1.4. Análisis térmico del pseudotallo de plátano.	27
3.4.1.5. Evaluación del punto de carga cero (pHpzc) del pseudotallo de plátano.	28
3.4.2. Determinación del porcentaje de adsorción del azul de metileno (AM) en las soluciones acuosas utilizando adsorbente del pseudotallo de <i>M. Paradisiaca</i> (plátano).	28
3.4.3. Evaluación de la reutilización del adsorbente obtenido del pseudotallo de <i>M. paradisiaca</i> después de la adsorción del azul de metileno.	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	31
4.1. Caracterización del adsorbente de pseudotallo de <i>M. Paradisiaca</i> (plátano).	31
4.1.1. Análisis fisicoquímico del pseudotallo de plátano.	31
4.1.2. Identificación de grupos funcionales por espectroscopía FTIR del pseudotallo de plátano.	33
4.1.3. Morfología y distribución granulométrica del pseudotallo de plátano.	36
4.1.4. Análisis térmico del pseudotallo de plátano.	39
4.1.4.1. Termogravimetría (TGA/DTG).	39
4.1.4.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	42
4.1.5. Evaluación del punto de carga cero (pHpzc) del pseudotallo de plátano	43
4.2. Determinación el porcentaje de adsorción del azul de metileno en soluciones acuosas utilizando adsorbente del pseudotallo de <i>M. Paradisiaca</i> (plátano).	45
4.3. Evaluación de la reutilización del adsorbente obtenido del pseudotallo de <i>M. Paradisiaca</i> (plátano) después de la adsorción del azul de metileno.	52
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. REFERENCIAS	57
ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Operacionalización de variables.....	22
2. Optimización por superficie de respuesta.....	29
3. Análisis Físicoquímico del Pseudotallo de plátano	31
4. Grupos funcionales detectado por Espectroscopía FTIR	34
5. Zonas térmicas de degradación del pseudotallo de plátano.....	40
6. Valores para cálculo de pH_{pzc} de pseudotallo del plátano	44
7. Optimización del proceso de adsorción de azul de metileno mediante diseño Box-Behnken	46
8. Análisis de Varianza (ANOVA) para el modelo de adsorción.....	48
9. Análisis de reutilización de adsorbente extraído del pseudotallo de plátano	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Estructuras químicas de algunos colorantes azoicos, (a) Naranja reactivo 107, (b) Amarillo reactivo 145, (c) Naranja reactivo 122, (d) Negro reactivo 5.	11
Figura 2. Ubicación política de la zona en estudio.....	19
Figura 3. Diseño experimental de la optimización del adsorbente extraído de pseudotallo de plátano (Bellaco).....	23
Figura 4. Flujograma para la obtención del adsorbente del pseudotallo de plátano (bellaco) .	25
Figura 6. Morfología del pseudotallo de plátano observada mediante microscopía óptica. A: aumento 16×; B: aumento 40×; C: aumento 40×; D: aumento 100×.	37
Figura 7. Distribución del tamaño de partículas del pseudotallo de plátano.	38
Figura 8. Termograma TGA/DTG del pseudotallo de plátano.....	40
Figura 9. Termograma DSC del pseudotallo de plátano.	42
Figura 10. Evaluación del punto de carga cero (pHpzc)	45
Figura 11. Efectos principales de absorción del pseudotallo de plátano	49
Figura 12. Diagrama de Pareto en la absorción AM con pseudotallo de plátano.....	50
Figura 13. Contorno de la superficie de respuesta estimada para la adsorción en función de la dosis del adsorbente y la concentración del tinte a pH 11.....	51
Figura 14. Adsorción y desorción del adsorbente extraído del pseudotallo de plátano	53

RESUMEN

Este estudio evaluó la capacidad adsorbente del pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) para remover azul de metileno (AM) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio. El adsorbente se obtuvo mediante lavado, tratamiento ácido, secado, molienda y tamizado, con partículas entre 300–500 μm . Se caracterizó mediante análisis fisicoquímico, FTIR, microscopía óptica, análisis térmico (TGA y DSC) y determinación del punto de carga cero (pHpzc). El material presentó pH 6,15, humedad de 5,87%, capacidad de retención de agua de 12,22 g/mL y densidad de 1,25 g/mL. FTIR reveló la presencia de grupos funcionales –OH, C=O, C–H y aromáticos, asociados a celulosa, hemicelulosa y lignina, responsables de la adsorción del colorante. Se empleó un diseño Box-Behnken bajo la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar las condiciones de adsorción, considerando pH, dosis del adsorbente y concentración del tinte. La mayor eficiencia (99,94%) se alcanzó a pH 11, con dosis de 5 g/L y concentración de 5,35 mg/L de AM. Además, se analizó la reutilización del adsorbente en cuatro ciclos de adsorción-desorción utilizando soluciones regenerantes (NaOH/Metanol y HCl), manteniéndose una eficiencia superior al 85%. Los resultados confirman que el pseudotallo de plátano es un adsorbente eficiente, económico y sostenible para la remoción de colorantes catiónicos, aportando valor agregado a los residuos agroindustriales y promoviendo alternativas tecnológicas limpias para el tratamiento de aguas contaminadas.

Palabras claves: Adsorción, pseudotallo de plátano, azul de metileno, superficie de respuesta (RSM), tratamiento de aguas residuales.

ABSTRACT

This study evaluated the adsorptive capacity of the pseudostem of *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco) for the removal of methylene blue (MB) from aqueous solutions at the laboratory scale. The adsorbent was prepared through washing, acid treatment, drying, grinding, and sieving, obtaining particles in the 300–500 μm range. The material was characterized by physicochemical analysis, FTIR spectroscopy, optical microscopy, thermal analysis (TGA and DSC), and determination of the point of zero charge (pHpzc). The pseudostem exhibited a pH of 6.15, moisture content of 5.87%, water retention capacity of 12.22 g/mL, and density of 1.25 g/mL. FTIR analysis revealed functional groups such as –OH, C=O, C–H, and aromatic groups, associated with cellulose, hemicellulose, and lignin—key components in dye adsorption. A Box-Behnken design under the Response Surface Methodology (RSM) was applied to optimize adsorption conditions, evaluating pH, adsorbent dosage, and initial dye concentration. The highest efficiency (99.94%) was achieved at pH 11, with a dosage of 5 g/L and an initial MB concentration of 5.35 mg/L. Furthermore, the reusability of the adsorbent was assessed over four adsorption–desorption cycles using regeneration solutions (NaOH/Methanol and HCl), maintaining efficiency above 85%. The results confirm that banana pseudostem is an effective, economical, and sustainable lignocellulosic adsorbent for the removal of cationic dyes, adding value to agro-industrial residues and supporting clean technological alternatives for wastewater treatment.

Keywords: Adsorption, banana pseudostem, methylene blue, response surface methodology (RSM), wastewater treatment.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo humano, por lo que su contaminación representa una preocupación ambiental de alcance global. La creciente crisis hídrica, impulsada por el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial, exige soluciones sostenibles para preservar este recurso. En los últimos años, el vertido de aguas residuales con altos niveles de colorantes por parte de diversas industrias ha generado un riesgo significativo para el medio ambiente, afectando suelos, aguas superficiales y subterráneas. En particular, la industria textil ha contribuido de manera notable a esta problemática, al liberar colorantes sintéticos que alteran la calidad del agua y dañan los ecosistemas acuáticos. Uno de los compuestos más representativos es el azul de metileno (AM), un tinte catiónico ampliamente utilizado en sectores como el textil, farmacéutico y papelerero, que reduce la penetración de luz solar en el agua, obstaculiza la fotosíntesis y representa un riesgo para la salud humana. La demanda creciente de agua, sumada a la producción anual de aproximadamente 700,000.00 toneladas de efluentes coloreados (Kokate et al., 2022), refuerza la urgencia de desarrollar métodos eficientes y accesibles para el tratamiento de estos contaminantes.

Diversos métodos han sido ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas residuales industriales, tales como la extracción por solventes, los procesos de separación por membranas, los métodos electroquímicos, el tratamiento biológico, el uso de carbón activado y la oxidación avanzada. Sin embargo, muchos de estos procesos son costosos, complejos y poco sostenible. En este contexto, la adsorción ha ganado relevancia como técnica económica, eficiente y de bajo impacto ambiental. Este proceso permite la remoción de contaminantes mediante la adherencia a superficies sólidas, siendo una alternativa viable especialmente si se emplean materiales de desecho como adsorbentes.

Uno de los materiales con mayor potencial para la adsorción de contaminantes es el pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. (plátano), un subproducto agrícola generado en grandes volúmenes por la industria bananera. Este residuo, que suele ser descartado o incinerado, está compuesto por fibras lignocelulósicas con propiedades adsorbentes destacables. Su aprovechamiento no solo permitiría una alternativa eficiente para la remoción de contaminantes en cuerpos de agua, sino que también favorecería la valorización de residuos agroindustriales y el impulso de prácticas sostenibles en la gestión ambiental. De acuerdo con la FAO (2022), la producción mundial de plátano superó los 122 millones de toneladas anuales, lo que genera una considerable cantidad de biomasa residual. El pseudotallo, que constituye aproximadamente el

70 % de la biomasa total de la planta, se presenta, así como un recurso abundante y subutilizado, con gran potencial para ser transformado en un adsorbente eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

El trabajo de investigación tiene como problema: ¿En qué porcentaje se adsorbe el azul de metileno aplicando pseudotallo de *Musa Paradisiaca* L. en soluciones acuosas a nivel de laboratorio? e hipótesis que más del 70 % de azul de metileno es adsorbido aplicando el adsorbente del pseudotallo de *Musa Paradisiaca* L. como adsorbente.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la aplicación del pseudotallo de *Musa Paradisiaca* L. (plátano) como adsorbente para la remoción del azul de metileno en soluciones acuosas, en el Laboratorio Central de Investigación de la UNAS, 2024.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar al adsorbente obtenido del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano).
- Determinar el porcentaje de adsorción del azul de metileno en soluciones acuosas utilizando adsorbente del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano).
- Evaluar la reutilización del adsorbente obtenido del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano) después de la adsorción del azul de metileno.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Peluffo y Castro (2019), investigaron la aplicación de cáscaras de plátano para generar un material adsorbente similar al carbón mediante un proceso de activación térmica natural. Se realizaron tratamientos térmicos a temperaturas de 300 °C y 500 °C, utilizando dos tamaños de partícula (425 micras, designado como polvo y 850 micras, conocido como granular). El carbón tipo polvo obtenido a 500 °C presentó la mayor área superficial registrada (80,3718 m²/g) y el porcentaje más bajo de humedad (6,37%). Este carbón, especialmente en forma de polvo a 500°C, demostró una eficacia superior en la eliminación del colorante Azul Marino Directo (AMD). Los resultados experimentales se ajustaron de manera satisfactoria a la isoterma Freundlich, corroborando la capacidad de adsorción del material. Este método representa una opción sostenible y eficiente para tratar efluentes con tintes, aprovechando un residuo orgánico común para producir un adsorbente de alto rendimiento.

Lapo et al. (2020), analizó el potencial de la biomasa lignocelulósica basada en residuos de plátano para la recuperación de tierras raras críticas a partir de soluciones acuosas. "Los elementos de tierras raras (ETR) tienen múltiples aplicaciones en dispositivos tecnológicos, pero también presentan desafíos (escasez y contaminación del agua). El estudio actual tiene como objetivo valorizar los residuos de plátano - racimo de plátano (BR), pseudo-tallo de plátano (PTS) y cáscara de plátano (BP) - como materiales adsorbentes sostenibles para la recuperación de ETR. Los materiales adsorbentes se caracterizaron mediante técnicas analíticas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, espectroscopía de fotoelectrones de rayos X, potencial zeta y microscopía electrónica de barrido con sonda de rayos X dispersiva de energía. El rendimiento y los mecanismos de adsorción se estudiaron mediante la dependencia del pH, isothermas de equilibrio, cinética, termodinámica, evaluación de intercambio iónico y desorción. Los resultados muestran buenas capacidades de adsorción para los tres materiales, destacando el BR que presenta ~100 mg/g para la mayoría de los ETR. El proceso de adsorción (100 mg ETR/L) alcanza el 60% en 8 minutos y el equilibrio en 50 minutos, su adsorción es espontánea y exotérmica ($\Delta H < 40$ kJ/mol). El mecanismo de adsorción se basa en la presencia de grupos carboxílicos que inducen interacciones electrostáticas y facilitan la nucleación superficial de microcristales de ETR, junto con un proceso de intercambio iónico y la presencia de otros grupos que contienen oxígeno establecen fuerzas intermoleculares débiles. La recuperación de ETR del adsorbente (~97%) se logra utilizando

EDTA como solución desorbente. Esta investigación indica que los residuos de plátano, especialmente el BR, son una nueva y prometedora biofuente renovable para recuperar ETR con una alta capacidad de adsorción y un costo de procesamiento moderado.

Ponce et al. (2021), compararon los residuos de bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz y cáscara de maíz tratados con alcalinos como adsorbentes lignocelulósicos para colorantes. Los residuos lignocelulósicos del bagazo de caña de azúcar (SCB), cáscara de maíz (CHW) y cáscara de arroz (RHW) fueron evaluados como adsorbentes renovables y de bajo costo para el colorante azul de metileno. Los residuos fueron tratados con una solución de NaOH al $0,10 \text{ mol L}^{-1}$ para eliminar parte del componente polimérico de las fibras y aumentar la adsorción del colorante. Se caracterizaron mediante composición química, SEM, ATR-FTIR, BET, XRD y pHzpc. Los adsorbentes fueron evaluados utilizando el diseño de Box-Behnken completo 2^3 con las variables pH, concentración del colorante y dosis de adsorbente, obteniendo modelos matemáticos descriptivos para el porcentaje de adsorción y las superficies de respuesta. La celulosa, hemicelulosa y lignina fueron los principales constituyentes de los materiales analizados, totalizando entre el 81 y el 91 g/100 g, cuyos grupos lignocelulósicos fueron verificados por ATR-FTIR. Los residuos presentaron un alto porcentaje de adsorción: $95,7 \pm 1,9 \%$ para SCB, $98,5 \pm 1,2 \%$ para CHW y $95,4 \pm 0,8 \%$ para RHW en el punto central del diseño experimental. Por lo tanto, el tratamiento alcalino proporcionó una alternativa interesante para producir adsorbentes eficientes a partir de residuos agroindustriales.

Namdeti et al. (2022) utilizaron hojas secas de *Musa acuminata* como biosorbente para la remoción de azul de metileno en soluciones sintéticas. Se investigaron variables como temperatura, pH, dosis del biosorbente y concentración inicial del colorante, aplicando un diseño compuesto central para optimizar el proceso. Bajo condiciones óptimas ($44,3 \text{ }^\circ\text{C}$, pH 7,1, 0,3 g de dosis y 48,4 mg/L de concentración inicial), se alcanzó un 76,93 % de remoción. El polvo de hoja de plátano presentó una superficie específica de $40 \text{ m}^2/\text{g}$ y un volumen poroso de $0,265 \text{ cm}^3/\text{g}$. Además, las micrografías SEM revelaron cambios en la morfología tras la biosorción. La correlación entre los resultados experimentales y los predichos mediante redes neuronales artificiales validó la precisión del modelo propuesto.

Kokate et al. (2022), analizaron la eliminación adsorbente del plomo (iones), en agua utilizando la escarificadora de tallo de plátano generada en el proceso de extracción de fibras. Se han reportado adsorbentes basados en biomasa lignocelulósica efectivo en la eliminación de metales pesados del agua. De manera destacada, se genera un residuo sólido de biomasa conocido como escarificadora del tallo de plátano (BSS) durante la

extracción de fibras del tallo de plátano (BSF) proveniente de tallos ricos en lignocelulosa de plátano (BS). Aquí, por primera vez, informaron la caracterización del BSS y su efectividad de adsorción del ion plomo (Pb (II)) en agua. Se determinó que la capacidad máxima de adsorción para la reducción de Pb (II) por el BSS es $179,9 \text{ mg g}^{-1}$. El BSS se recicló cinco veces sin pérdida significativa en el rendimiento de adsorción. La adsorción del ion Pb (II) sobre el BSS es exotérmica ($\Delta H = -70,55 \text{ kJ mol}^{-1}$) y espontánea ($\Delta G = -3,52 \text{ kJ mol}^{-1}$ a 303 K), con E_a de $95,95 \text{ kJ mol}^{-1}$. Además, la interacción entre el ion Pb (II) y los grupos funcionales del BSS se confirmó mediante resultados de XPS y FTIR. El contenido relativo de celulosa en el BSS (74,25%) fue mayor que en el BS (57,85%) y el BSF (60,36%). Se propuso que el mayor contenido accesible de celulosa en el BSS contribuye a una mayor adsorción de Pb (II) en comparación con el BS y el BSF. El estudio resalta un tratamiento mecánico de bajo costo y libre de productos químicos de la biomasa, útil para producir adsorbentes efectivos basados en biomasa lignocelulósica para la reducción de iones metálicos.

Rahman et al. (2022) , utilizaron la fibra obtenida del pseudo-tallo de plátano (*Musa acuminata*) (PBF) como un potencial adsorbente natural de bajo costo para la adsorción del colorante azul de metileno (MB) en aguas residuales sintéticas mediante un proceso de adsorción por lotes. Se exploraron diferentes factores de adsorción, como el tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial y la dosis de adsorbente, y se encontró que el proceso de separación depende fuertemente del pH. Además, los datos de adsorción se ajustaron a varios modelos de isotermas de adsorción, como Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin–Radushkevich, para detectar los fenómenos de equilibrio de adsorción. Se examinó la cinética de reacción utilizando modelos cinéticos de pseudo-primer orden y segundo orden. Los análisis de transferencia de masa e intradifusión de partículas indican el mecanismo de adsorción del sistema descrito en el contexto particular. Además, se llevaron a cabo microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para obtener la morfología y las propiedades superficiales del adsorbente, respectivamente. Como resultado, la fibra de plátano preparada puede considerarse como un adsorbente adecuado y económico para separar colorantes de las aguas residuales industriales.

Badanayak et al. (2023) señalaron que los pseudotallos de banano se han convertido en una materia prima sostenible con un amplio potencial de aplicaciones. La investigación en torno a este subproducto agrícola ha aumentado significativamente, enfocándose en la extracción, caracterización, modificación y aprovechamiento de la fibra del pseudotallo. La extracción mecánica se considera más eficiente que la manual, y los

tratamientos superficiales permiten adaptar las fibras a usos específicos. Gracias a su elevado contenido de celulosa, resistencia de buena a moderada, finura y favorable relación longitud-diámetro, esta fibra se emplea actualmente en la producción de celulosa nano y microcristalina, carbón activado, materiales compuestos y textiles técnicos, lo que evidencia su versatilidad como recurso lignocelulósico.

Farias et al. (2023) evaluaron el uso de polvo de cáscara de plátano como biosorbente para la eliminación de contaminantes en aguas residuales, destacando su capacidad para remover eficientemente azul de metileno, atrazina y glifosato. Los autores identificaron varios grupos funcionales activos en la superficie del biosorbente, así como una estructura microporosa con partículas micrométricas aglomeradas. Se logró una eliminación del 66 % de azul de metileno en 60 minutos, con una capacidad de adsorción cercana a 33 mg/g. Asimismo, el biosorbente logró remover entre el 91 % y 97 % de los pesticidas en 120 minutos. Los mecanismos de sorción involucraron difusión de película, quimisorción y modelos cinéticos distintos según el contaminante, confirmando su potencial como alternativa económica y ecológica para el tratamiento de aguas.

Al-Asadi et al. (2025) estudiaron la eficacia del carbón activado obtenido a partir de semillas de frutas comestibles desechadas en la remoción de azul de metileno (AM) en aguas residuales. La adsorción, considerada una de las técnicas más eficientes para la eliminación de contaminantes, fue evaluada utilizando adsorbentes tratados y sin tratar derivados de estos biorresiduos, cuya popularidad ha aumentado debido a su bajo costo, alto contenido de biocelulosa y amplia disponibilidad. Los materiales fueron caracterizados mediante técnicas como FTIR, BET, SEM y análisis termogravimétrico (TG), y se estableció la relación entre el pH de la solución de AM y el punto de carga cero (pHpzc) de los adsorbentes. Además, se analizaron modelos isotérmicos, cinéticos y parámetros termodinámicos para comprender el mecanismo de adsorción, evidenciando una fuerte influencia del área superficial y el pH. El estudio concluye que las semillas de frutas pueden representar una alternativa económica y sostenible al carbón activado comercial para la eliminación eficiente de contaminantes a gran escala en sistemas acuáticos

2.1.2. Nacionales

Vejarano et al. (2018), evaluaron la eficacia de la biomasa de cáscara de plátano en la remoción de plomo (Pb) de aguas contaminadas, explorando variables como el tamaño de partícula de la biomasa y el tiempo de contacto. Los resultados más significativos se

obtuvieron utilizando biomasa con un tamaño de partícula correspondiente al tamiz de malla #60, alcanzando una remoción de plomo superior al 98% tras 30 minutos de contacto. Estos hallazgos destacan la capacidad de la cáscara de plátano, con un tratamiento mínimo, para actuar como un adsorbente eficiente en el tratamiento de aguas contaminadas por plomo. Este descubrimiento abre nuevas posibilidades para el uso sostenible de subproductos agrícolas en la descontaminación del agua, alineándose con prácticas ambientales más responsables y económicamente viables.

Quispe (2021), utilizó la cáscara de plátano como material adsorbente en la remoción de fosfato en solución acuosa, en investigaciones recientes, se ha explorado el uso de residuos de la industria de snacks de plátano, específicamente cáscaras de la variedad Bellaco, como una fuente sostenible para la producción de adsorbentes. Este estudio se centró en evaluar la eficacia de los adsorbentes obtenidos a partir de estas cáscaras de plátano en la remoción de fosfatos en soluciones acuosas, un aspecto crucial para abordar problemas ambientales como la eutrofización de cuerpos de agua. Las cáscaras fueron sometidas a procesos de carbonización a diferentes temperaturas (500 °C, 600 °C y 700 °C), dando lugar a tres tipos de adsorbentes (P500, P600 y P700). Los experimentos de adsorción se realizaron en soluciones con concentraciones de fosfato de 0,3 mg/L a diferentes niveles de pH (4.0, 7.0, 10.0). Los resultados mostraron que los adsorbentes eran más eficaces en la remoción de fosfatos a pH neutro y alcalino (7 y 10), con una capacidad de remoción particularmente alta en el tratamiento P500 a pH 10. Sin embargo, a pH ácido (4.0) se observó una liberación de fosfatos. Estos hallazgos destacan el potencial de los residuos agroindustriales en aplicaciones de tratamiento de agua, alineándose con principios de sostenibilidad y economía circular.

2.1.3. Locales

Ruvina (2022) evaluó la biomasa deshidratada de macrofungi en la remoción de tinte orgánico extraído del *Dactylopius Coccus* (cochinilla) en un medio acuoso a escala de laboratorio, el hallazgo principal de este estudio es que la biomasa deshidratada de macrofungi es efectiva en la remoción de tintes orgánicos, específicamente los derivados del *Dactylopius coccus* (Cochinilla), en efluentes de la industria textil. La máxima eficiencia de remoción, un 89,43%, se logró en condiciones de pH ácido y con altas concentraciones de tinte y biomasa. Este resultado subraya el potencial de la biomasa de macrofungi como una solución sostenible y eficaz para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintes en la industria textil.

Arteta (2023) analizó la adsorción de Cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. (Var. bellaco) a nivel de laboratorio, esta investigación uso la pectina extraída de la cáscara de *Musa paradisiaca* L. (var. Bellaco), un subproducto de la industria del plátano, como un agente efectivo para la adsorción de cadmio en suelos agrícolas. Este enfoque no solo ofrece una solución viable para mitigar la contaminación por cadmio, un metal pesado nocivo para la agricultura, sino que también valoriza un desecho agrícola, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular. La eficacia de este subproducto de plátano, particularmente en su concentración del 2%, en reducir significativamente la presencia de cadmio en el suelo, estos resultados sugieren que la pectina de cáscara de plátano puede ser una solución viable y eficiente para mitigar la contaminación por cadmio en suelos agrícolas.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Generalidades del plátano

2.2.1.1. Definición

Los plátanos, pertenecientes a la especie *Musa* spp., desempeñan un papel crucial como cultivo esencial, ya que constituyen un alimento nutracéutico valioso para numerosas personas en todo el mundo. Además, se les conoce comúnmente como "súper fruta" debido a la elevada concentración de potasio que poseen, añadiendo así un componente nutricional significativo a su perfil (Dadhaneeya et al., 2023).

2.2.1.2. Taxonomía

Sardos et al. (2016), realizaron la clasificación taxonómica del plátano con Nombre: *Musa paradisiaca*; Clase: Monocotiledónea (herbácea); Orden: Escitamineales. Familia: Musaceae. Género: *Musa*. Familia: *paradisiaca*.

2.2.1.3. Variedades

Los plátanos se clasifican científicamente en grupos de genoma (basados en las contribuciones de genes de dos especies silvestres diploides) y en ploidía. Un genoma (designado A) es de *Musa acuminata* Colla, nativa del oeste de Melanesia y el sudeste asiático, y el otro (B) de *Musa balbisiana* Colla, nativa del sudeste asiático y China. Varios genotipos de plátanos cultivados comestibles son; variantes diploides AA, triploides AAA, AAB o ABB, que se originan de las combinaciones de los genomas A y B (Hamilton et al., 2016).

La variedad bellaco, perteneciente al subgrupo plátano *Musa* AAB, es comúnmente conocida como “Hartón”, clasificada como un tipo de “falso cuerno”. Según Belalcázar (1991), presenta un pseudotallo que puede alcanzar una altura promedio de 3,78 metros y un diámetro de aproximadamente 18 centímetros. Su coloración es verde claro con manchas oscuras, sin presencia de tonalidades rojizas. Los rebrotes son poco numerosos y presentan abundante cera tanto en las vainas como en las hojas. Esta variedad forma hojas funcionales a mayor altura (alrededor de 1,50 metros) en comparación con otros clones. Además, en rebrotes conocidos como “orejones” se observan manchas rojizas. Las hojas adultas muestran un color verde mate en el haz y verde claro en el envés, con presencia de cera. La nervadura central es verde amarillento con ligeras tonalidades rosadas, y el pecíolo, también verde amarillento, presenta bordes rojizos que convergen a lo largo del canal superior.

En términos productivos, indica que esta variedad puede desarrollar de seis a ocho manos, con un promedio de 50 frutos por planta. Cada fruto alcanza longitudes de 30 a 40 centímetros y un peso promedio de 400 gramos en su etapa de madurez comercial. Su cultivo es posible desde el nivel del mar hasta altitudes de 1,320 metros sobre el nivel del mar. Asimismo, el ciclo vegetativo varía según la altitud, con una duración que puede oscilar entre los 11 y 18 meses (Pu et al., 2019).

2.2.1.4. Pseudotallo de plátano

El pseudotallo del plátano no es un tallo verdadero, sino una estructura formada por la compactación de las vainas foliares que envuelven el meristemo apical. En la variedad bellaco (subgrupo *Musa* AAB), comúnmente conocida como “Hartón”, el pseudotallo puede alcanzar una altura promedio de 3,78 metros y un diámetro aproximado de 18 centímetros, su coloración es verde claro con manchas oscuras, sin presencia de tonalidades rojizas (Belalcázar, 1991). El pseudotallo, presente en las plantas de plátano, se asemeja a un tronco y está compuesto por un núcleo central suave rodeado firmemente por hasta 25 vainas de hojas. Estas vainas se despliegan del tallo y se transforman en las características hojas de plátano una vez que han alcanzado la madurez. Inicialmente considerado un residuo agrícola al ser cortado después de la cosecha de la fruta, el pseudotallo de plátano solía ser desechado en el suelo, contribuyendo a la contaminación. Sin embargo, ahora se reconoce como una valiosa materia prima sostenible con diversas aplicaciones (Subagyo & Chafidz, 2020). El pseudotallo de plátano, compuesto principalmente de agua (95-96%), actúa como portador de nutrientes como azúcares fermentables (glucosa, fructosa y sacarosa) y minerales (K, Zn, Mn, Mg, Ca y Na). Destaca como una fuente prometedora de nanocelulosa, que, a pesar de su

infrautilización, contiene una cantidad relativamente alta de celulosa, aproximadamente entre el 31% y el 54% en base seca. Este componente resulta importante en la alimentación mundial, ya que está disponible en grandes cantidades durante todo el año (Badanayak et al., 2023).

2.2.1.5. Usos y beneficios del pseudotallo de plátano

Pseudotallo de plátano, por su riqueza en nutrientes y fibra dietética, se utiliza como verdura, preparación de sopa, escabeche, coagulante natural en el tratamiento de las aguas residuales del refrigerante gastado, fabricación de cartón, productos de fibra, pulpa en industria papelera, biofertilizante, etc. (Chandrakala et al., 2017). El pseudotallo es una fuente potencial de celulosa, para utilizar la celulosa en la industria alimentaria, la celulosa debe convertirse en sus derivados, la conversión de celulosa a carboximetilcelulosa de sodio (CMC) es un ejemplo, el CMC purificada es de color blanco a crema, insípida. El pseudotallo tiene presencia de polifenoles y flavonoides, ácido ferúlico, ácido cinámico, catequina, gingerol, con prometedoras actividades antioxidantes, se ha demostrado que el extracto metanólico del pseudotallo posee importantes propiedades hipolipidémicas y propiedades antihipercolesterolémicas, también exhibieron propiedades antimicrobianas contra bacterias grampositivas y gramnegativas (Chakraborty et al., 2021).

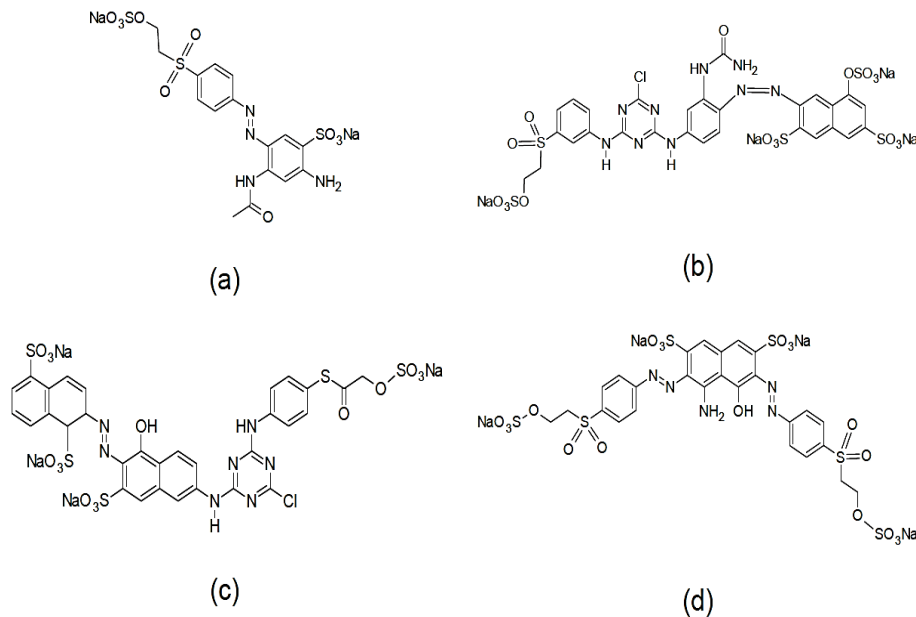
El pseudotallo tierno, que constituye la parte interna del tronco de plátano, no solo es comestible, sino que también posee propiedades medicinales. Además de ser fibroso, este pseudotallo tierno es altamente beneficioso para aquellos que buscan perder peso, ya que es una fuente rica en potasio y vitamina B6, facilitando la producción de insulina y hemoglobina. Su consumo regular, al menos una vez a la semana, contribuye a mantener la presión arterial bajo control y equilibra los niveles de líquidos en el cuerpo. Además, actúa como diurético, favoreciendo la desintoxicación del organismo (Rajesh, 2017). El núcleo del pseudotallo se considera beneficioso para trastornos estomacales y la diabetes, mientras que su extracto se ha reconocido por su utilidad en la disolución de piedras en el riñón y la vejiga urinaria. Este pseudotallo, por tanto, no solo es una fuente sostenible y versátil, sino que también aporta beneficios significativos para la salud, siendo una opción valiosa en la dieta y la medicina natural (Badanayak et al., 2023).

2.2.2. Contaminación del agua

Las aguas residuales son portadoras de diversas sustancias contaminantes, siendo prioritario considerar aquellas que, incluso en concentraciones mínimas, representan riesgos significativos para la salud, como los compuestos disruptores endocrinos, según autores destacados (Gil et al., 2012). Los contaminantes orgánicos, principalmente ácidos

carboxílicos y sulfónicos, aumentan la demanda bioquímica y química de oxígeno, agotando el oxígeno en el agua y amenazando la vida acuática (Pan et al., 2002).

La contaminación del agua por colorantes y tintes, provenientes de industrias textiles, papel, cosméticos y alimentos, es una preocupación ambiental relevante. Aun en concentraciones mínimas, estos colorantes afectan estética y ecológicamente los ecosistemas acuáticos. La industria textil, principal consumidora de agua, carece de regulación actualizada para la descarga de efluentes, emitiendo toneladas de tintes no utilizados anualmente en las aguas residuales (Valladares-Cisneros et al., 2017).



Fuente: Valladares-Cisneros et al. (2017)

Figura 1. Estructuras químicas de algunos colorantes azoicos, (a) Naranja reactivo 107, (b) Amarillo reactivo 145, (c) Naranja reactivo 122, (d) Negro reactivo 5.

La presencia de colorantes en el agua, incluso en pequeñas cantidades, es fácilmente detectable y no deseada. Estos colorantes se clasifican según su estructura química en tres tipos principales: catiónicos, aniónicos y no iónicos. El Índice Internacional del Color (CI) agrupa los colorantes en varias categorías, incluyendo ácidos, básicos, directos, dispersos, fluorescentes, para cuero, mordientes, pigmentos, reactivos, azufrados y de cuba. Un aspecto clave en esta clasificación es el cromóforo, el grupo funcional que otorga color a la molécula. El CI utiliza el cromóforo para clasificar los colorantes en diversas clases como azoicos, nitrosos, nitro, antraquinona, triarilmetano, metino, azina, oxacina, índigo, ftalocianina, estilbeno, xanteno, acridina, quinolina, triazol y tintes de complejos metálicos (Ventura-camargo & Marin-morales, 2013).

2.2.3. Adsorbentes

Un adsorbente es un material sólido capaz de atraer y retener en su superficie determinadas sustancias presentes en una fase líquida o gaseosa, mediante interacciones físicas o químicas. Su eficacia depende de propiedades como la porosidad, el área superficial específica y la presencia de sitios activos de adsorción. En el tratamiento de aguas contaminadas, estos materiales permiten la remoción selectiva de compuestos no deseados al fijarlos en su superficie. Se consideran eficientes aquellos adsorbentes que logran una alta capacidad de retención y una rápida cinética de adsorción, alcanzando el equilibrio en tiempos reducidos (Valladares-Cisneros et al., 2017).

2.2.3.1. Tipos de adsorbentes

La adsorción, un fenómeno clave en interacciones superficiales, se divide en dos categorías principales con características distintivas. En primer lugar, la adsorción física, también conocida como fisisorción, se caracteriza por relaciones adsorbato-adsorbente fácilmente rompibles. Las fuerzas predominantes en este tipo de adsorción son del tipo Van der Waals o fuerzas de dispersión, como dipolo-dipolo e ion-dipolo. Estas fuerzas son comparables a las involucradas en la cohesión durante la condensación de vapores a líquidos. Es importante destacar que el calor de adsorción asociado a este fenómeno es relativamente bajo, alrededor de 20 [kJ/mol]. Este tipo de adsorción exhibe un bajo grado de especificidad, ya que las moléculas de adsorbato y adsorbente conservan sus propiedades físico-químicas sin compartir ni trasladar electrones (Quispe, 2021).

Por otro lado, la adsorción química, también llamada quimisorción, implica la compartición de electrones entre las partículas del adsorbato y la superficie del adsorbente, generando una reacción química. Este tipo de adsorción es altamente específico y conduce a la formación de enlaces químicos entre el adsorbato y el adsorbente, resultando en un proceso irreversible. La energía de adsorción asociada a respuestas químicas alcanza niveles más significativos, aproximadamente 200 [kJ/mol]. Esta distinción entre adsorción física y química es esencial para comprender las propiedades únicas y las dinámicas involucradas en estos procesos (De Gisi et al., 2016).

2.2.3.2. Características de material adsorbente

La eficiencia del proceso de adsorción depende significativamente de las características del material adsorbente. Estas incluyen aspectos como el tamaño de las partículas, área superficial, porosidad, las propiedades físico-químicas y

térmicas de la superficie, así como la presencia de grupos funcionales y la composición elemental. El pH de la superficie del material también juega un rol importante. Los adsorbentes no convencionales, especialmente aquellos con una porosidad adecuada, son eficaces en la captura o retención de moléculas, átomos o iones (Nethaji et al., 2013).

Especialmente notables son los materiales adsorbentes derivados de fuentes naturales, como tejidos vegetales (tallos, hojas, cáscaras, semillas, raíces, etc.). La estructura química de estos tejidos exhibe cavidades y poros que posibilitan la retención de moléculas pequeñas, como metales, hasta moléculas más complejas como los colorantes. La naturaleza polimérica de estas estructuras vegetales facilita las interacciones favorables entre los pares de electrones libres de las especies (adsorbente y adsorbato). Por esta razón, los materiales naturales se presentan como opciones altamente atractivas para aplicaciones en la remoción de contaminantes en el agua, como señala la referencia. Este enfoque destaca la eficacia potencial de los adsorbentes naturales en la purificación del agua, aprovechando las características únicas de sus estructuras químicas y su capacidad para interactuar de manera beneficiosa con las sustancias contaminantes (De Gisi et al., 2016; Valladares-Cisneros et al., 2017).

2.2.4. Técnicas analíticas para caracterización del material adsorbente

Con el propósito de determinar el tipo de adsorción que experimentará el material, se deben llevar a cabo análisis que evidencien las condiciones de equilibrio en relación con la temperatura y la cantidad expuesta del material además de la caracterización del material, estos análisis se realizan a través de la superficie del sólido, como la morfología por microscopía electrónica de barrido (SEM), la difracción de rayos X. Respecto a la composición polimérica las técnicas de espectroscopía de infrarrojo (FTIR) y el análisis térmico como la termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (DSC), otorgan mejor comprensión de los polímeros responsables de la adsorción (Toapanta, 2017).

2.2.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Esta técnica permite observar la morfología superficial del material a una escala microscópica. Proporciona información detallada sobre la estructura, porosidad y distribución de partículas en la superficie del sólido. El empleo de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en el análisis de adsorbentes, como aquellos derivados de fibras vegetales como el plátano, es esencial para la caracterización detallada de la morfología superficial y la estructura interna de estos materiales a escala microscópica. Los estudios realizados por Kalita et al. (2019), han demostrado que el SEM permite observar cómo la

morfología de las fibras de plátano varía según el método de extracción, destacando la diferencia entre las superficies rugosas de las fibras crudas y las superficies lisas producidas por el desgomado químico. Además, Neelamana et al. (2013) han utilizado el SEM para investigar la estructura de fibras de plátano sintetizadas a diferentes escalas (macro, micro, nano) mediante explosión de vapor, identificando una estructura multifibrilar con nano fibras de aproximadamente 30 nm de diámetro. Estos estudios son fundamentales para comprender y optimizar el diseño de adsorbentes eficaces para la adsorción de contaminantes, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías ambientales más sostenibles, como lo discuten Chokshi et al. (2022) al señalar la importancia de factores como el ángulo microfibrilar y la cristalinidad en las propiedades de las fibras de plátano.

2.2.4.2. Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de rayos X es una técnica utilizada para determinar la estructura cristalina de un material, proporcionando información detallada sobre la fase cristalina, la composición mineral y la organización atómica en la red cristalina del adsorbente. La fibra de plátano, siendo lignocelulósica, exhibe tanto regiones amorfas como ordenadas (cristalinas). Mediante análisis de difracción de rayos X (XRD), se ha observado un pico agudo a 22.0° que corresponde a la región ordenada/cristalina del material (Guimarães et al. 2009). Estudios indican que la fibra de plátano es aproximadamente 62–65% cristalina y 35–40% amorfa (Madhushani et al. 2022), similar al jute (58:42), pero menor que el ramio (63:37) y el algodón (71:29). Kiruthika & Veluraja (2009) han observado variaciones en la orientación cristalina y el tamaño de cristalito entre variedades de fibra de plátano, subrayando la importancia de identificar variedades específicas para usos selectivos. Tratamientos químicos como el desgomado alcalino y el blanqueo pueden mejorar la cristalinidad al eliminar componentes no cristalinos como pectinas, hemicelulosas y lignina (Taer et al. 2020). Además, la selección cuidadosa de productos químicos para el tratamiento superficial también influye en la cristalinidad de la fibra de plátano (Bar et al. 2022). Este conocimiento es crucial para comprender las propiedades de adsorción del material y optimizar el diseño de materiales adsorbentes efectivos.

2.2.4.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionales presentes en un material mediante la medición de la absorción de radiación infrarroja por los enlaces moleculares. Esta técnica permite caracterizar cualitativa y, en algunos

casos, cuantitativamente la estructura química superficial de los adsorbentes. Permite identificar enlaces químicos específicos y caracterizar la composición polimérica del material. El análisis FTIR revela una variedad de bandas características en el espectro de la fibra, proporcionando información detallada sobre su estructura molecular. Por ejemplo, se observa una banda ancha cerca de 3335 cm^{-1} debido a la presencia del grupo $-\text{OH}$ de agua absorbida, y una pequeña banda a 2900 cm^{-1} que indica la presencia de estiramientos C-H en alcanos. La vibración de estiramiento conjugado de $>\text{CO}$ de grupos éster y aldehído en hemicelulosas y lignina se evidencia alrededor de 1740 cm^{-1} . Otras bandas notables incluyen la vibración de estiramiento $\text{C}=\text{O}$ en el carbonilo conjugado de la lignina cerca de 1650 cm^{-1} , el estiramiento simétrico $\text{C}=\text{C}$ aromático de la lignina a 1314 cm^{-1} , y la deformación fuera de plano C-H de la lignina a 832 cm^{-1} . Estas observaciones, junto con otras bandas identificadas en el rango de $2000\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ que reflejan enlaces aromáticos y funcionales, permiten una caracterización detallada de la composición química de la fibra de plátano mediante FTIR (Kalita et al. 2019; Bar et al. 2022; Rahman et al. 2022). Este análisis proporciona información valiosa sobre la estructura molecular de la fibra de plátano, fundamental para comprender sus propiedades y aplicaciones en diversos campos. La FTIR se emplea ampliamente en la caracterización de fibra de plátano para estudiar la incorporación de monómeros y verificar la presencia de grupos funcionales específicos. Por ejemplo, Ramirez et al. (2016) utilizaron FTIR para evaluar la absorción de metales biodisponibles en aguas intersticiales, observando un desplazamiento en la banda del grupo carbonilo indicativo de interacciones entre los contaminantes y la matriz del polímero, esta aplicación de FTIR ofrece perspectivas valiosas para comprender las propiedades y aplicaciones de la fibra de plátano en diversos contextos, incluido el tratamiento de aguas contaminadas.

2.2.4.4. Análisis Térmico

La termogravimetría (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC) son técnicas utilizadas para estudiar las propiedades térmicas de un material. La TGA determina la pérdida de peso en función de la temperatura, lo que puede indicar la estabilidad térmica y la descomposición del material. El DSC mide los cambios en el calor específico del material en función de la temperatura, lo que proporciona información sobre transiciones térmicas como la fusión, cristalización y reacciones endotérmicas/exotérmicas (Pielichowska and Nowicka 2019).

El uso de técnicas como la termogravimetría (TGA) permite estudiar la descomposición térmica de la fibra de plátano y proporcionar información sobre las

temperaturas y etapas de degradación. Por ejemplo, se pueden identificar las temperaturas en las que se producen la desorción de humedad, la descomposición de componentes orgánicos y la oxidación. Estos datos son fundamentales para determinar la temperatura óptima de funcionamiento del adsorbente y su estabilidad térmica bajo condiciones específicas de aplicación (Chapi 2023). El estudio termogravimétrico de la fibra de plátano reveló resultados significativos. Por ejemplo, se observó que la fibra experimenta una pérdida de masa gradual en diferentes etapas de descomposición térmica. La primera etapa, que ocurrió entre 21 y 107°C, mostró una pérdida modesta de aproximadamente el 14%, atribuible a la desorción de humedad. La segunda etapa, que ocurrió entre 260 y 337°C, resultó en una pérdida de masa más significativa del 74%, asociada con la descomposición de compuestos que contienen grupos hidroxilo y carboxilo. Finalmente, la tercera etapa, entre 310 y 700°C, condujo a una pérdida del 96% de la masa, dejando un 4% como residuo de ceniza. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la estabilidad térmica y la composición de la fibra de plátano, aspectos cruciales para su aplicación como adsorbente (Haque and Mondal 2016; Syafri et al. 2019).

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) se ha empleado de manera efectiva para investigar las propiedades térmicas de la fibra de plátano, un biomaterial lignocelulósico utilizado como adsorbente. Los estudios de Guimarães et al. (2009) y Kiruthika & Veluraja (2009), han identificado cambios significativos durante la descomposición térmica de la celulosa en la fibra de plátano, evidenciados por un pico distintivo alrededor de 300 °C en las curvas de DSC. Este comportamiento térmico es crucial para comprender la estabilidad y las propiedades de degradación de la fibra de plátano, lo que impacta directamente en su idoneidad como adsorbente en aplicaciones ambientales. La información obtenida del DSC proporciona una visión detallada de los procesos de descomposición y permite evaluar la resistencia térmica de la fibra de plátano para su uso práctico en la remoción de contaminantes (Ramirez et al. 2016; Madhushani et al. 2022).

2.2.5. Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)

Es un conjunto de herramientas estadísticas y matemáticas empleadas para modelar, analizar y optimizar procesos en los que una variable de respuesta de interés se ve influenciada por varios factores independientes. Su objetivo principal es encontrar las condiciones óptimas que permitan maximizar o minimizar dicha respuesta, a partir del ajuste de modelos empíricos, usualmente polinómicos (Montgomery, 2017).

En el campo del tratamiento de aguas residuales, la MSR ha demostrado ser una herramienta altamente eficiente para optimizar procesos de adsorción. Se emplea para evaluar cómo diferentes factores como el pH de la solución, tiempo de contacto, concentración inicial del contaminante, dosificación del adsorbente y temperatura que afecten la capacidad de remoción de contaminantes específicos, tales como metales pesados (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+}), colorantes, pesticidas o compuestos orgánicos emergentes. El uso de la MSR permite reducir el número de experimentos necesarios mediante un diseño estructurado y controlado, mejorando la eficiencia experimental. Además, posibilita el análisis del efecto combinado de las variables, lo cual es especialmente útil en sistemas donde los factores presentan interacciones significativas. A través del análisis estadístico (ANOVA), es posible validar el modelo ajustado, determinar su significancia y precisión predictiva (Faridzuan et al. 2020).

2.2.5.1. Modelos en RSM

Los modelos utilizados en RSM suelen ser de tipo polinómico, especialmente de segundo orden, por su capacidad para capturar la curvatura del sistema. El modelo cuadrático general para una respuesta Y influenciada por k factores X_1, X_2, \dots, X_k se expresa en la Ecuación (1).

$$Y = \beta_0 + \sum(\beta_i X_i) + \sum(\beta_{ii} X_i^2) + \sum(\beta_{ij} X_i X_j) + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

- β_0 es el intercepto o término constante,
- β_i representa los efectos lineales,
- β_{ii} los efectos cuadráticos,
- β_{ij} los efectos de interacción entre factores, y
- ε es el error aleatorio.

2.2.5.2. Diseño Box-Behnken

El diseño Box-Behnken, desarrollado por George E. P. Box y Donald Behnken (1960), es uno de los diseños experimentales más utilizados dentro de la Metodología de Superficie de Respuesta para el ajuste de modelos cuadráticos. Este diseño se caracteriza por no incluir combinaciones donde todos los factores estén en sus niveles extremos simultáneamente, lo cual lo convierte en una alternativa segura y eficiente cuando se busca evitar condiciones operativas extremas que podrían ser costosas, peligrosas o inestables.

El diseño Box-Behnken está compuesto por puntos centrales, los cuales se repiten para estimar el error puro y evaluar la curvatura del sistema y puntos intermedios, ubicados en el centro de las aristas de cada cara del hipercubo experimental. Este

diseño es rotacional, lo cual garantiza que la varianza de la predicción sea constante a una distancia equidistante del centro del diseño. El número total de experimentos necesarios en un diseño Box-Behnken para k factores se calcula mediante la Ecuación (2).

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (2)$$

Donde:

- k es el número de factores,
- C_0 es el número de repeticiones en el punto central.

Por ejemplo, para un sistema con tres factores, se requieren 12 puntos factoriales más al menos 3 repeticiones en el punto central, totalizando 15 corridas experimentales.

En los últimos años, el diseño Box-Behnken ha sido ampliamente aplicado en estudios relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante adsorción. Investigaciones recientes lo han utilizado para optimizar la remoción de colorantes, metales pesados, compuestos orgánicos y fármacos presentes en efluentes industriales y domésticos. Los factores comúnmente evaluados incluyen el pH, tiempo de contacto, dosificación del adsorbente, concentración inicial del contaminante y temperatura (Sukmana et al. 2023).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio central de investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, situado en Tingo María, en el distrito de Rupa Rupa, de la provincia de Leoncio Prado - Huánuco, Perú. Este lugar se encuentra a una altura de 669 metros sobre el nivel del mar y está localizado a $09^{\circ} 17' 08''$ de latitud sur y $75^{\circ} 59' 52''$ de longitud oeste.

3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio

- Ciudad : Tingo María.
- Distrito : Rupa Rupa.
- Provincia : Leoncio Prado.
- Departamento : Huánuco.

3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

- Ciudad : Tingo María
- Norte : 8997993
- Este : 383988
- Altitud : 669 msnm.



Figura 2. Ubicación política de la zona en estudio.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materia prima

Los pseudotallos de los plátanos (*Musa paradisiaca*) serán procedentes del CIPTALD (Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria), que está ubicado en el km. 26 de la carretera Marginal Tingo María - Aucayacu, situada geográficamente en las coordenadas 9°51" de longitud sur y 75°00" de longitud en el departamento de Huánuco (Perú).

3.2.2. Material de campo

Libreta de campo, botas, guantes, gorras, machete, cooler, marcador, cadena de custodia, protector solar.

Materiales de laboratorio

Los materiales usados en el laboratorio para el análisis son: Embudo, papel filtro, cuchillo, placas Petri, Matraces Erlenmeyer, Pipetas, piseta, crisol alúmina de 75 µL, vasos de precipitado de 50, 100, 500 y 1000mL, cubetas de poliestireno de 2,5 mL, papel suave, guantes, mascarilla, guardapolvo y gorro de cirujano.

3.2.3. Equipos

Centrifuga (Hettich, Mikro 22R, Alemania); baño María (Memmert, WNB 22, Alemania); vortex (Genie 2 SI-0256, Scientific Industries, USA); balanza Analítica (RADWAG, AS 220R, Polonia); calorímetro (Setaram, Lasys evo, USA); estufa (MMM group, modelo EC 222 ECO, Alemania); espectrofotómetro (Thermo Scientific™, Genesis 150, USA); refrigerador-congelador (LG modelo GR-GR-S392QLC, Corea); espectrómetro FTIR (Lumex, FT-08, Rusia); Microscopio óptico (Leica, DM500, Suiza).

3.2.4. Insumos

Entre los insumos para la presente investigación se usaron: Azul de metileno (C₁₆H₁₈ClN₃S, Merck), Metabisulfato de potasio (KMS) al 0,2%, hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N, ácido clorhídrico (HCl) 0,1N, ácido sulfúrico al 96%, NaCl a 0,1M, ácido acético glacial 98% y agua destilada.

3.2.5. Softwares usados

Para el procesamiento de datos y elaboración del informe final de la investigación se necesitaron los softwares que se emplearon en la fase de gabinete son: Calisto,

Leica lab, Microsoft Excel, ArcGIS 10.2.1, SPSS estudiantil y Microsoft Word.

3.3. Criterio y análisis de estudio

3.3.1. Nivel de investigación

La investigación es de nivel aplicativo, dado que busca generar conocimiento con aplicación directa a un problema del entorno: la remoción del azul de metileno de soluciones acuosas utilizando pseudotallo de plátano como adsorbente. Esta elección responde a la necesidad de abordar la contaminación por colorantes en cuerpos de agua, una preocupación creciente por sus efectos adversos en organismos acuáticos y humanos (Haro et al. 2024). Además, el uso de residuos agrícolas, como el pseudotallo, aporta una solución sustentable de bajo costo y fácil disponibilidad.

3.3.2. Tipo de investigación

El estudio es de tipo experimental, ya que se manipula la variable independiente (condiciones del adsorbente de pseudotallo) para observar su efecto sobre la variable dependiente (eficiencia de remoción del azul de metileno). Según (Guevara et al. 2020), este enfoque permite analizar cuantitativamente los mecanismos de interacción entre factores y su efecto de los adsorbentes de origen vegetal y los contaminantes presentes en soluciones acuosas.

3.3.3. Método de investigación

El método experimental incluye la intervención directa del investigador en el sistema de estudio, al controlar variables como el pH, la dosis del adsorbente, la concentración inicial del contaminante y el tiempo de contacto. Esta metodología fue aplicada por Rahman et al. (2022), quienes emplearon materiales lignocelulósicos similares y reportaron altas eficiencias de adsorción frente a colorantes industriales bajo condiciones optimizadas.

3.3.4. Operacionalización de variables

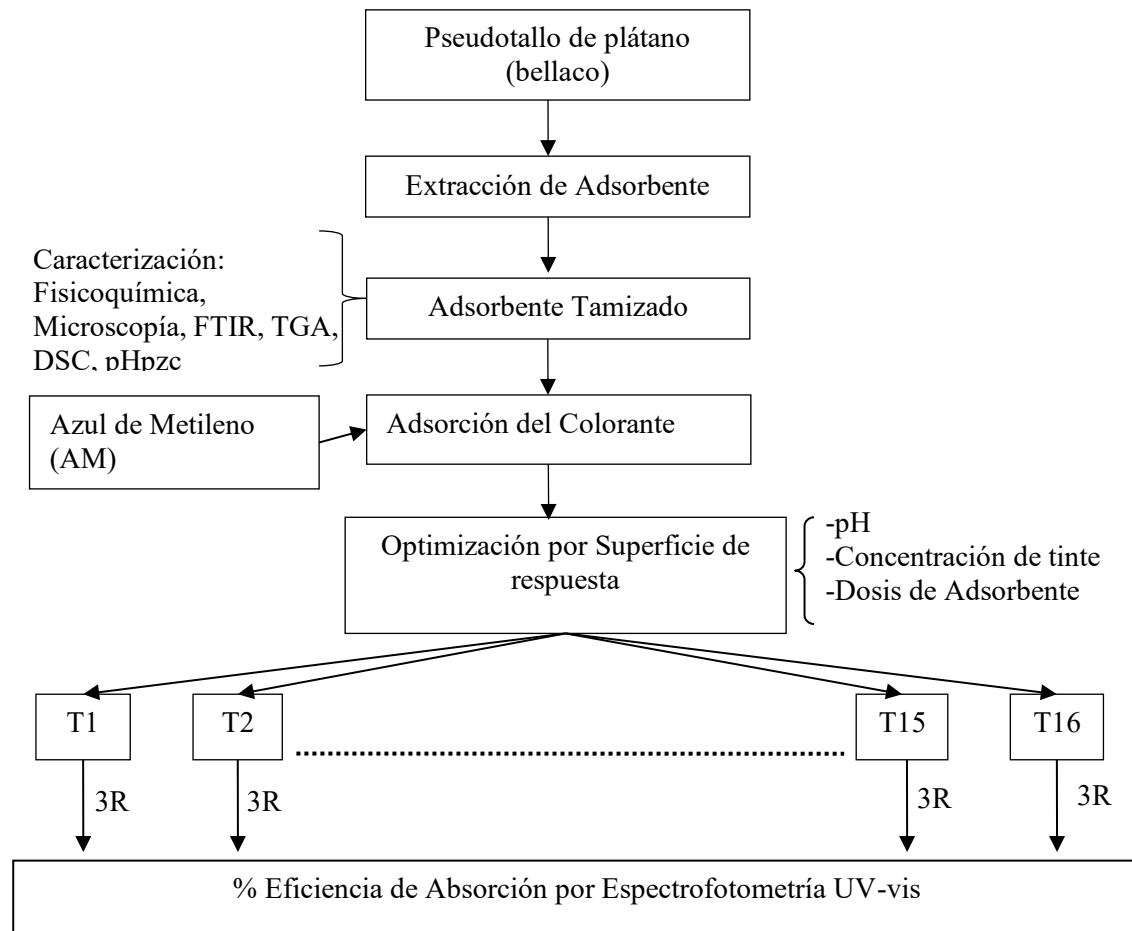
Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Tipo de escala
X: Adsorbente del pseudotallo de plátano	Caracterización morfológica	Tamaño de partícula, microestructura (SEM)	μm, imágenes de SEM	Racional / Nominal
		pH del punto de carga cero (pH _{Zpc})	Unidades de pH	Racional
	Caracterización fisicoquímica	Grupos funcionales (FTIR)	cm ⁻¹	Nominal
		Estabilidad térmica (TGA)	% pérdida de masa vs. °C	Racional
		Transiciones térmicas (DSC)	Temperatura (°C), ΔH (J/g)	Racional
Y: Azul de metileno en solución acuosa	Proceso de adsorción	Concentración inicial y final del colorante	mg/L	Racional
		% de remoción	%	Racional
	Proceso de desorción	Porcentaje de desorción, ciclos de regeneración	%, número de ciclos	Racional

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Diseño de investigación

El presente trabajo de investigación fue experimental, con categoría de diseño transversal o transeccional. En la Figura 3, se detalla el diseño experimental para la optimización del proceso de adsorción del colorante usando la técnica de superficie de respuesta.



Donde: T1, T2, ...T15, T16: tratamientos de adsorción del AM; R1, R2 y R3: Repeticiones.

Figura 3. Diseño experimental de la optimización del adsorbente extraído de pseudotallo de plátano (Bellaco).

3.3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La presente investigación empleó la técnica de muestreo de material orgánico y su instrumento será la cadena de custodia. También usaron como técnica de recolección de datos a la observación experimental, ya que evaluaron a la variable independiente (pseudotallo de plátano como adsorbente) en la remoción de la variable dependiente (soluciones acuosas con azul de metileno) y el instrumento para la recolección son el cuaderno de notas para el registro de la observación y los hechos, la cámara fotográfica, filmadora y el software de apoyo excel.

3.3.7. Análisis de datos

Para el análisis de datos estadístico y la generación del modelo matemático de superficie respuesta se utilizaron la siguiente ecuación polinómica de segundo orden para ajustar los datos experimentales y determinar los términos relevantes del modelo utilizando la Ecuación (3).

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

Donde y denotará la respuesta predicha (% Eficiencia de adsorción del colorante), β_0 será el coeficiente constante, β_i será el coeficiente lineal del factor de entrada X_i , β_{ii} será el coeficiente cuadrático del factor de entrada X_i y β_{ij} será el coeficiente de interacción lineal entre los factores de entrada X_i y X_j . Para analizar la adecuación de los modelos propuestos, se realizará un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la idoneidad de las funciones de respuesta y la significancia de los efectos de las variables independientes. El coeficiente de determinación (R^2), el nivel de significancia de cada término (P -value) y la superficie de contorno, serán calculadas utilizando el software Statistica v.13 (StatSoft Inc, Tulsa, OK, USA).

3.4. Metodología Experimental

3.4.1. Caracterización del adsorbente de pseudotallo de *M. Paradisiaca* (Bellaco).

Identificación del área de muestreo: Se realizaron una visita previa al CIPTALD (Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria); verificaron y observaron las plantaciones de plátano y su diversidad en especies. El muestreo del pseudotallo se extrajo de la variedad bellaco y fue definido como distribución aleatoria simple.

Toma de muestras del pseudotallo de plátano: La metodología para el muestreo del material orgánico consistió en fraccionar una plantación de plátano, seleccionando solo la parte del pseudotallo del plátano. Para obtener una muestra compuesta y representativa del Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria se selecciona 5 Kg de pseudotallo de plátano para obtener 600 gr de adsorbente granular. El punto de muestreo fue georreferenciado con sus coordenadas UTM en Datum WGS84.

Preparación del adsorbente extraído del pseudotallo de plátano: Se emplearon la metodología de Rahman et al. (2022), siguiendo el flujograma de la Figura 4. Los pseudotallos de plátano fueron lavados con agua destilada para separar la suciedad y las partes no deseadas. Posteriormente, los tallos limpios se cortaron en pequeños trozos y lavaron

nuevamente con agua destilada. A continuación, los trozos de tallo de plátano se sumergieron durante 40 minutos en una solución al 10% de HCl y se mezclaron utilizando un procesador de alimentos. La fibra lo separaron, mediante un filtrado de mezcla de fibra de plátano. La fibra de plátano filtrada se lavó varias veces con agua destilada y se secaron a una temperatura específica de 50 °C durante 36 horas. La fibra seca se trituró y separaron partículas finas de 300-500 μm utilizando un tamiz (N°50 y N°30), 600 gr de adsorben granular obtenido del pseudotallo de plátano se almacenó en un recipiente hermético.

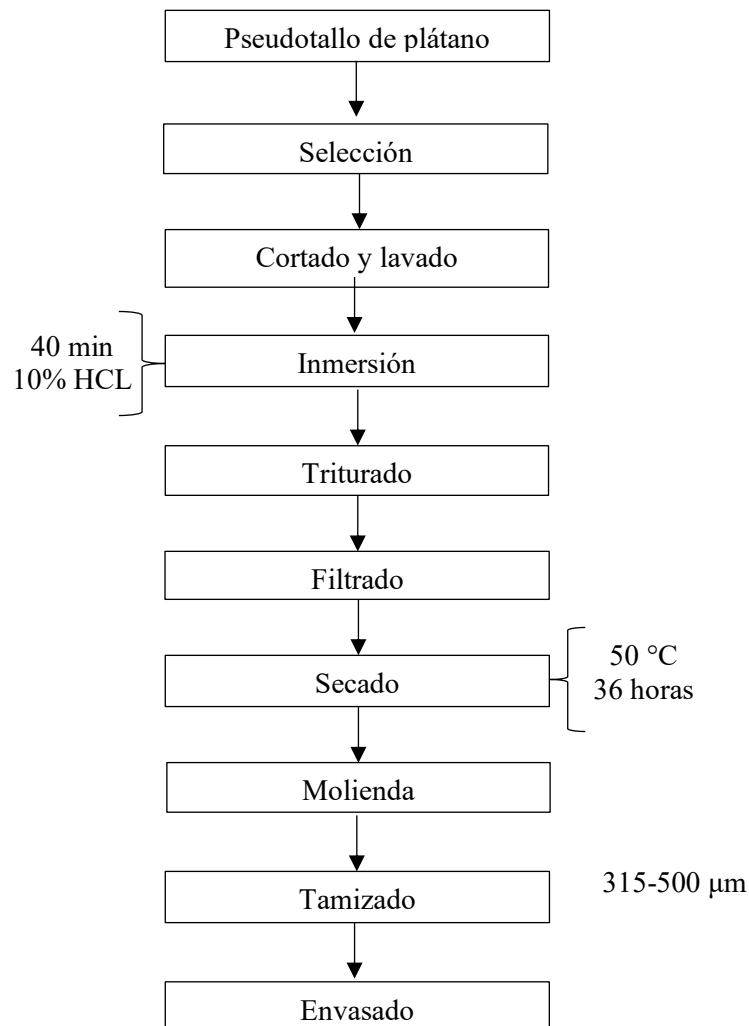


Figura 4. Flujograma para la obtención del adsorbente del pseudotallo de plátano (bellaco)

Se utilizaron la muestra de pseudotallo de plátano del Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria para determinar sus propiedades químicas, físicas y morfológicas.

Análisis fisicoquímico del pseudotallo de plátano.

El análisis del pH se realizó mediante la maceración de 10 gramos del material extraído del pseudotallo, lo que permitió introducir adecuadamente el sensor del potenciómetro para la medición. El contenido de humedad, se utilizó una muestra del material particulado, la cual fue colocada en una estufa a temperatura constante de 105 °C durante un periodo de 24 horas, transcurrido este tiempo, la muestra fue enfriada y posteriormente pesada, calculándose el contenido de masa seca por diferencia con respecto al valor inicial registrado antes del secado.

La capacidad de retención de agua (CRA), se tomó una muestra representativa del pseudotallo de plátano, previamente limpia y secada a temperatura ambiente. La muestra se sumergió en agua destilada durante 24 horas para asegurar su saturación completa. Posteriormente, se retiraron la muestra del agua y dejó escurrir en una malla durante 10 minutos. Se pesó la muestra saturada para obtener el peso húmedo y fue secado en una estufa a 105 °C hasta alcanzar un peso constante, obteniendo así el peso seco. La CRA se calculó mediante la Ecuación (4), citada por Liu et al., (2024).

$$CRA(\%) = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

La densidad se midió, pesando la muestra de pseudotallo y llenando una probeta con agua hasta un volumen suficiente para introducir la muestra, registrando este volumen inicial. Luego, se sumergió completamente la muestra en la probeta, asegurando que no queden burbujas adheridas al pseudotallo, se registraron el volumen ocupado por el agua y el pseudotallo, y se calcularon el volumen final del pseudotallo restando el volumen inicial del agua del volumen total. Finalmente, se hallará la densidad dividiendo el peso del pseudotallo por su volumen final.

Identificación de grupos funcionales por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) del pseudotallo de plátano.

Las muestras fueron preparadas adecuadamente y analizadas en un rango espectral comprendido entre 450 cm⁻¹ y 4000 cm⁻¹, con una resolución de 4 cm⁻¹. Los espectros FTIR fueron registrados y posteriormente analizados, identificando los picos característicos que correspondían a los distintos grupos funcionales presentes en la muestra. Estos picos fueron comparados con bases de datos y referencias especializadas con el fin de lograr una identificación precisa de los componentes químicos (Šehović et al., 2022).

Morfología y distribución granulométrica del pseudotallo de plátano.

Imágenes de la morfología fueron realizadas con un microscopio óptico, utilizando la metodología de Lapo et al. (2020), la muestra seca fue colocada en un portaobjeto y las capturas de las micrografías se registraron con diferentes aumentos ($\times 40$ y $\times 100$). Para la distribución del tamaño de partículas se emplearon la metodología citada por Dussán-sarria et al., (2019) mediante análisis de imagen digital, utilizando el software ImageJ. Las muestras fueron fotografiadas con una cámara de alta resolución bajo condiciones estandarizadas de iluminación y fondo. Las imágenes obtenidas fueron procesadas para convertirlas en escala de grises, aplicando umbrales de segmentación y posteriormente analizadas cada partícula individual mediante la herramienta "Analyze Particles". A partir de este análisis, se determinó el diámetro equivalente de las partículas, permitiendo clasificarlas en distintos rangos de tamaño, generando el histograma de distribución de tamaño.

Análisis térmico del pseudotallo de plátano.

Análisis termogravimétrico (TGA): Se emplearon la metodología de Syafri et al. (2019). Las muestras analizaron en un Calorímetro. Se pesó 10 mg de muestra en un crisol de aluminio y llevo al programa de calentamiento desde $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ con incremento constante de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, se empleó atmosfera de Argón a $60\text{ mL}/\text{min}$ y Oxígeno $16\text{ mL}/\text{min}$ durante el calentamiento. Los Termogramas obtenidos fueron analizados con el software del equipo (Calisto, Setaram, Francia) determinándose la zona de estabilidad térmica y las temperaturas de degradación de los polímeros del adsorbente extraído del tallo de plátano.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC): Las transiciones endotérmicas y exotérmicas de los polímeros constituyentes del pseudotallo de plátano fueron determinados por la metodología de Barrera-Calva et al. (2021), en un crisol de alúmina de $100\text{ }\mu\text{L}$ de capacidad se colocaron 10 mg de muestra y se programó la combustión del material desde $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ a velocidad constante de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, la atmósfera del horno estuvo con flujo de Argón ($60\text{ mL}/\text{min}$) y Oxígeno ($16\text{ mL}/\text{min}$). Los Termogramas DSC fueron analizados obteniéndose las temperaturas de transición y entalpia de combustión de los polímeros del tallo de plátano.

Evaluación del punto de carga cero (pHpzc) del pseudotallo de plátano.

Se utilizó el método reportado por Kokate et al., (2022) prepararon matraces Erlenmeyer, cada uno conteniendo 50 mL de una solución de NaCl al 0,01 N. Los valores iniciales de pH (pH₀) de estas soluciones se ajustaron desde un pH de 2 hasta un pH de 10, añadieron HCl 0,01 N y NaOH 0,01 N según sea necesario. Una vez ajustados los pH₀, se anotaron estos valores y añadieron 0,2 g de pseudotallo de plátano (PTS) a cada matraz. Posteriormente, los matraces se agitaron durante 48 horas. Al término de este período, se midió el pH final (pH_f) en todos los matraces. La diferencia entre los valores de pH iniciales y finales ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_0 - \text{pH}_f$) se graficó como función del pH₀. El punto de carga cero del PTS se identificó como el pH en el que el pH₀ sea igual al pH_f.

3.4.2. Determinación del porcentaje de adsorción del azul de metileno (AM) en las soluciones acuosas utilizando adsorbente del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano).

Se evaluó la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno (AM) en función de distintas condiciones experimentales de pH, dosis del adsorbente y concentración inicial del colorante, siguiendo la metodología descrita por Ponce et al. (2021). Los valores iniciales de pH de las soluciones de azul de metileno fueron ajustados mediante la adición de pequeños volúmenes de HCl o NaOH concentrado, y monitoreados utilizando un medidor de pH previamente calibrado.

La absorbancia inicial (Abs_0) de cada solución de AM se midió a 665 nm empleando un espectrofotómetro UV-Vis. Posteriormente, se prepararon muestras individuales mezclando 10 mL de cada solución de AM con la masa correspondiente del adsorbente en tubos Falcon, los cuales fueron cerrados herméticamente y agitados a 25 °C durante 2 horas a 90 rpm. Al finalizar el tiempo de contacto, las muestras fueron centrifugadas y se registró la absorbancia final (Abs_{seq}) también a 665 nm. Todos los experimentos fueron realizados al menos por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los datos.

El porcentaje de reducción de absorbancia (% Abs), equivalente al porcentaje de adsorción del colorante (% ads), fue calculado y analizado mediante el uso de superficies de respuesta y herramientas estadísticas. Para la optimización del proceso de adsorción, se empleó un diseño experimental tipo Box-Behnken dentro de la metodología de superficie de respuesta (RSM), considerando un total de 16 tratamientos experimentales, con réplicas ($n = 4$) en el punto central. Las variables independientes consideradas fueron el pH, la

concentración de azul de metileno [AM], y la dosis del adsorbente, mientras que la variable de respuesta fue el porcentaje de adsorción del colorante (%). Los tratamientos correspondientes a este diseño experimental se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Optimización por superficie de respuesta

Tratamiento	pH	Dosis de Adsorbente (g/L)	Concentración de tinte (mg/L)
T1	3	10	2
T2	7	10	5
T3	7	15	2
T4	7	5	2
T5	11	10	2
T6	7	5	8
T7	7	10	5
T8	3	10	8
T9	11	5	5
T10	11	15	5
T11	7	10	5
T12	7	10	5
T13	3	15	5
T14	11	10	8
T15	7	15	8
T16	3	5	5

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron análisis estadísticos para evaluar la significancia de los efectos y las interacciones, así como se identificó las condiciones óptimas de adsorción.

3.4.3. Evaluación de la reutilización del adsorbente obtenido del pseudotallo de *M. paradisiaca* después de la adsorción del azul de metileno.

Para investigar la reutilización del adsorbente, se empleó la metodología descrita por Mokhtari et al. (2021), enfocándose en el análisis de la desorción del azul de metileno previamente adsorbido sobre la fibra del pseudotallo de plátano en las condiciones óptimas determinado en el ítem 3.4.2. (pH, concentración de AM y Dosis de adsorbente). las muestras adsorbidas fueron enjuagadas exhaustivamente con agua destilada para eliminar el exceso de colorante no fijado. Posteriormente, se introdujo una mezcla NaOH 0,1 M/Metanol

(50/50 en relación volumen/volumen), las muestras fueron agitadas en dichas soluciones a 120 rpm durante 2 horas y la cantidad de colorante desorbido fue determinada mediante la medición de la concentración de azul de metileno en las soluciones finales, utilizando espectrofotometría UV-Vis (665 nm). Para evaluar la reutilización del pseudotallo de plátano como adsorbente, las muestras resultantes fueron regeneradas mediante lavado con HCl 0,01 M por 2 horas a 90 RPM, seguidas de un proceso de secado a 50 °C por 24 horas y posterior reutilización en nuevos ciclos de adsorción, manteniendo condiciones constantes de operación ([AM], pH y Tiempo contacto en 2 horas). Este ciclo de adsorción-desorción fue repetido en cuatro ocasiones consecutivas sobre el mismo adsorbente, con el objetivo de analizar su eficacia, estabilidad y durabilidad en aplicaciones de adsorción múltiples.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización del adsorbente de pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano).

4.1.1. Análisis fisicoquímico del pseudotallo de plátano.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico en fibra, para el pH se obtuvo un valor 6,15, estando ligeramente ácido; en cambio Salamun et al. (2016) reportó un pH de 5,61 en fibras modificadas por radiación beta, este valor es ligeramente más bajo, pero aún está dentro del rango ligeramente ácido; por otro lado Pasos et al. (2020) explica el pseudotallo del plátano es rico en celulosa (64,3%), hemicelulosa (11,5%) y lignina (9,8%), por dichos componentes tienden a influir en el nivel del pH de la fibra pero a la vez indica que el tratamiento realizado para obtener dicha muestra también pudo haber influido en esta característica.

Tabla 3. Análisis Fisicoquímico del Pseudotallo de plátano

Parámetro	Promedio ± DE
pH	6,15 ± 0,23
Humedad (%)	5,87 ± 0,7
Capacidad de retención de agua (g/mL)	12,22 ± 1,47
Densidad (g/mL)	{...} 1,25 ± 0,01

Los datos se expresan como promedio ± desviación estándar (n = 3)

La fibra del pseudotallo de plátano alcanzó un contenido de humedad del 5,87 % tras ser sometida a un proceso de secado a 70 °C durante 24 horas. Este valor es similar a lo estudiado por Obregón et al. (2021), que reportaron un contenido de 9,6 % bajo condiciones de secado a 72,7 °C por 27,9 h. En contraste, De Oliveira et al. (2020) observó una disminución mucho más drástica, de un contenido inicial de 27,74 % a tan solo 0,14 %, tras un secado a 75 °C por 4,5 h demostrando la eficacia del secado térmico en reducir la humedad de las fibras lignocelulósicas, donde se encuentran dentro de los límites de humedad recomendados por la norma ASTM D1909 (2013) para adsorbentes de fibras naturales, como el lino (8,75 %), el ramio (7,6 %) y el algodón hilado (7,0 %), lo que respalda la aptitud industrial de la fibra del pseudotallo tratada. En cambio, Aziz et al. (2011), obtuvo 8,82 % de humedad en la fibra de pseudotallo de plátano, durante el secado térmico, los tres componentes estructurales de la fibra (celulosa, hemicelulosa y lignina) actúan de varias maneras: la hemicelulosa, altamente higroscópica, pierde agua fácilmente, e incluso puede sufrir degradación parcial, lo que reduce su capacidad de retención de agua; la lignina, por ser hidrofóbica y estable al calor, se reordena estructuralmente sin degradarse, mejorando la rigidez de la fibra y su resistencia a la humedad;

y la celulosa, especialmente en su fracción amorfa, libera agua ligada y se vuelve más compacta al reorganizarse molecularmente.

La capacidad de retención de agua de la fibra arrojó un valor de 12,22 g/mL de recuperación de humedad en la fibra del pseudotallo del plátano, resultado que se encuentra dentro de un rango comparable al reportado por Yu et al. (2022), la muestra fresca del pseudotallo fue dividida en tres secciones (parte interna, media y externa) para su correspondiente evaluación, durante el proceso de recuperación de agua, se observaron los siguientes valores: parte interna (inició en 15,15 % y finalizó en 12,53 %), parte media (de 15,09 % a 12,85 %) y parte externa (de 14,77 % a 37,34 %), la medición fue por un periodo de 35 horas, se observó que la capacidad de absorción de agua varía según la composición química de la fibra, siendo mayor en la hemicelulosa, seguida por la celulosa, y menor en la lignina. Tras el proceso de separación de la fibra, el contenido de hemicelulosa y lignina disminuyó, lo que redujo la capacidad de retención de humedad. Sin embargo, en el segmento inferior del tallo, la recuperación fue significativamente mayor, posiblemente debido a una estructura más abierta de la fibra, producto de una mayor disolución de hemicelulosa y coloides. En cambio, Cardoso et al. (2025) menciona que en su estudio tratado de la fibra de pseudotallo de plátano la absorción de agua después de 24 h de inmersión de compuestos de fibras tejidas de banano-plátano/poliéster a temperatura ambiente resultó con 3,95 %.

La densidad de la fibra de plátano obtuvo un valor de 1,27 g/cm³ similar a lo reportado por Badanayak et al. (2023) en fibra de plátano obtenida mediante métodos de extracción mecánica y maceración química, presentó una densidad aproximada de 1,35 g/cm³. En el estudio de Bopda Fokam et al. (2021), se utilizó una muestra con un 2,33% de humedad. El análisis de las fibras obtenidas por cocción reveló un valor de 1,63 g/cm³, lo que indica que estas fibras tienen una mayor densidad. Tiene mejores propiedades mecánicas, especialmente en términos de resistencia a la tracción y elongación a la rotura. Por otro lado, las fibras extraídas mediante una solución de NaOH al 5% mostraron una densidad de 1,33 g/cm³, lo que es significativamente inferior. Este descenso en la densidad fue consecuencia de una lixiviación excesiva de lignina, hemicelulosa y otras sustancias solubles, lo que debilitó la estructura interna de la fibra. La degradación resultante afectó la cohesión de las microfibrillas, que son elementos clave para mantener la integridad y resistencia del material; de igual manera Obregón et al. (2021) mencionaron que la densidad de las fibras secas aumentó con la temperatura de secado, lo que sugiere una mayor compactación y reducción de porosidad a temperaturas más altas, también explica que los compuestos principales de la fibra reaccionan con diferentes formas durante el secado, las moléculas de celulosa tienden a reorganizarse y a formar enlaces

más fuertes entre ellas, lo que contribuye a una mayor compactación de la fibra, debido a que es un polímero hidrófilo, por lo que la pérdida de agua también provoca una disminución en su volumen; la hemicelulosa el compuesto más soluble en agua que la celulosa, pierde agua fácilmente y se degrada parcial o completamente durante el proceso de secado, lo que reduce aún más la porosidad de la fibra y la lignina, es un material hidrófobo y termoestable que ayuda a darle rigidez y fuerza a la fibra. Su estructura no se ve tan afectada por el secado, pero contribuye a la reducción de la porosidad y a la compacidad de la fibra.

4.1.2. Identificación de grupos funcionales por espectroscopía FTIR del pseudotallo de plátano.

La espectroscopía FTIR es una técnica fundamental en la caracterización de biomateriales lignocelulósicos, que permite identificar los grupos funcionales responsables de las interacciones químicas con los contaminantes, como el azul de metileno. En el caso del pseudotallo de plátano, diversos estudios han reportado una amplia gama de bandas de absorción características de sus principales componentes: celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos ricos en grupos hidroxilo, carboxilo, carbonilo y otros grupos oxigenados que desempeñan un papel crucial en los mecanismos de adsorción (Rahman et al., 2022; Badanayak et al., 2023). En la Figura 5 y Tabla 4 se describen las principales vibraciones y grupos funcionales detectados por el espectrómetro FTIR, la muestra presentó un pico ancho en $3338,77\text{ cm}^{-1}$, atribuibles a la vibración de estiramiento del grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) presente en alcoholes, agua absorbida, lignina y celulosa. Estos grupos tienen alta afinidad por especies polares como los colorantes catiónicos, participando activamente en enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals (Farias et al., 2023; Rahman et al., 2022).

El pico en $2917,01\text{ cm}^{-1}$, correspondiente al estiramiento C–H de enlaces alifáticos, indica la existencia de cadenas hidrocarbonadas, propias de los esqueletos de celulosa y hemicelulosa, estos grupos forman parte de la estructura física de la fibra y pueden influir en la porosidad y la superficie específica, estas características fueron señaladas por Badanayak et al. (2023) y Kokate et al. (2022) en su estudio de fibra extraída de pseudotallo de plátano indicando que bandas entre 2850 y 2935 cm^{-1} , correspondientes al estiramiento C–H de grupos metilo y metileno en los carbohidratos son menos reactivas y estas vibraciones reflejan la naturaleza orgánica del material y aportan información estructural sobre la matriz lignocelulósica.

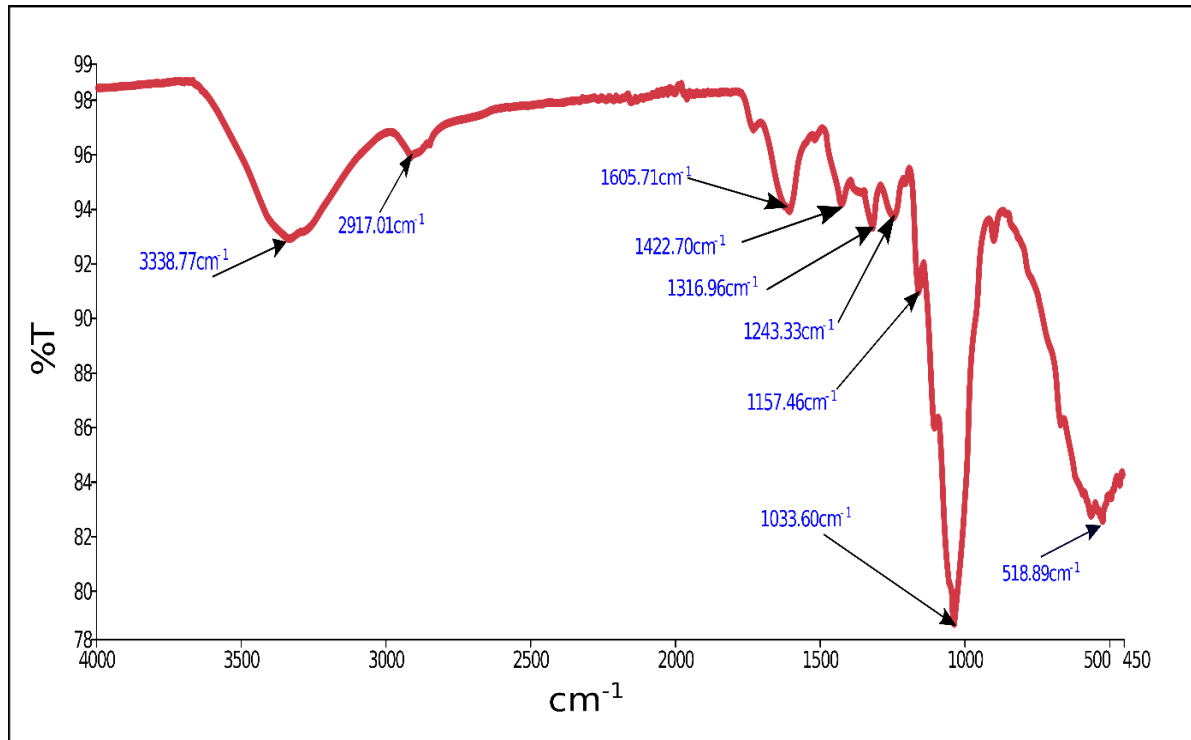


Figura 5. Espectro FTIR de la fibra del pseudotallo de plátano

Tabla 4. Grupos funcionales detectado por Espectroscopía FTIR

Frecuencia ¹ (cm ⁻¹)	Tipo de vibración	Grupo funcional / Enlace involucrado
3338,77	Estiramiento O–H amplio	Grupos hidroxilo (–OH) de celulosa, hemicelulosa, lignina
2917,01	Estiramiento C–H alifático	Grupos metilo (–CH ₃) y metileno (–CH ₂ –)
1605,71	Estiramiento C=C aromático / C=O	Lignina (anillos aromáticos), carbonilos conjugados
1422,70	Deformación C–H (flexión)	Lignina / hemicelulosa
1316,56	Estiramiento C–O	Fenoles, ésteres, lignina
1243,33	Estiramiento C–O–C / C–O	Enlaces éter o enlaces glicosídicos de polisacáridos
1157,46	Estiramiento asimétrico C–O–C	Celulosa / hemicelulosa (estructura polisacárido)
1033,60	Estiramiento C–O	Alcoholes primarios y secundarios, celulosa
518,89	Vibraciones de esqueleto (baja frecuencia)	Estructuras de anillo, posiblemente lignina o polisacáridos

¹Los datos corresponden a un espectro representativo obtenido en la región de 4000–400 cm⁻¹; el espectro fue obtenido promediando 8 barridos para mejorar la relación señal-ruido.

La banda de absorción en $1605,71\text{ cm}^{-1}$ se asocia con la presencia de enlaces C=C aromáticos o estiramientos conjugados de grupos carbonilo, rasgos típicos de la lignina, este tipo de estructura aromática no solo contribuye a la rigidez del material lignocelulósico, sino que también favorece la formación de interacciones π - π con el anillo bencénico del azul de metileno, lo cual sugiere mecanismos de adsorción adicionales a las tradicionales interacciones electrostáticas. Por su parte, las señales en el rango de 1730 – 1740 cm^{-1} corresponden al estiramiento de carbonilos en ésteres y cetonas, presentes principalmente en la hemicelulosa y la lignina, los cuales pueden establecer vínculos con contaminantes catiónicos mediante atracciones electrostáticas o formación de complejos. En conjunto, estas funcionalidades evidencian la diversidad de sitios activos que contribuyen a la afinidad del material hacia moléculas como el azul de metileno (Kokate et al., 2022; Farias et al., 2023).

Las señales registradas entre $1422,70$ y $1033,60\text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a vibraciones de estiramiento y flexión de enlaces C–O, C–O–C y C–H, todas asociadas a la presencia de polisacáridos como la celulosa y hemicelulosa. Particularmente, el pico en $1157,46\text{ cm}^{-1}$ corresponde a enlaces glicosídicos característicos de la celulosa, evidenciando la integridad de su estructura polimérica. Estos grupos funcionales coinciden con lo reportado por Rahman et al. (2022) y Kokate et al. (2022), quienes destacan la importancia de la celulosa y hemicelulosa en la interacción con colorantes catiónicos atribuyendo a la naturaleza hidrofílica y la atracción electrostática en la formación de enlaces tipo puente de hidrógeno con el contaminante.

La señal en $518,89\text{ cm}^{-1}$ se ubica en la región de huella digital, asociada a vibraciones esqueléticas de la matriz fibrosa. Si bien esta región no suele permitir una asignación precisa, su presencia refuerza la idea de una estructura molecular compleja y con potencial para diversas interacciones fisicoquímicas. De acuerdo con los resultados obtenidos los grupos funcionales COO^- y $-\text{OH}$ presentes en la fibra de pseudotallo de plátano serán los principales responsables de la interacción con los cationes del azul de metileno, similar efecto fue reportado por Šehović et al. (2022) quienes caracterizaron fibras obtenidas de la cáscara de limón indicando a estos grupos como los principales actores en el mecanismo de adsorción mediante intercambio iónico, puentes de hidrógeno e interacciones π - π . Además, estos resultados son comparables con los obtenidos en otros adsorbentes naturales como el bagazo de caña y cáscara de plátano que muestran patrones FTIR similares y confirman el rol activo de grupos como $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}$ en la adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ponce et al., 2021; Farias et al., 2023).

4.1.3. Morfología y distribución granulométrica del pseudotallo de plátano.

La microscopía se emplea como una técnica complementaria en la caracterización de adsorbentes, permitiendo observar la morfología general y posibles modificaciones superficiales inducidas por los procesos de preparación e interacción con los adsorbatos, aunque su resolución es limitada en comparación de la microscopía electrónica (SEM), proporciona información visual útil sobre la estructura y distribución de partículas en los materiales estudiados (Namdeti et al. 2022). En la Figura 6, se mostraron las principales características morfológicas que presenta el pseudotallo de plátano, revelando una estructura rica en fibras vegetales, con una notable heterogeneidad en cuanto a tamaño y forma.

En la Figura 6-A, se aprecia el aspecto general del material triturado, donde se observan fragmentos irregulares compuestos por fibras lignocelulósicas, esta morfología inicial sugiere que el material ha sido sometido a un proceso mecánico de reducción de tamaño, lo cual es fundamental para aumentar la relación superficie-volumen, un aspecto crítico en materiales adsorbentes. Esta característica fue reportada por Ruangnarong et al. (2024), en fibras del pseudotallo de plátano extraídas mecánicamente y con pretratamiento químico destacando heterogeneidad en la morfología y estructura de las fibras de plátano. Aunque el proceso rompe los enlaces lignocelulósicos y reduce el tamaño promedio de las fibras entre 0,5 y 1,5 cm estas operaciones no afectan la capacidad de adsorción de las fibras.

En la Figura 6-B y 6-C, a mayor aumento (40×), se evidencia la naturaleza fibrosa del PST, destacándose fibras largas y bien definidas, con presencia de haces fibrilares dispersos y estructuras tubulares, esta disposición indica una organización lignocelulósica típica, rica en celulosa y hemicelulosa similar caracterización fue realizada por Abdul Razab et al. (2022) señalando estructuras largas, delgadas y enredadas de los filamentos celulósicos que forman una red típica de celulosa, principal componente del esqueleto de las paredes celulares. Estas fibrillas presentan una disposición relativamente paralela, característica típica de la pared secundaria de las plantas (Rahman et al. 2022). Por otro lado, estos compuestos son conocidos por su capacidad para presentar grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos y fenoles, los cuales pueden interactuar con moléculas del azul de metileno (Farias et al. 2023).

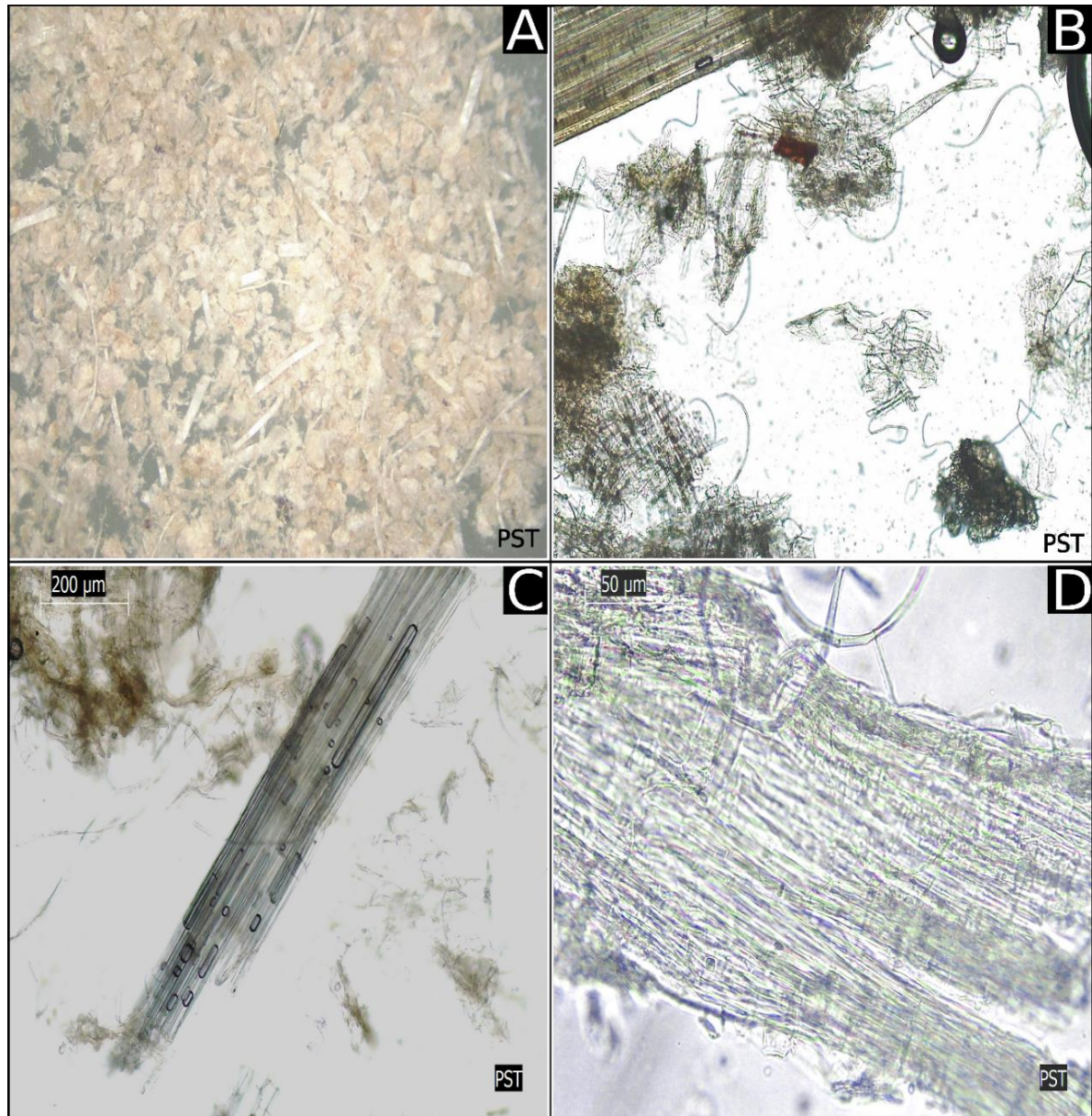


Figura 6. Morfología del pseudotallo de plátano observada mediante microscopía óptica. A: aumento 16×; B: aumento 40×; C: aumento 40×; D: aumento 100×.

La Figura 6-D muestra una estructura fibrosa alineada, lo cual constituye una característica morfológica de relevancia en la adsorción, esto podría facilitar la accesibilidad de las moléculas del adsorbato hacia los sitios activos localizados en la superficie del material. Este tipo de organización estructural ha sido igualmente reportado por Rahman et al. (2022), quienes observaron que las fibrillas del pseudotallo de *Musa acuminata* presentan una disposición paralela embebida en una matriz homogénea, evidenciando una arquitectura rica en celulosa, con poros de aproximadamente 1 μm de diámetro. Tal disposición refleja no solo la configuración interna de la pared secundaria de las plantas, sino que también sugiere una elevada eficiencia en la captura de contaminantes a través de mecanismos de adsorción

tanto superficial como porosa. Por otro lado, la rugosidad y heterogeneidad superficial descritas en estudios previos refuerzan esta interpretación. Namdeti et al. (2022) y Ruangnarong et al. (2024) coinciden en que una superficie fibrosa e irregular, acompañada de una porosidad apreciable, puede estar directamente asociada con una mayor disponibilidad de sitios activos para la adsorción. De manera particular, Ruangnarong et al. (2024) destacan que el pretratamiento químico (extracción con ácidos) altera significativamente la morfología de las fibras, generando una mayor rugosidad y separación entre ellas. Estas modificaciones estructurales incrementan tanto la superficie específica como la facilidad de impregnación con tintes, resinas u otros compuestos, mejorando así el rendimiento funcional del material adsorbente.

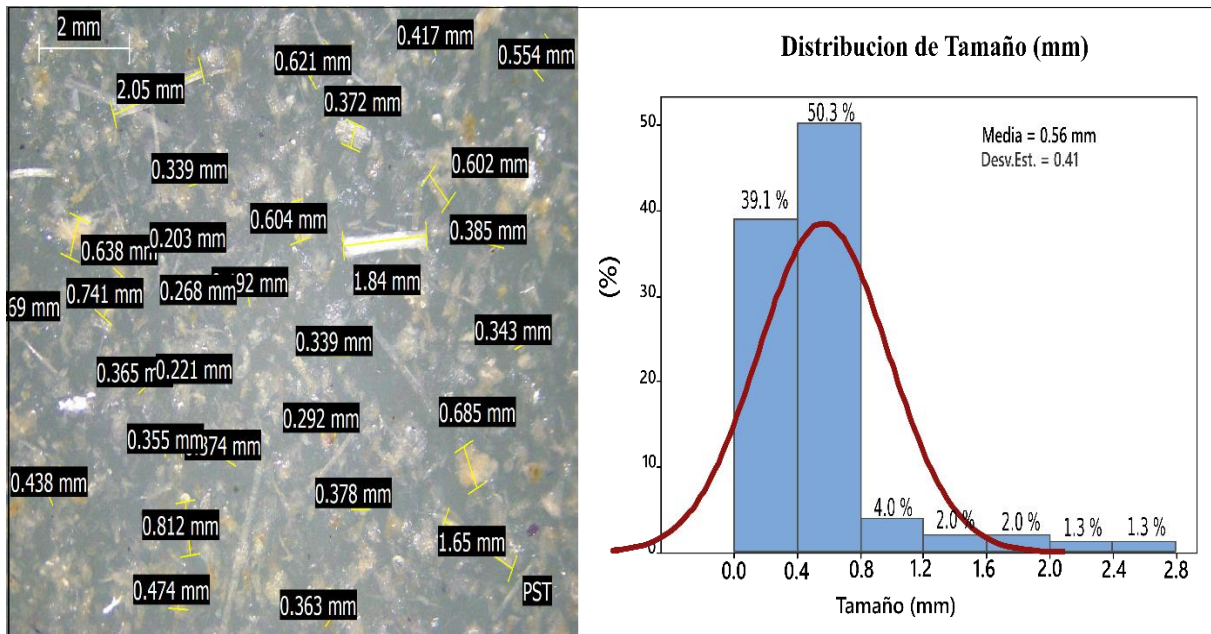


Figura 7. Distribución del tamaño de partículas del pseudotallo de plátano.

La distribución del tamaño de partícula de un adsorbente juega un papel crucial en su eficiencia de regeneración y en la recuperación de contaminantes adsorbidos, las investigaciones indican que la forma y el tamaño del material adsorbente pueden controlarse para mejorar sus capacidades de adsorción y desorción (Fouda-Mbanga et al. 2024). En la Figura 7 se muestra una amplia variedad de tamaños que oscilan entre aproximadamente 0,33 mm y 2,68 mm, lo que indica una heterogeneidad en la molienda del material, el histograma de la Figura 6, señala que el 89,4 % de las partículas presentaron tamaños inferiores a 0,8 mm, característica que es favorable en la adsorción como lo indica Muthusamy et al. (2024) quienes demostraron que la eficiencia de adsorción aumenta conforme se reduce el tamaño de partícula del adsorbente, debido a la mejora en la exposición de sitios activos superficiales. De igual

modo, Nethaji et al. (2013) cuantificaron esta tendencia al evaluar la adsorción de colorantes con partículas de 0,1mm, 0,6 mm y 1,0 mm, encontrando capacidades de adsorción de 8,95, 6,45 y 4,53 mg/g, respectivamente, lo que evidencia una disminución progresiva de la eficiencia a medida que el tamaño de partícula aumenta, la media de 0,56 mm observada en este estudio obtendría una alta capacidad de adsorción y facilidad de separación del material.

Módenes et al. (2015) evaluaron el pseudotallo de plátano con partículas en el rango de 0,150 a 0,425 mm y no observaron diferencias significativas en la eficiencia de remoción de azul de metileno, la cual osciló entre 95 y 98 % con solo un 3 % de desviación estándar. Este hallazgo sugiere que, más allá del tamaño absoluto, otros factores como la naturaleza de los grupos funcionales, la porosidad y la cinética de difusión interna también desempeñan un papel relevante en el desempeño adsorbente. Por otro lado, Balakrishnan et al. (2021), observaron que las fibras de plátano extraídas mecánicamente presentan diámetros mayores ($> 0,140$ mm) presentan impurezas, lo cual puede limitar su área superficial y afectar negativamente la eficiencia adsorbente si no se realiza un tratamiento previo adecuado. Estos hallazgos refuerzan la importancia de un control adecuado del tamaño de partícula, pretratamiento estructural y limpieza antes de su aplicación como adsorbente.

4.1.4. Análisis térmico del pseudotallo de plátano.

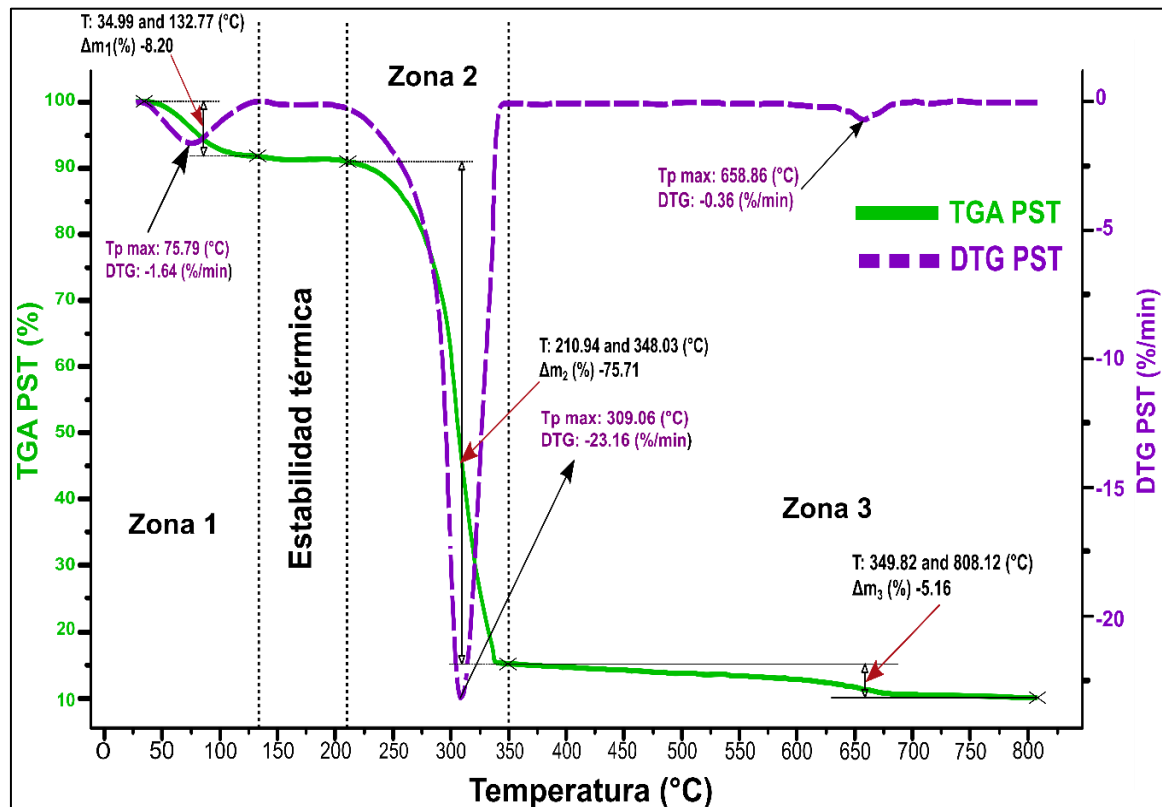
4.1.4.1. Termogravimetría (TGA/DTG)

En la Tabla 5 y Figura 8 se presentan el perfil térmico obtenido mediante análisis termogravimétrico del pseudotallo de plátano (PST), se evidenció un comportamiento característico de materiales lignocelulósicos, el cual puede dividirse en tres zonas de pérdida de masa y una zona de estabilidad térmica. Estas etapas permiten comprender su composición estructural, su resistencia térmica y su aplicabilidad como bioadsorbente en procesos que impliquen variaciones térmicas, como la regeneración o activación térmica. En la primera zona térmica (34.99–132.77 °C) se registró una pérdida de masa del 8,20 %, con un pico máximo de descomposición a 75,79 °C, siendo atribuible a la pérdida de agua físicamente adsorbida y compuestos volátiles, fenómeno común en materiales higroscópicos de origen vegetal; Belmabrouk et al. (2023) y Tanure et al. (2024) reportaron para esta zona, pérdidas por deshidratación entre 6 – 7 %.

Tabla 5. Zonas térmicas de degradación del pseudotallo de plátano

Zonas detectadas	Rango de temperatura (°C)	Pico máximo (Tp ¹ , °C)	DTG ² (%/min)	Pérdida de masa (%)	Descripción del evento
Zona 1	34,99 – 132,77	75,79	-1,64	8,2	Pérdida de humedad superficial y compuestos volátiles
Zona de estabilidad	132,77 – 210,94	—	—	—	Región sin pérdidas significativas
Zona 2	210,94 – 348,03	309,06	-23,16	75,71	Degradación de hemicelulosa y celulosa
Zona 3	349,82 – 808,12	658,86	-0,36	5,16	Degradación de lignina y residuos carbonosos

¹Tp: Temperatura pico; ²DTG: velocidad de máxima degradación. Los datos corresponden al promedio de tres réplicas (n = 3).

**Figura 8.** Termograma TGA/DTG del pseudotallo de plátano.

La zona de estabilidad térmica (132,77–210,94 °C) constituye un hallazgo relevante, durante este intervalo no se detecta una pérdida de masa significativa, esta estabilidad térmica implica que el pseudotallo (PST) puede ser sometido a procesos

térmicos (por ejemplo, secado o esterilización) sin degradación estructural, preservando los grupos funcionales que participan en la adsorción; Temitayo Oyewo et al. (2023), destacaron que la estabilidad térmica se debía a la alta cristalinidad de la celulosa presente en la fibra de plátano (60–85 %) evitando que se degrade a temperaturas menores de 201,94 °C.

La segunda etapa de degradación (210,94 – 348,03 °C) corresponde a la pérdida de masa más significativa con 75,71 % y presenta un pico máximo de descomposición a 309,06 °C, reflejando la degradación térmica de la hemicelulosa y la celulosa, principales constituyentes de la matriz lignocelulósica; sin embargo De Oliveira et al. (2022) y Brissac et al. (2018), quienes indicaron que estas fracciones se degradan entre 220 y 400 °C, siendo la hemicelulosa menos estable térmicamente debido a la presencia de grupos acetilo; por otro lado el reporte Tanure et al. (2024) en fibra de bagazo de caña y Farias et al. (2023) para fibra de cáscara de plátano, también identifican esta etapa como la de mayor pérdida de masa, confirmando la similitud estructural entre el PST y otros residuos lignocelulósicos; en esta etapa sugiere una alta proporción de polisacáridos estructurales en el PST, lo cual es deseable en aplicaciones adsorbentes, ya que estas fracciones contienen grupos funcionales (–OH, –COOH) responsables de la interacción con contaminantes como el azul de metileno.

La tercera etapa (349,82–808,12 °C) representa una pérdida adicional de 5,16 %, con un pico de degradación a 658,86 °C, atribuible principalmente a la degradación térmica de la lignina y compuestos carbonosos residuales. La lignina, por su naturaleza aromática y altamente reticulada, muestra una degradación más lenta y extendida, tal como lo mencionan Belmabrouk et al. (2023) y Sango et al. (2018), quienes sitúan esta fase en un rango entre 450 y 550 °C, el comportamiento del PST indica una mayor resistencia térmica de la lignina en esta matriz, posiblemente debido a diferencias en la conformación estructural del material. aunque minoritaria, aporta estabilidad térmica y resistencia mecánica, favoreciendo el uso del material en condiciones de regeneración térmica controlada.

El comportamiento térmico observado para el PST también puede contrastarse con residuos orgánicos distintos, como los adsorbentes derivados de cáscara de naranja analizados por Betancur et al. (2022), en los cuales el elevado contenido de cenizas (hasta 30 %) puede alterar negativamente la integridad térmica del material. En contraste, el PST muestra un perfil de degradación térmica más limpio, lo que indica una baja presencia de componentes inorgánicos no combustibles, favoreciendo su aplicación en procesos de adsorción y posterior regeneración.

4.1.4.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la Figura 9 se detalla el análisis térmico mediante DSC del pseudotallo de plátano (PST) que permitió identificar dos eventos térmicos fundamentales; un pico endotérmico asociado a la pérdida de humedad y un proceso exotérmico correspondiente a la degradación de componentes estructurales como hemicelulosa y celulosa. Estos resultados son coherentes con el análisis térmico de fibras vegetales, lo que respalda la caracterización del PST como un adsorbente estable y energéticamente valorizable. El evento endotérmico debido a la evaporación del agua libre o débilmente retenida, fenómeno que ocurre típicamente entre 60–120 °C. Deepa et al. (2011) reportan para fibras de plátano una desorción de humedad con un $\Delta H = 119 \text{ J/g}$ a temperaturas en torno a 110–120 °C, mientras que Milani et al. (2016) observaron un pico amplio entre 60 –100 °C incluso tras un secado previo, atribuible a la naturaleza hidrofílica persistente de las fibras. Los resultados obtenidos para el PST (pico a 35,13–131,19 °C, $\Delta H = 134,37 \text{ J/g}$) se encuentran dentro de este rango, lo que sugiere que su comportamiento está en línea con el de otras fibras lignocelulósicas y que la eliminación de humedad puede realizarse de forma eficiente con bajo consumo energético.

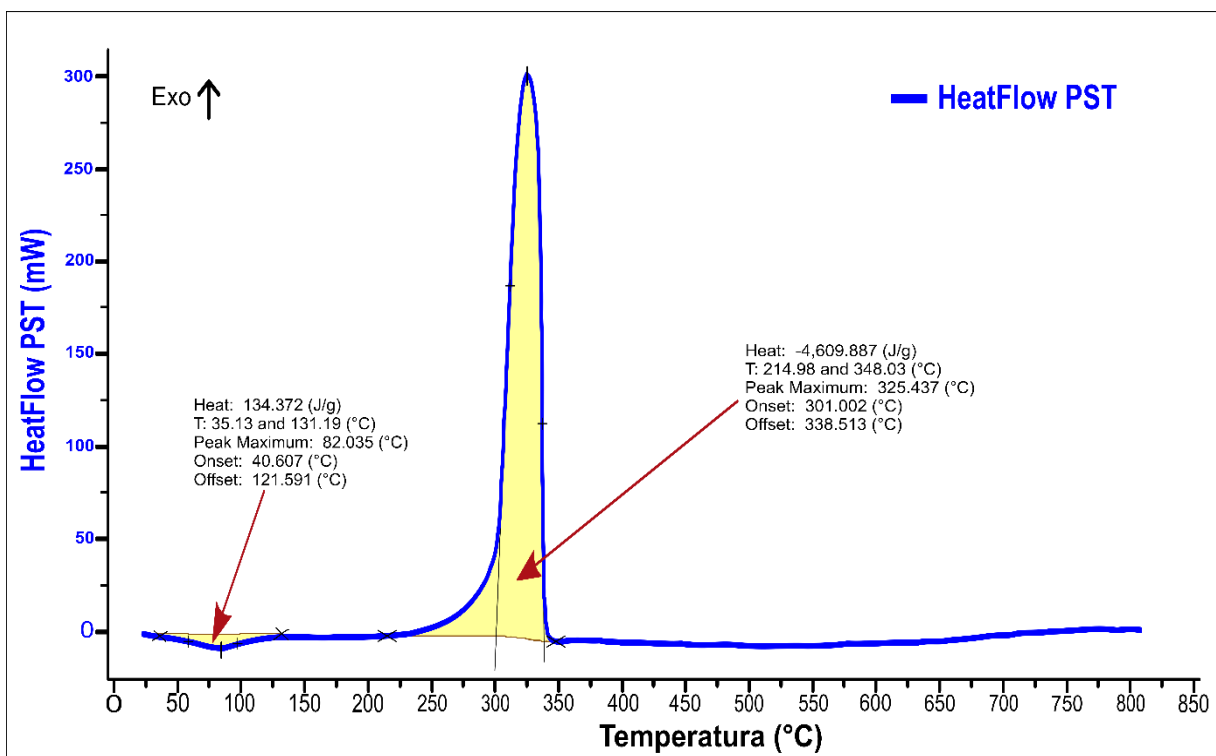


Figura 9. Termograma DSC del pseudotallo de plátano.

La fracción exotérmica observada entre 214,98 y 348,03 °C en el PST representa la descomposición progresiva de hemicelulosa (280–300 °C) y celulosa (340–360 °C), en coherencia con los perfiles térmicos descritos por Deepa et al. (2011) y Milani et al. (2016). Los valores de entalpía reportados para estas transiciones (176 J/g para hemicelulosa y 239 J/g para celulosa) indican procesos térmicos diferenciados y energéticamente relevantes. En contraste, el PST muestra un único pico amplio con una entalpía mucho mayor ($\Delta H = 4609,89 \text{ J/g}$), lo que podría reflejar una mayor densidad energética del material, o bien una superposición térmica de ambos procesos debido a la heterogeneidad estructural y a la presencia simultánea de lignina, que también contribuye a la transición exotérmica en rangos superiores. Entalpía de combustión similar fue reportado Castells et al. (2024) sobre pellets de madera, donde se observó un comportamiento exotérmico con $\Delta H = 4726,9 \text{ J/g}$ (oxidación principal alrededor de 310 °C). Por tanto, el alto valor de entalpía del PST es comparable al de biomateriales energéticamente densos, lo que fortalece su potencial como fuente renovable de energía al final de su ciclo como adsorbente.

La combinación de una buena estabilidad térmica, un comportamiento típico de biomasa fibrosa y un alto valor calórico hace del pseudotallo de plátano un candidato viable para procesos térmicos de valorización energética como la combustión directa o pirólisis. La similitud con fibras de otras variedades y con biomasa densa como la madera (Castells et al., 2024) sugiere que el PST puede ser integrado en mezclas para la producción de biocombustibles sólidos (briquetas o pellets) o biocarbón.

4.1.5. Evaluación del punto de carga cero (pH_{pzc}) del pseudotallo de plátano

La determinación del punto de carga cero de un adsorbente es crucial para comprender el comportamiento de su superficie frente a especies iónicas en solución, optimizando su aplicación en procesos de adsorción. En la Tabla 6 y Figura 10 y se presentan los valores utilizados para el cálculo del pH_{pzc} de la fibra del pseudotallo de plátano (PST) encontrándose en pH de 6,75 al proyectarse $\Delta \text{pH}=0$, lo que implica que la superficie del adsorbente adquiere carga negativa en soluciones con pH superiores a este valor, favoreciendo la adsorción de colorantes catiónicos como el azul de metileno.

Tabla 6. Valores para cálculo de pH_{pzc} de pseudotallo del plátano

pH	ΔpH ¹
2	-0,25±0,03
4	-2,64±0,12
6	-0,78±0,15
8	1,10±0,06
10	2,85±0,04

¹ ΔpH : (pH final – pH inicial). Los resultados se expresan como promedio \pm desviación estándar (n = 3).

Nethaji et al. (2013), reportaron valores similares en su estudio de colorantes catiónicos, obteniendo en un rango de pH_{pzc} entre 6 y 7 sobre partículas carbonáceas de biomasa, esto refuerza la idea de que a pH superiores al pH_{pzc} , la repulsión por protonación disminuye y la carga negativa superficial promueve una adsorción más eficiente mediante mecanismos electrostáticos, además enlaces π - π y puentes de hidrógeno; en cambio el estudio de Tanure et al. (2024) sobre adsorbentes modificados para la remoción de colorantes aniónicos muestra cómo la modificación química puede alterar significativamente el pH_{pzc} , debido a la incorporación de grupos amonio cuaternarios, desplazando el pH_{pzc} hasta 7,32; pero Kokate et al. (2022) reportó un pH_{pzc} de 5,4 para un adsorbente derivado del tallo de plátano procesado, sugiere que el tipo de fracción vegetal (fibra vs. tallo completo), así como el método de preparación del adsorbente, afectan significativamente las propiedades superficiales del material. En ambos casos, la carga negativa de la superficie por encima del pH_{pzc} facilita la interacción con especies cargadas positivamente. Por otro lado, Ponce et al. (2021), quienes evaluaron residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña, la cáscara de arroz y la de maíz, reportando valores de pH_{pzc} entre 3,2 y 3,8, menciona que el principio de adsorción basado en la interacción electrostática sigue siendo el mismo: la carga superficial negativa a $pH > pH_{pzc}$ favorece la adsorción de especies catiónicas, esta diferencia puede atribuirse a la composición química y a los tratamientos aplicados a los materiales, ya que el tipo y densidad de grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos y fenoles influyen directamente en la carga superficial.

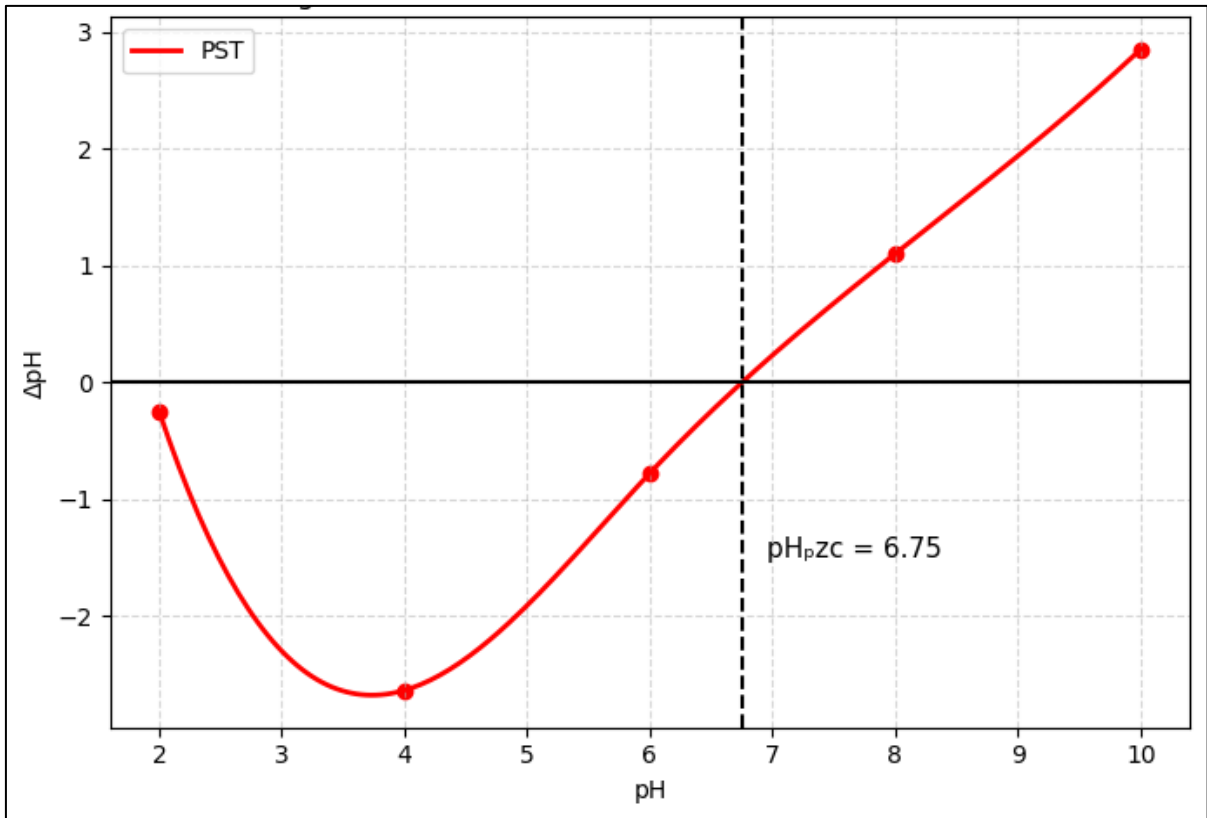


Figura 10. Evaluación del punto de carga cero (pHpzc)

4.2. Determinación el porcentaje de adsorción del azul de metileno en soluciones acuosas utilizando adsorbente del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano).

Con el fin de maximizar la eficiencia de remoción de azul de metileno (AM) en soluciones acuosas, se empleó un diseño Box-Behnken (DBB) para modelar y optimizar la adsorción sobre fibra de pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca* L.), un residuo agroindustrial no convencional. En la Tabla 7 se presentan los resultados de adsorción del tinte (AM), se evaluaron tres factores independientes: pH (3, 7, 11), dosis del adsorbente (5, 10, 15 g/L) y concentración inicial del tinte (2, 5, 8 mg/L) y la respuesta fue el porcentaje de adsorción. Los resultados mostraron que los parámetros de pH, temperatura, dosis de adsorbente y concentración inicial del colorante influyen significativamente en la eficiencia del proceso de adsorción, con interacciones notables entre ellos como lo reportó (Namdeti et al. 2022) quienes estudiaron por metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar el proceso de remoción de azul de metileno utilizando fibra extraída de hojas de *Musa acuminata* como adsorbente.

Tabla 7. Optimización del proceso de adsorción de azul de metileno mediante diseño Box-Behnken

Tratamiento	pH	Dosis de Adsorbente PTS ¹ (g/L)	Concentración de tinte AM ² (mg/L)	Adsorción AM ³ (%)
T1	3	10	2	82,20±0,06
T2	7	10	5	93,09±0,13
T3	7	15	2	69,81±0,57
T4	7	5	2	94,01±0,34
T5	11	10	2	82,69±1,18
T6	7	5	8	96,43±0,28
T7	7	10	5	94,45±0,07
T8	3	10	8	96,48±0,20
T9	11	5	5	96,68±0,08
T10	11	15	5	95,47± 0,12
T11	7	10	5	95,00± 0,23
T12	7	10	5	95,24± 0,16
T13	3	15	5	96,33± 0,10
T14	11	10	8	97,42± 0,03
T15	7	15	8	95,73± 0,05
T16	3	5	5	96,10± 0,09

¹ PTS: pseudotallo de plátano; ²AM: azul de metileno. ³Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar (n = 3).

Los valores de adsorción obtenidos (Tabla 7) oscilaron entre 69,81% y 97,42%, lo que muestra un rango amplio de eficiencia bajo diferentes condiciones. Estudios previos han demostrado el potencial del plátano como biomaterial adsorbente, El-Maghraby y Taha (2014) evaluaron la médula del plátano (banana pith) para la remoción de azul de metileno, reportando una eficiencia de adsorción cercana al 89% con una concentración inicial de 25 mg/L en solo 2 horas de contacto. Este rendimiento se atribuye a su estructura lignocelulósica porosa y a la abundancia de grupos funcionales superficiales capaces de interactuar con los colorantes catiónicos. Estos resultados respaldan la viabilidad del uso de residuos del plátano como adsorbentes de bajo costo y alto desempeño para el tratamiento de efluentes teñidos. Por otro lado, Yadav et al. (2022) reportaron eficiencia de adsorción del colorante AM en 98,71 % en fibra de *Fucus vesiculosus* indicando que los parámetros de adsorción se vieron afectados por la dosis del adsorbente, la concentración, el pH y la variación de temperatura. Además, diversos residuos de plátano, como cáscara, tallo, médula, hojas y fibras, han demostrado una alta eficiencia en la adsorción de colorantes sintéticos desde soluciones acuosas. Entre ellos, la cáscara de plátano activada ha reportado capacidades de adsorción sobresalientes, alcanzando

hasta 1263 mg/g para azul de metileno (Ma et al., 2015). Estos resultados evidencian que los residuos de plátano representan una alternativa eficiente, económica y sostenible para la remoción de colorantes en aguas contaminadas.

En la Tabla 8 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) que permitió identificar los factores que influyen significativamente en la eficiencia del proceso de adsorción. Los resultados mostraron que la dosis del adsorbente ($P = 0,0025$), la concentración del tinte ($P = 0,0002$), así como las interacciones cuadráticas BC ($P = 0,0012$) y CC ($P = 0,0012$), presentan efectos estadísticamente significativos ($P < 0,05$), lo cual indica su impacto directo en la capacidad adsorbente del material. En cambio, el pH ($P = 0,7500$) no evidenció una influencia significativa dentro del rango evaluado. A pesar de que el coeficiente de determinación ($R^2 = 91,30\%$) refleja que el modelo explica una gran parte de la variabilidad observada, la prueba de falta de ajuste ($P = 0,0120$) sugiere que el modelo actual no representa adecuadamente los datos, por lo que podría requerirse una formulación más compleja para mejorar su ajuste. No obstante, el estadístico de Durbin-Watson ($DW = 1,88$; $P = 0,4689$) descarta autocorrelación en los residuos, validando la independencia de los errores y la consistencia de los efectos significativos determinados. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Jaramillo et al. (2013), quienes identificaron estas mismas variables como influyentes en el proceso de adsorción de un colorante orgánico sobre fibras vegetales, utilizando un diseño factorial completo, a pesar de que en ese estudio inicial se reportó un coeficiente de determinación ajustado relativamente bajo (R^2 ajustado = 66,89%), la posterior optimización mediante un diseño de superficie permitió alcanzar eficiencias de hasta 98,5% y mejorar sustancialmente el ajuste del modelo ($R^2 = 99,18\%$). De manera similar, el resultado mostrado de eficiencia de remoción superior al 98%, con un R^2 de 91,30%, lo cual indica una fuerte capacidad explicativa del modelo, aunque la prueba de falta de ajuste significativa ($P = 0,0120$) sugiere que aún es posible optimizar la formulación estadística para mejorar su ajuste predictivo. Este hallazgo está en línea con lo planteado por Bagali et al. (2017), quienes emplearon un diseño central compuesto para optimizar la adsorción de Pb^{2+} sobre biomasa vegetal, logrando una eficiencia del 89% bajo condiciones óptimas y un modelo de segundo orden con $R^2 = 0,8992$. En ambos estudios, la optimización estadística permitió una mejor comprensión de la interacción entre variables clave, reduciendo el número de experimentos y facilitando su aplicación en contextos industriales.

Por otro lado, el hecho de que el pH no haya sido significativo ($P = 0,7500$) dentro del rango evaluado sugiere que la carga superficial del bioadsorbente y su interacción

con el azul de metileno se mantienen estables en ese intervalo, un resultado que podría vincularse al pH_{pzc} del material. Este efecto es descrito por Ponce et al. (2021) en su estudio de fibras lignocelulósicas señalando que la adsorción es buena tanto en medios ácidos (pH = 3.0) como básicos (pH = 11.0). Este hallazgo permite plantear futuras investigaciones centradas en evaluar ajustes finos del pH o modificaciones químicas que amplíen el rango de adsorción efectiva.

Tabla 8. Análisis de Varianza (ANOVA) para el modelo de adsorción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: pH	0,112	1	0,1128	0,12	0,7500
B: Dosis Adsorbente	83,722	1	83,7218	90,47	0,0025
C: Conc. Tinte	414,0	1	414,0	447,39	0,0002
AA	6,015	1	6,0147	6,50	0,0840
AB	0,518	1	0,5184	0,56	0,5085
AC	0,015	1	0,0156	0,02	0,9048
BB	0,897	1	0,8977	0,97	0,3973
BC	138,063	1	138,063	149,20	0,0012
CC	140,363	1	140,363	151,68	0,0012
Falta de ajuste	71,9	3	23,9668	25,90	0,0120
Error puro	2,776	3	0,9253		
Total (corr.)	858,38	15			

GL: grados de libertad; $R^2 = 91,30\%$ R^2 ajustado = 78,25%; Error estándar = 0,962 ; MAE = 1,71; Estadístico Durbin-Watson = 1,88173 ($P = 0,4689$).

En la Figura 11, los efectos principales muestran que la concentración del tinte (C) tiene la influencia más pronunciada sobre la adsorción, seguida por la dosis del adsorbente (B) y, en menor medida, el pH (A). A medida que aumenta la concentración inicial del colorante, se observa un incremento significativo en la adsorción, lo cual se atribuye al mayor gradiente de concentración que impulsa la difusión del soluto hacia los sitios activos del biosorbente. Sin embargo, un aumento excesivo en la dosis del adsorbente no implica una mejora proporcional en la eficiencia del proceso. Por el contrario, se evidenció una disminución en la capacidad de adsorción, lo que puede explicarse por la aglomeración de partículas y la reducción del área superficial específica, como ha sido reportado por Kokate et al. (2022) y Akter et al. (2021). Esta situación conlleva a la saturación de sitios activos y a la obstrucción,

limitando la difusión del colorante. Asimismo, Machrouhi et al. (2018) observaron que, aunque el porcentaje de remoción puede incrementarse con mayores dosis, la cantidad adsorbida por unidad de masa disminuye, afectando negativamente la eficiencia específica del sistema. En consecuencia, es fundamental establecer una dosis óptima que maximice el rendimiento sin incurrir en sobredosificación innecesaria ni pérdidas en la capacidad de adsorción.

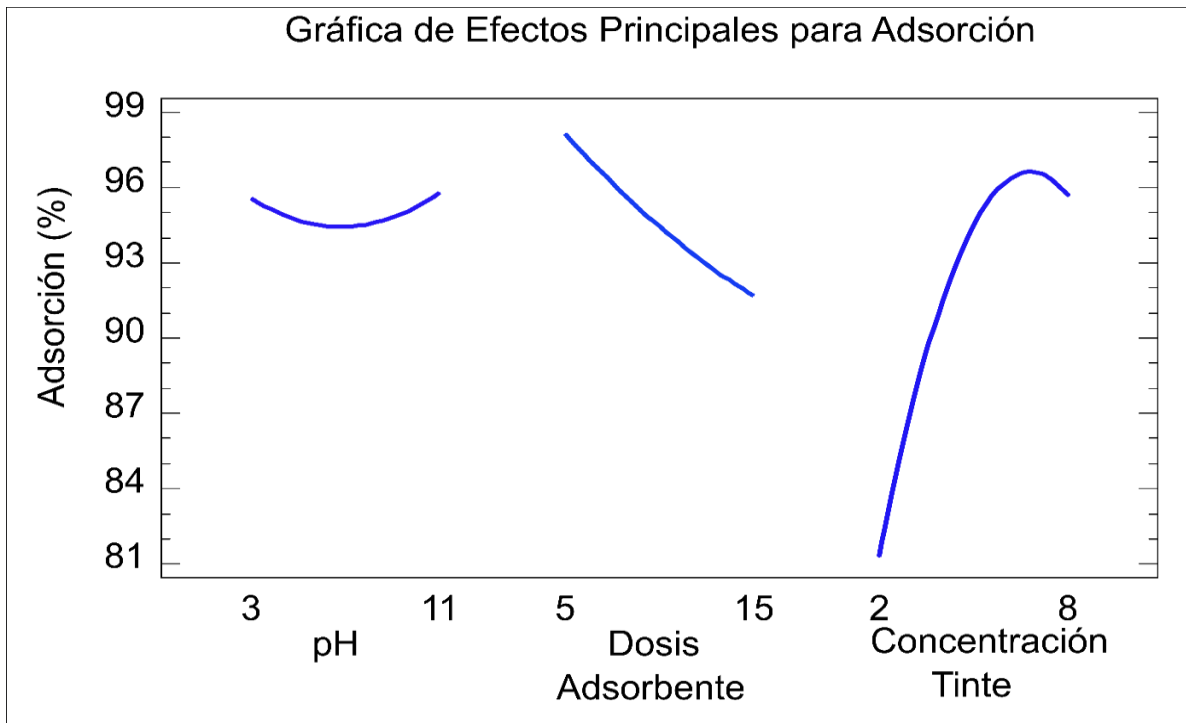


Figura 11. Efectos principales de adsorción del pseudotallo de plátano

El diagrama de Pareto complementa el análisis de efectos principales, en la Figura 12 se confirman estadísticamente la significancia de los factores. Evidenciando que concentración del tinte (C) y la dosis del adsorbente (B) son los factores más influyentes en el proceso de adsorción, mientras que el pH (A) y su interacción con otros factores no resultaron significativos ($P > 0,05$). Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Ratnam et al. (2022), quienes demostraron que la concentración inicial del colorante y la dosis del adsorbente son determinantes en la eficiencia de remoción de azul de metileno mediante óxido de grafeno modificado. En su estudio, el material optimizado logró una remoción del 95,81 %, superando al n-GO no tratado (90,6 %) bajo las mismas condiciones (pH 6, dosis de 0,4 g/L, 25 mg/L de colorante). Además, la interacción entre concentración y pH (AC) tampoco fue significativa ($P = 0,2222$), lo que respalda nuestros resultados y sugiere que estos factores actúan principalmente de forma independiente, sin generar sinergia relevante en el sistema.

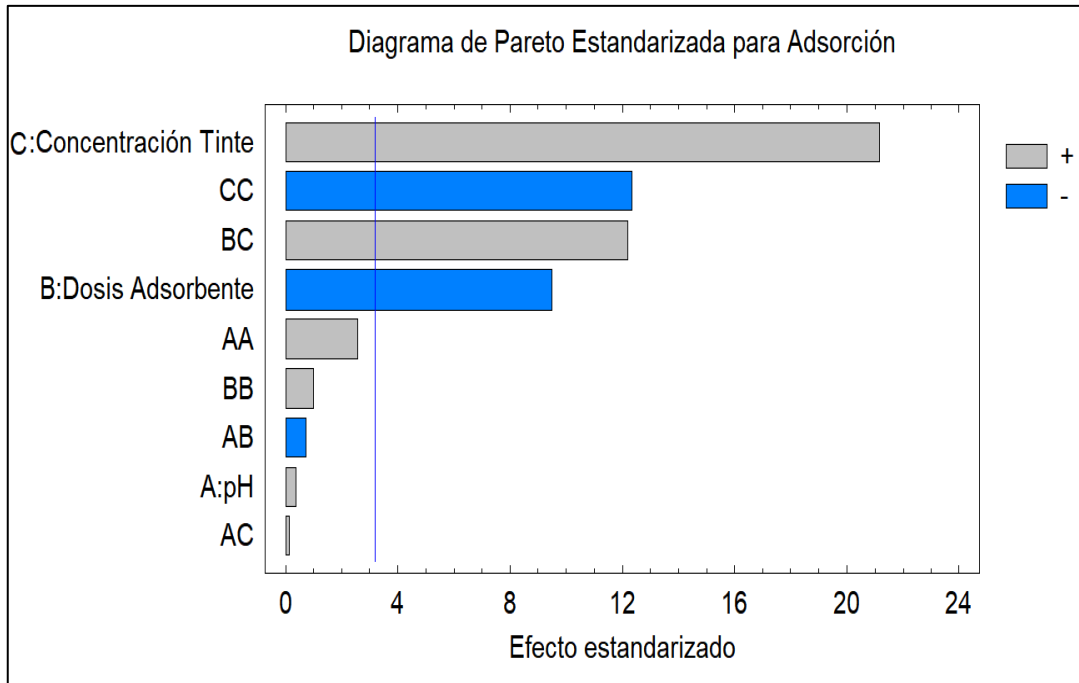


Figura 12. Diagrama de Pareto en la absorción AM con pseudotallo de plátano

El modelo matemático ajustado ($R^2 > 0.90$) para predecir la adsorción fue el siguiente:

$$\begin{aligned}
 (\%) \text{ Adsorción} = & 96.4188 - 0.889323*A - 2.85833*B + 5.02674*C + \\
 & 0.0766406*A^2 - 0.018*A*B + 0.00520833*A*C + \\
 & 0.01895*B^2 + 0.391667*B*C - 0.658194*C^2
 \end{aligned}$$

Donde A, B y C representan el pH, la dosis de adsorbente y la concentración del tinte, respectivamente, El modelo predijo una condición óptima de adsorción con los siguientes parámetros:

- pH = 11
- Dosis Adsorbente = 5 g/L
- Concentración tinte AM = 5.35 mg/L
- Adsorción máxima estimada = 99.94%

El gráfico de contornos de la superficie de respuesta estimada (Figura 13) muestra el efecto combinado de la dosis del adsorbente y la concentración del tinte sobre el porcentaje de adsorción, a un pH constante de 11,0. Se observa que los niveles más altos de adsorción ($\geq 99\%$, en tonos rojo y naranja) se alcanzan con bajas dosis de adsorbente (≈ 5 g/L)

y moderadas concentraciones de tinte ($\approx 5\text{--}6$ mg/L). A medida que la dosis del adsorbente aumenta, especialmente por encima de 10 g/L, la eficiencia de adsorción disminuye progresivamente, reflejándose en zonas azules ($<93\%$), lo cual podría deberse a fenómenos de aglomeración de partículas y bloqueo de sitios activos, reduciendo la superficie específica disponible. Ponce et al. (2021) presentó optimización de fibras lignocelulósicas con adsorción de 99,6 % con parámetros de pH 8,7; Concentración de tinte AM 5,2 y Dosis Adsorbente en 15 g/L. Además, las bajas desviaciones estándar reflejan buena reproducibilidad de los resultados. Estos datos respaldan el potencial de las fibras como biosorbentes económicos y efectivos para la eliminación de colorantes tipo azul de metileno en aguas residuales.

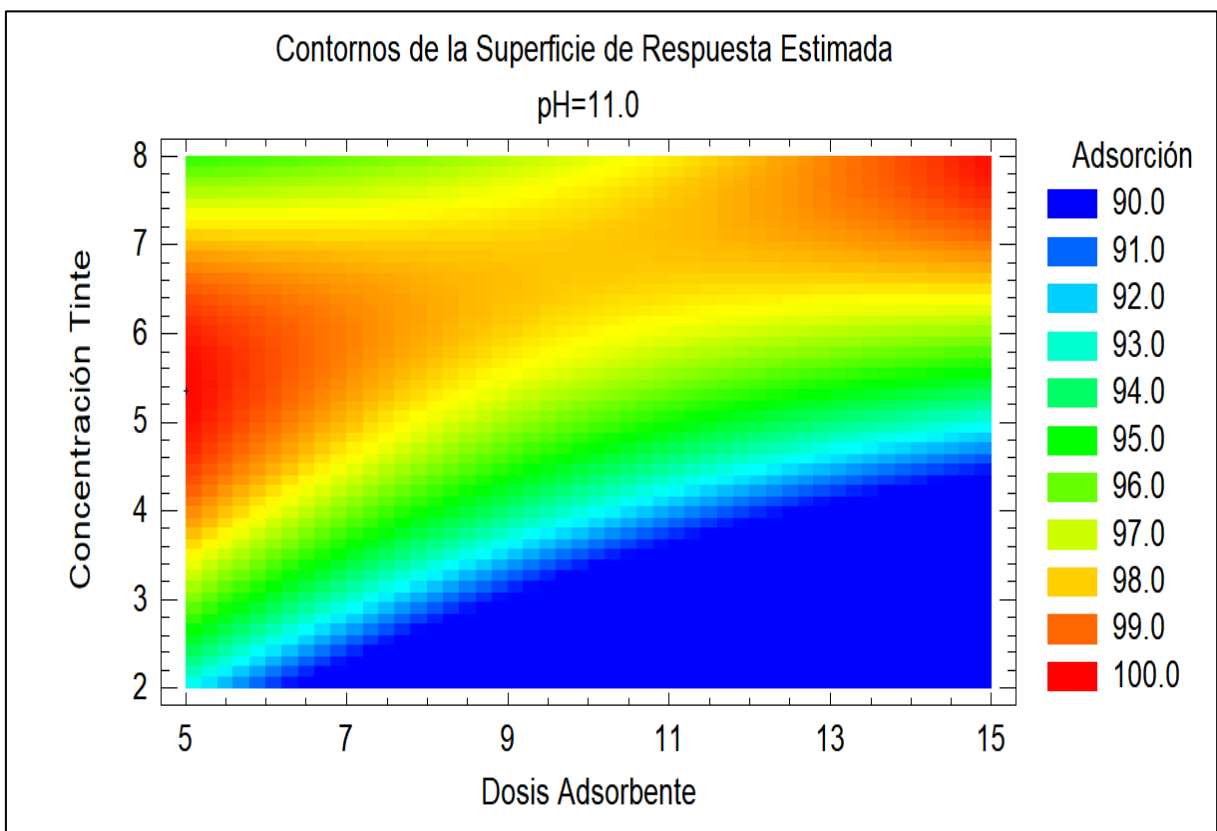


Figura 13. Contorno de la superficie de respuesta estimada para la adsorción en función de la dosis del adsorbente y la concentración del tinte a pH 11.

Asimismo, cuando la concentración del tinte es muy baja (<3 mg/L), la eficiencia también se reduce, lo que puede deberse a una menor fuerza impulsora para la transferencia de masa.

Esto refuerza la idea de que las condiciones del sistema influyen de forma conjunta en la eficiencia del proceso, y no de manera aislada. Ratnam et al. (2022) demostraron que, incluso utilizando materiales avanzados como nanopartículas de óxido de grafeno (n-GO),

la eficacia puede verse limitada si no se aplican las condiciones óptimas. En su estudio, el n-GO sin tratamiento logró solo un 90,6 % de remoción de azul de metileno bajo condiciones óptimas definidas (pH 6, dosis de 0,4 g/L, concentración de 25 mg/L y 40 minutos de contacto), mientras que el material optimizado alcanzó un 95,81 %. Estos resultados refuerzan la relevancia del diseño experimental y el modelado mediante metodología de superficie de respuesta para identificar las condiciones más favorables. Valores inferiores a la optimización fue reportado por Namdeti et al. (2022) quienes señalan una eficiencia máxima de eliminación de azul de metileno del 75,86 % utilizando un biosorbente preparado a partir de hojas de *Musa acuminata*, bajo condiciones óptimas de pH 5,8, temperatura de 39,4 °C, dosis de biosorbente de 0,27 g y una concentración inicial de 53,07 mg/L. lo que indicaría que la presencia de grupos funcionales, tamaño de partículas y el pH empleado en las fibras de pseudotallo de plátano lograron maximizar la extracción del colorante.

4.3. Evaluación de la reutilización del adsorbente obtenido del pseudotallo de *M. Paradisiaca* (plátano) después de la adsorción del azul de metileno.

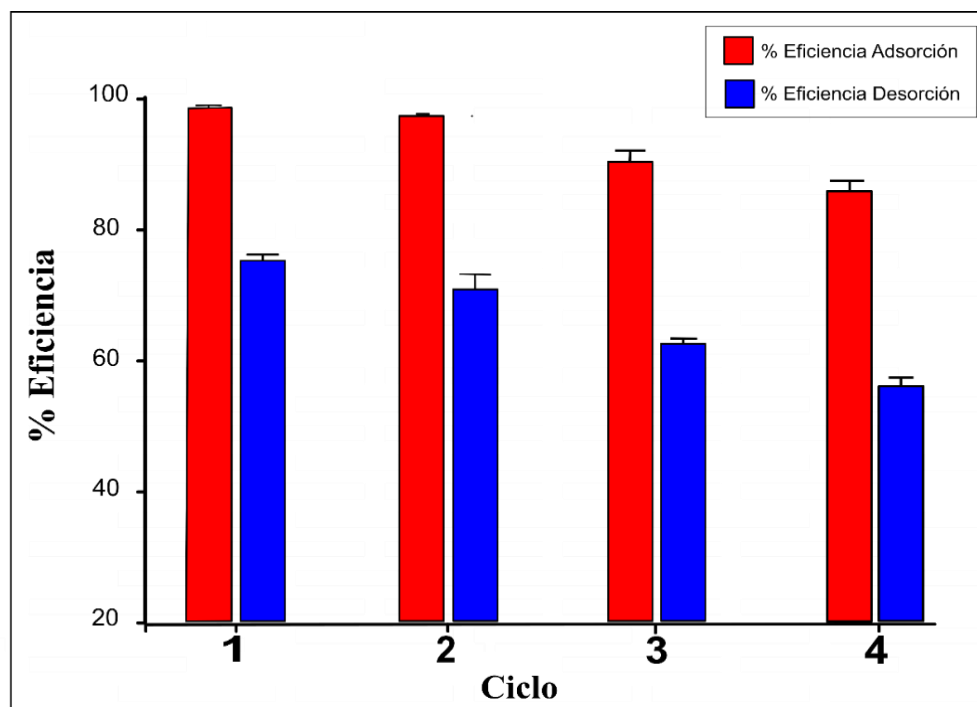
La Tabla 9 y la Figura 15 muestran el comportamiento del adsorbente extraído del pseudotallo de *Musa paradisiaca* durante cuatro ciclos sucesivos de adsorción-desorción de azul de metileno. En el primer ciclo, se obtuvo una alta eficiencia de adsorción ($98,74 \pm 0,2$ %) y una eficiencia de desorción del $75,26 \pm 0,8$ %, evidenciando una excelente capacidad inicial del material. Sin embargo, en los siguientes ciclos se observó una disminución progresiva en ambas eficiencias: en el segundo ciclo, la adsorción fue de $97,33 \pm 0,2$ % y la desorción de $71,01 \pm 2,7$ %; y en el cuarto ciclo, estos valores se redujeron a $85,85 \pm 1,3$ % y $56,76 \pm 1,1$ %, respectivamente. Esta pérdida significativa ($p < 0,05$, prueba de Tukey) sugiere un agotamiento parcial de los sitios activos de adsorción o posibles alteraciones en la estructura del adsorbente debido al proceso de regeneración. A pesar de esta reducción, el material mantuvo un rendimiento aceptable incluso tras varios usos, lo que respalda su potencial como adsorbente reutilizable en aplicaciones de tratamiento de aguas.

Tabla 9. Análisis de reutilización de adsorbente extraído del pseudotallo de plátano

Ciclo	% Eficiencia Adsorción ¹	% Eficiencia Desorción ¹
1	98.74 ± 0.2 ^a	75.26 ± 0.8 ^a
2	97.33 ± 0.2 ^a	71.01 ± 2.7 ^b
3	90.43 ± 1.5 ^b	62.57 ± 0.5 ^c
4	85.85 ± 1.3 ^c	56.76 ± 1.1 ^d

¹Los valores se expresan como promedio ± desviación estándar (n = 3). Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas entre ciclos ($p < 0.05$), según la prueba de Tukey.

Los resultados obtenidos muestran que el adsorbente evaluado presenta una alta eficiencia de adsorción de azul de metileno, superando el 98 % en el primer ciclo, y una adecuada capacidad de regeneración, manteniéndose por encima del 85 % de adsorción hasta el cuarto ciclo. Estos hallazgos son consistentes con los reportados por Kokate et al. (2022), quienes demostraron que el scutcher del tallo de plátano (BSS) puede reutilizarse eficazmente en varios ciclos de adsorción-desorción sin pérdida significativa de rendimiento, lo que refuerza el potencial de materiales lignocelulósicos como biosorbentes estables y reutilizables. De igual forma, Prabakaran y Pillay (2025) reportaron una reducción mínima en la eficiencia (solo 2,56 %) tras cuatro ciclos de regeneración del biocarbón de palma, lo que concuerda con la tendencia observada en el presente estudio.

**Figura 14.** Adsorción y desorción del adsorbente extraído del pseudotallo de plátano

Sin embargo, como señalan Naz et al. (2019), no todos los biosorbentes conservan su capacidad tras la regeneración; en su estudio, la eficacia del aserrín de *Malus domestica* disminuyó drásticamente tras el primer ciclo, lo que evidencia la importancia de la estabilidad estructural del material. En contraste, el adsorbente del pseudotallo de plátano mantuvo una eficiencia elevada incluso después de múltiples ciclos, lo que indica una buena integridad física y química durante el uso repetido. El estudio de Akter et al. (2021) destaca la importancia de los tratamientos de regeneración combinados (HCl y NaOH) para restaurar la capacidad del adsorbente, lo cual podría considerarse en futuras investigaciones para mejorar la recuperación de nuestro adsorbente. Asimismo, Fouda-Mbanga et al. (2024) subrayan que la eficiencia de los ciclos de regeneración depende del tipo de tratamiento aplicado y de la frecuencia de uso, por lo que se recomienda establecer protocolos específicos según las condiciones del sistema para maximizar la vida útil del material. Por otro lado, Tanure et al. (2024) hacen énfasis en la gestión ambiental del adsorbente gastado, aspecto relevante en la aplicación práctica del presente estudio. Si bien el adsorbente mostró buena reutilización, es necesario evaluar alternativas sostenibles para su disposición o reaprovechamiento, como su uso como precursor para nuevos adsorbentes o en procesos catalíticos.

V. CONCLUSIONES

La fibra del pseudotallo de plátano mostró propiedades fisicoquímicas favorables para su uso como bioadsorbente de colorantes catiónicos en agua. Presentó pH 6,15, humedad 5,87 %, capacidad de retención de agua de 12,22 g/mL y densidad de 1,25 g/cm³. La presencia de grupos funcionales oxigenados (COO⁻ y -OH), confirmada por FTIR, permite interacciones con el azul de metileno. Su morfología porosa y fibrilar, junto con una granulometría centrada en 0,56 mm, mejora la accesibilidad de los sitios activos. El análisis térmico (TGA/DTG) indicó estabilidad hasta 210 °C, y el DSC evidenció un comportamiento similar al de otras fibras vegetales. El pH_{pZC} de 6,75 respalda su efectividad a pH neutro o ligeramente básico, destacando su potencial como bioadsorbente económico, reutilizable y alineado con estrategias de economía circular.

La optimización mediante modelo de superficie de respuesta estableció condiciones óptimas (pH 11, dosis 5 g/L, concentración 5,35 mg/L) para alcanzar adsorción máxima del 99,94 %, evidenciando la importancia del control preciso de parámetros operativos.

El adsorbente de pseudotallo de *M. paradisiaca* mantuvo alta eficiencia de adsorción (≥ 85 %) y desorción aceptable tras cuatro ciclos. La disminución progresiva indica agotamiento superficial, pero confirma su aplicabilidad en procesos multicíclicos.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Realizar estudios piloto que validen la eficacia del adsorbente de pseudotallo de plátano en sistemas de mayor volumen, considerando variaciones en la dinámica de flujo y la carga contaminante. Partiendo del alto rendimiento de adsorción logrado en condiciones optimizadas a escala laboratorio (99,94 %), es fundamental evaluar su desempeño en condiciones reales para confirmar su aplicabilidad práctica.

Investigar métodos de activación química o física para mejorar la capacidad regenerativa del adsorbente, especialmente si se busca prolongar su uso más allá de cuatro ciclos de adsorción-desorción.

Explorar aplicaciones en matrices contaminadas reales, aunque los ensayos se realizaron en soluciones sintéticas, se recomienda evaluar el desempeño del bioadsorbente en aguas residuales reales que contengan colorantes, para validar su efectividad ante interferencias comunes.

Promover la incorporación del adsorbente de pseudotallo de plátano en tecnologías de tratamiento descentralizadas, enfocadas en comunidades rurales o zonas con recursos limitados, aprovechando su naturaleza lignocelulósica, bajo costo y facilidad de obtención para mejorar el acceso a métodos sostenibles y económicos de remediación ambiental.

Fomentar la valorización de residuos agroindustriales, los resultados obtenidos respaldan el aprovechamiento del pseudotallo de plátano como recurso funcional en el marco de una economía circular. Se recomienda promover estudios similares con otros residuos agrícolas locales para ampliar el espectro de bioadsorbentes disponibles

VII. REFERENCIAS

- Abdul Razab MKA, Mohd Ghani RS, Mohd Zin FA, et al (2022) Isolation and Characterization of Cellulose Nanofibrils from Banana Pseudostem, Oil Palm Trunk, and Kenaf Bast Fibers Using Chemicals and High-intensity Ultrasonication. *J Nat Fibers* 19:5537–5550. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1881021>
- Al-Asadi ST, Mussa ZH, Al-Qaim FF, et al (2025) A comprehensive review of methylene blue dye adsorption on activated carbon from edible fruit seeds: A case study on kinetics and adsorption models. *Carbon Trends* 20:. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100507>
- Angelova, R., Baldikova, E., Pospiskova, K., Maderova, Z., Safarikova, M., & Safarik, I. (2016). Magnetically modified *Sargassum horneri* biomass as an adsorbent for organic dye removal. *Journal of Cleaner Production*, 137, 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.068>
- Arteta, G. N. (2023). Adsorción de Cadmio en el suelo aplicando pectina de cáscara de *Musa paradisiaca* L. (Var. bellaco) a nivel de laboratorio [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2378>
- Badanayak P, Jose S, Bose G (2023) Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. *J Nat Fibers* 20:. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2168821>
- Bar M, Belay H, Alagirusamy R, et al (2022) Refining of Banana Fiber for Load Bearing Application through Emulsion Treatment and Its Comparison with Other Traditional Methods. *J Nat Fibers* 19:5956–5973. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1902901>
- Barrera-Calva, E., González, F., Hernández-Pérez, C. D., Martínez, G., Huerta-Arcos, L., Rosas-Cedillo, R., & Rentería-Tapia, V. (2021). Woods from arid zones of Mexico, calorific power from TGA-DTA and calorimetric pump. *Madera y Bosques*, 27(3), 1–12. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732106>
- Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L.-F., Agudelo, E. A., & Cardona-Gallo, S. A. (2017). Study of Toxicity Associated To Dumping of Wastewater Containing Dyes and Pigments in the Aburrá Valley Metropolitan Area. *Revista EIA*, 13(April), 61–74. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.742>
- Belalcázar, S. L. (1991). *El cultivo del plátano (Musa AAB Simmonds) en el trópico*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12434>
- Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455–475.

- <https://doi.org/10.1080/00401706.1960.10489912>
- Chakraborty, R., Sabruna, S., Roy, R., Majumdar, S., & Roy, S. (2021). Banana pseudostem substitution in wheat flour biscuits enriches the nutritional and antioxidative properties with considerable acceptability. *SN Applied Sciences*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03988-1>
- Chandrakala, R., Gundev, P., & Singh, L. (2017). Effect of Different Spices on Enzymatic Browning of Banana Pseudostem Juice. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(1), 1–7. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2017/37919>
- Chapi S (2023) Preparation, characterization and swelling studies of bio-waste-derived absorbent hydrogels. *Polym from Renew Resour* 14:237–249. <https://doi.org/10.1177/20412479231200323>
- Chokshi, S., Parmar, V., Gohil, P., & Chaudhary, V. (2022). Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(10), 3942–3953. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848738>
- Dadhaneeya, H., Nayak, P. K., Saikia, D., Kondareddy, R., Ray, S., & Kesavan, R. krishnan. (2023). The impact of refractance window drying on the physicochemical properties and bioactive compounds of malbhog banana slice and pulp. *Applied Food Research*, 3(1), 100279. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100279>
- De Gisi, S., Lofrano, G., Grassi, M., & Notarnicola, M. (2016). Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 10–40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>
- De Oliveira, A. V. B., Rizzato, T. M., Barros, B. C. B., Favaro, S. L., Caetano, W., Hioka, N., & Batistela, V. R. (2019). Physicochemical modifications of sugarcane and cassava agro-industrial wastes for applications as biosorbents. *Bioresource Technology Reports*, 7(July), 100294. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100294>
- Dussán-sarria, S., Hurtado-hurtado, D. L., & Camacho-tamayo, J. H. (2019). Granulometría , Propiedades Funcionales y Propiedades de Color de las Harinas de Quinoa y Chontaduro Granulometry , Functional Properties and Color Properties of Quinoa and Peach Palm Fruit Flour. 30(5), 3–10.
- Farias KCS, Guimarães RCA, Oliveira KRW, et al (2023) Banana Peel Powder Biosorbent for Removal of Hazardous Organic Pollutants from Wastewater. *Toxics* 11:1–16. <https://doi.org/10.3390/toxics11080664>
- Faridzuan M, Fatimah H, Zaid M, et al (2020) Futuristic advance and perspective of deep eutectic solvent for extractive desulfurization of fuel oil : A review. *J Mol Liq* 306:112870.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112870>

- Flores-Ruiz, E., Miranda-Novales, M., & Villasís-Keever, M. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Rev Alerg Mex*, 64(3), 364–370.
- Fouda-Mbanga BG, Onotu OP, Tywabi-Ngeva Z (2024) Advantages of the reuse of spent adsorbents and potential applications in environmental remediation: A review. *Green Anal Chem* 11:100156. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100156>
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas , efectos y posibles tratamientos. 7(2), 52–73.
- Go, M. B., Golbin, R. J. A., Velos, S. P., Literatus, J. V., Sambrana, M. M., & Baird, J. C. (2021). The effects of incorporation of banana pseudostem flour at different proportions on the sensory properties, proximate, and mineral composition and microbial quality of baked brownies. *Food Science and Technology (United States)*, 9(4), 87–95. <https://doi.org/10.13189/fst.2021.090403>
- Guevara Alban GP, Verdesoto Arguello AE, Castro Molina NE (2020) Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO* 4:163–173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Guimarães, J. L., Frollini, E., da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30(3), 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>
- Hamilton, A. C., Karamura, D., & Kakudidi, E. (2016). History and conservation of wild and cultivated plant diversity in Uganda: Forest species and banana varieties as case studies. *Plant Diversity*, 38(1), 23–44. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2016.04.001>
- Haque, M. O., & Mondal, M. I. H. (2016). Synthesis and Characterization of Cellulose-based Eco-Friendly Hydrogels. *Rajshahi University Journal of Science and Engineering*, 44(January), 45–53. <https://doi.org/10.3329/rujse.v44i0.30386>
- Haro Sarango AF, Chisag Pallmay ER, Ruiz Sarzosa JP, Caicedo Pozo JE (2024) Tipos y clasificación de las investigaciones. *LATAM Rev Latinoam Ciencias Soc y Humanidades* 5:956–966. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Mc Graw Hill educación. <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292>

- Kalita BB, Jose S, Baruah S, et al (2019) Hibiscus sabdariffa (Roselle): A potential source of bast fiber. *J Nat Fibers* 16:49–57. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1401504>
- Kiruthika, A. V., & Veluraja, K. (2009). Experimental studies on the physico-chemical properties of banana fibre from various varieties. *Fibers and Polymers*, 10(2), 193–199. <https://doi.org/10.1007/s12221-009-0193-7>
- Kokate, S., Parasuraman, K., & Prakash, H. (2022). Adsorptive removal of lead ion from water using banana stem scutcher generated in fiber extraction process. *Results in Engineering*, 14(March), 100439. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100439>
- Lapo B, Bou JJ, Hoyo J, et al (2020) A potential lignocellulosic biomass based on banana waste for critical rare earths recovery from aqueous solutions. *Environ Pollut* 264:. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114409>
- Liu, Y., Zhong, W., & Xing, M. (2024). Low density methacrylated pea, corn, and tapioca starch covalent cryogels with excellent elasticity and water/oil absorption capacity. *Carbohydrate Polymers*, 122234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122234>
- Madhushani WH, Priyadarshana RWIB, Ranawana SRWMCJK, et al (2022) Determining the Crystallinity Index of Cellulose in Chemically and Mechanically Extracted Banana Fiber for the Synthesis of Nanocellulose. *J Nat Fibers* 19:7973–7981. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1958428>
- Mokhtari, A., Sabzi, M., & Azimi, H. (2021). 3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye. *Carbohydrate Polymers*, 265, 118075. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118075>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (4th ed.). Wiley.
- Namdeti R, Joaquin AA, Al Amri AMAHM, Ali Tabook KM (2022) Application of artificial neural networks and response surface methodology for dye removal by a novel biosorbent. *Desalin Water Treat* 278:263–272. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29086>
- Neelamana IK, Thomas S, Parameswaranpillai J (2013) Characteristics of banana fibers and banana fiber reinforced phenol formaldehyde composites-macroscale to nanoscale. *J Appl Polym Sci* 130:1239–1246. <https://doi.org/10.1002/app.39220>
- Nethaji, S., Sivasamy, A., & Mandal, A. B. (2013). Adsorption isotherms, kinetics and mechanism for the adsorption of cationic and anionic dyes onto carbonaceous particles prepared from *Juglans regia* shell biomass. *International Journal of Environmental Science*

- and Technology, 10(2), 231–242. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0112-0>
- Ozmen, E. Y., Sezgin, M., Yilmaz, A., & Yilmaz, M. (2008). Synthesis of β -cyclodextrin and starch based polymers for sorption of azo dyes from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 99(3), 526–531. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.023>
- Pan, B. C., Xiong, Y., Li, A. M., Chen, J. L., Zhang, Q. X., & Jin, X. Y. (2002). Adsorption of aromatic acids on an aminated hypercrosslinked macroporous polymer. 53, 63–72.
- Pawar, S., Bagali, S., K, U., & Gowrishankar, B. S. (2023). Column study using modified banana pseudo stem as adsorbent for removal of Pb (II). *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15469>
- Peluffo GA, Castro S (2019) Evaluación de la capacidad de adsorción del colorante azul marino directo (AMD) en solución acuosa con carbón obtenido de cáscaras de bananas. Tesis Ing. Ambiental, Universidad de la costa Colombia
- Pielichowska K, Nowicka K (2019) Analysis of nanomaterials and nanocomposites by thermoanalytical methods. *Thermochim Acta* 675:140–163. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.03.014>
- Pielichowska, K., & Nowicka, K. (2019). Analysis of nanomaterials and nanocomposites by thermoanalytical methods. *Thermochimica Acta*, 675(December 2018), 140–163. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.03.014>
- Ponce, J., Andrade, J. G. da S., dos Santos, L. N., Bulla, M. K., Barros, B. C. B., Favaro, S. L., Hioka, N., Caetano, W., & Batistela, V. R. (2021). Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2(May 2020), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100061>
- Pu, Y. Y., Sun, D. W., Buccheri, M., Grassi, M., Cattaneo, T. M. P., & Gowen, A. (2019). Ripeness Classification of Bananito Fruit (*Musa acuminata*, AA): a Comparison Study of Visible Spectroscopy and Hyperspectral Imaging. *Food Analytical Methods*, 12(8), 1693–1704. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01506-7>
- Quispe, E. A. (2021). Utilización de cáscara de plátano como material adsorbente en la remoción de fosfato en solución acuosa [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/17819>
- Rahman MW, Nipa ST, Rima SZ, et al (2022) Pseudo-stem banana fiber as a potential low-cost adsorbent to remove methylene blue from synthetic wastewater. *Appl Water Sci* 12:242. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01769-2>
- Rajesh, N. (2017). Medicinal benefits of *Musa paradisiaca* (Banana). *International Journal of*

- Biology Research, 2(2), 51–54.
- Ramirez A, Luis Benítez J, Rojas De Astudillo L, et al (2016) Polymers Materials Type Hydrogels: Review of Their Characterization By Ftir, Dsc, Sem and Tem. *Rev Lat Met Mat* 36:108–130
- Ruvina, B. (2022). Evaluación de biomasa deshidratada de macrofungi en la remoción de tinte orgánico extraído del *Dactylopius Cocus* (cochinilla) en un medio acuoso a escala de laboratorio [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2434>
- Sardos, J., Perrier, X., Doležel, J., Hřibová, E., Christelová, P., Van Den Houwe, I., Kilian, A., & Roux, N. (2016). DArT whole genome profiling provides insights on the evolution and taxonomy of edible Banana (*Musa* spp.). *Annals of Botany*, 118(7), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw170>
- Šehović E, Memić M, Sulejmanović J, et al (2022) Thermodynamic valorisation of lignocellulosic biomass green sorbents for toxic pollutants removal. *Chemosphere* 307:.. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135737>
- Subagyo, A., & Chafidz, A. (2020). Banana Pseudo-Stem Fiber: Preparation, Characteristics, and Applications. In *Banana Nutrition - Function and Processing Kinetics* (pp. 1–19). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82204>
- Sukmana, H., Ballai, G., Gyulavári, T., Illés, E., Kozma, G., Kónya, Z. y Hodúr, C. (2023). Cáscara de arroz húngaro e indonesio como bioadsorbentes para la biosorción binaria de colorantes catiónicos a partir de soluciones acuosas: un análisis de diseño factorial. *Heliyon*, 9(6), e17154. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17154>
- Syafri E, Sudirman, Mashadi, et al (2019) Effect of sonication time on the thermal stability, moisture absorption, and biodegradation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) nanocellulose-filled bengkuang (*Pachyrhizus erosus*) starch biocomposites. *J Mater Res Technol* 8:6223–6231. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.016>
- Taer, E., Afdal Yusra, D., Amri, A., Awitdrus, Taslim, R., Apriwandi, Agustino, & Putri, A. (2020). The synthesis of activated carbon made from banana stem fibers as the supercapacitor electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3346–3349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.645>
- Toapanta, A. S. (2017). ANÁLISIS DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR COMO FILTRO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE LÁCTEOS “LÁCTEOS VALENZUELA DIVINO NIÑO” DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI, CANTÓN SAQUISILÍ (Vol. 1) [Tesis de pregrado,

- Universidad Técnica de ambato].
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/27019>
- Valladares-Cisneros MG, Valerio Cárdenas C, de la Cruz Burelo P, Melgoza Alemán RM (2017) Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Rev Ing Univ Medellín* 16:55–73.
<https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Vejarano, R., Gurreonero-fernández, J., Castillo-herrera, A., Ingeniería, F. De, & Privada, U. (2018). Adsorción de plomo (Pb) de aguas contaminadas mediante cáscara de plátano (Musa paradisiaca) Adsorption of lead (Pb) from contaminated aqueous mediums using banana (Musa paradisiaca) peel. July, 19–21.
[https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26885/Adsorption of lead %28Pb%29 from contaminated aqueous mediums using banana.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26885/Adsorption%20of%20lead%20from%20contaminated%20aqueous%20mediums%20using%20banana.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ventura-camargo, B. D. C., & Marin-morales, M. A. (2013). Azo Dyes : Characterization and Toxicity – A Review. May 2013.
- Vieira, F. R., Romero Luna, C. M., Arce, G. L. A. F., & Ávila, I. (2020). Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. *Biomass and Bioenergy*, 132(October 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105412>
- Yang, M., Chang, L., Jiang, F., Zhao, N., Zheng, P., Simbo, J., Yu, X., & Du, S. kui. (2022). Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (Musa spp.). *Food Chemistry: X*, 16(April), 100473.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100473>

ANEXOS



Figura 1. Identificación del área de muestreo CIPTALD - UNAS.



Figura 2. Toma de muestra del pseudotallo del plátano.



Figura 3. Desinfección de los instrumentos de laboratorio con alcohol 96°.



Figura 4. Registro del peso de la muestra de pseudotallo de plátano en rodajas.



Figura 5. Lavado de la muestra de pseudotallo de plátano cortado en pequeñas fracciones.



Figura 6. Inmersión de la muestra de pseudotallo de plátano en HCl 10% por 40 min.



Figura 7. Triturado de la muestra de pseudotallo de plátano con solución de HCL.



Figura 8. Peso de la muestra del pseudotallo de plátano obtenida después de triturado.



Figura 9. Secado de la muestra de pseudotallo de plátano en la estufa 50° por 36 horas.

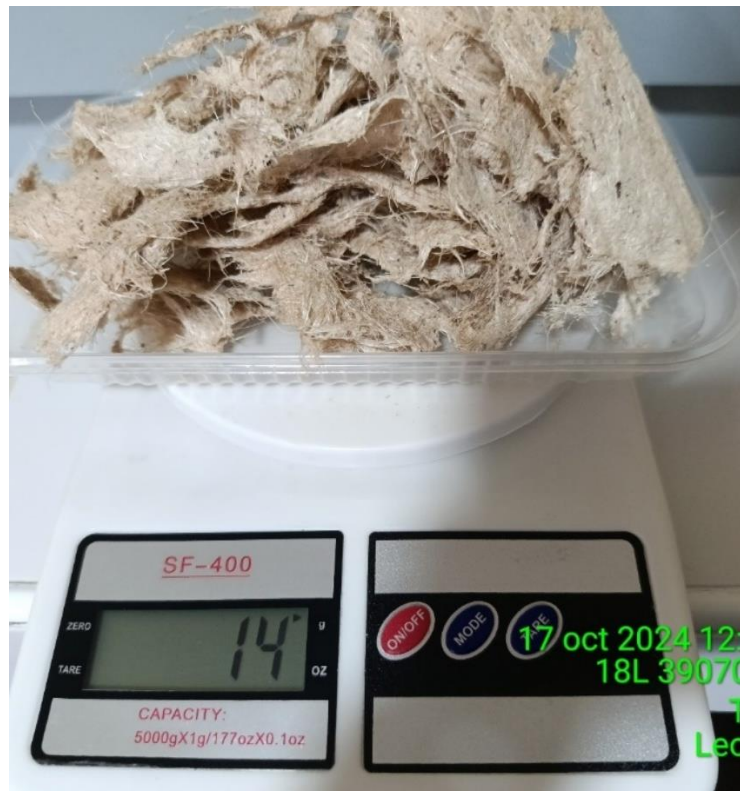


Figura 10. Peso de la muestra seca del pseudotallo de plátano obtenida después de triturado.



Figura 11. Molienda de la muestra seca del pseudotallo de plátano.



Figura 12. Tamizado de la muestra seca del pseudotallo de plátano.



Figura 13. Preparación de las concentraciones de azul de metileno en agua destilada.



Figura 14. Ajuste del pH de las concentraciones de azul de metileno en agua destilada.



Figura 15. Concentraciones de azul de metileno en agua destilada de 2mg/L, 5mg/L y 8mg/L.

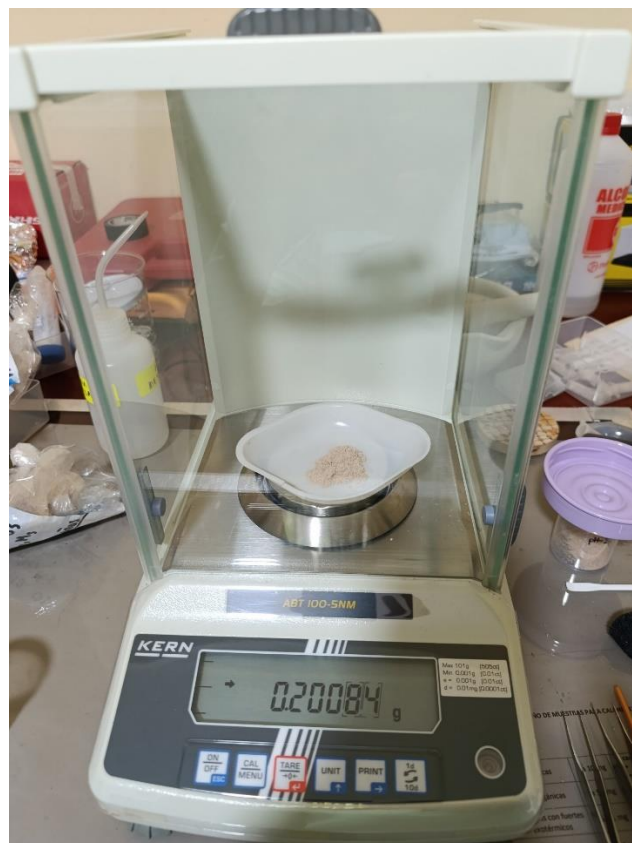


Figura 16. Peso de la dosis de muestra seca del pseudotallo de plátano (adsorbente).



Figura 17. Agitación de los tratamientos con diferentes dosis de adsorbente.

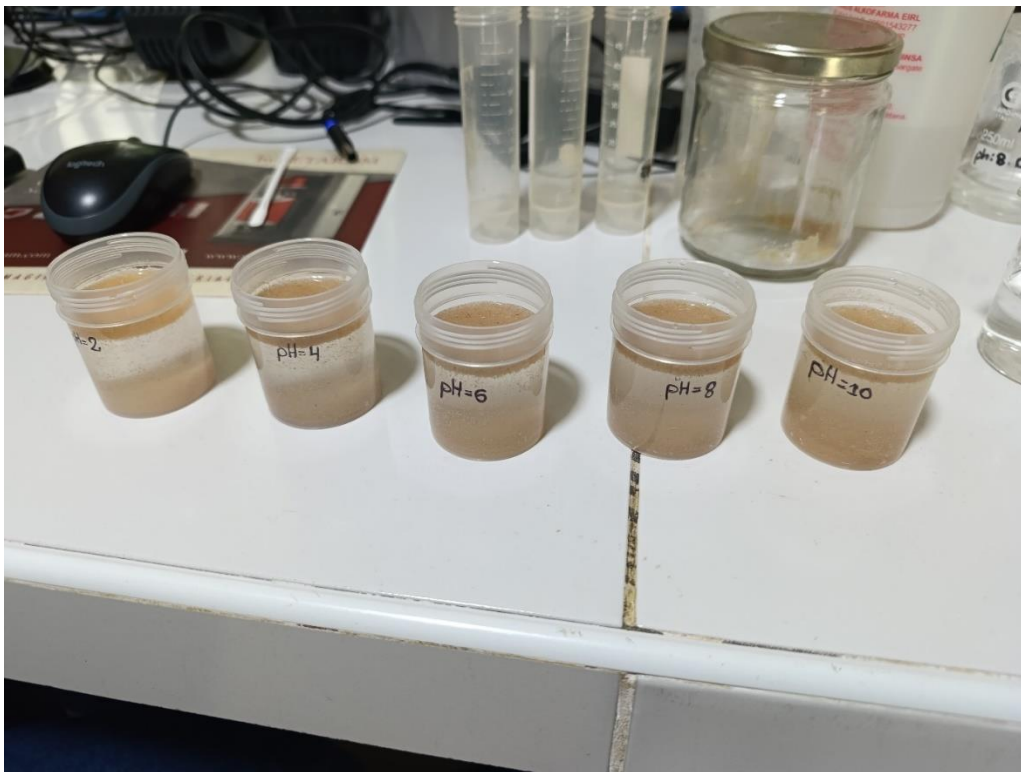


Figura 18. Resultados de la agitación de los diferentes tratamiento.