

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EFFECTO DE COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIEDADES

***Musa paradisiaca* (PLÁTANO) EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA DE**

LABORATORIO, 2024

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

FRANS SHENONE MEZA AGUIRRE

Asesor

DR. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°138-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de noviembre de 2025, a horas 08:20 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFECTO DE COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIEDADES *Musa paradisiaca* (PLÁTANO) EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA DE LABORATORIO, 2024”

Presentado por el Bachiller: **MEZA AGUIRRE, FRANS SHENONE** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “BUENA”.

En consecuencia, el 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, 11 de diciembre de 2025

Ing. MSc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**
PRESIDENTE

Ing. MSc. **SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO**
MIEMBRO



Blgo. MSc. **CESAR AUGUSTO GOZME SULCA**
MIEMBRO

Dr. **LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO**
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 427 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico 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% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFFECTO DE COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIETADES <i>Musa paradisiaca</i> (PLÁTANO) EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA DE LABORATORIO, 2024	FRANS SHENONE MEZA AGUIRRE	03 % Tres	Menor a 20 %

Tingo María, 24 de diciembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
VICERECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”
“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Recursos Naturales Renovables
Escuela profesional	: Ingeniería Ambiental
Título del proyecto	: Efecto de coagulante/floculante a partir de dos variedades <i>Musa paradisiaca</i> (plátano) en agua contaminada a escala de laboratorio, 2024
Objetivo general	: Determinar el efecto de coagulante/floculante a partir de dos variedades <i>Musa paradisiaca</i> (plátano) en agua contaminada a escala de laboratorio, 2024
Autor	: Br. Frans Shenone Meza Aguirre
DNI	: 76787337
Correo Electrónico	: frans.meza@unas.edu.pe
Asesor	: Dr. Luis Eduardo Oré Cierzo
Área de investigación	: CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL - PIBIOT
Grupo de investigación	: CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL
Línea(s) de investigación	: TECNOLOGÍA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Análisis de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Fecha de inicio	: 27 de febrero del 2024
Fecha de término	: 27 de agosto del 2024
Presupuesto	: S/.7.688,50
Financiamiento	: Propio (X) FEDU () Externo ()

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EFFECTO DE COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIEDADES

Musa paradisiaca (PLÁTANO) EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA DE LABORATORIO, 2024

Autor	: Frans Shenone Meza Aguirre
Asesor	: Dr. Luis Eduardo Oré Cierro
Programa de investigación	: CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL - PIBIOT
Línea(s) de investigación	: Tecnología para reducir la contaminación
Eje temático de investigación	: Reducción de la contaminación del agua
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Análisis de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración	: Inicio: 27 de febrero del 2024 : Terminó: 27 de agosto del 2024
Financiamiento	: Propio.
Monto	: S/. 7.688,50

Tingo María – Perú

2025

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Su infinita misericordia, sabiduría y amor me han permitido superar los desafíos y continuar con fe y esperanza. A Él le agradezco por brindarme la oportunidad y la fuerza necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes siempre han sido mi pilar y fuente inagotable de inspiración. Su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y su apoyo constante han sido fundamentales en mi vida. Este logro es tan suyo como mío, pues sin su dedicación y confianza, este sueño no habría sido posible.

A mis hermanos, por su compañía incondicional y por estar siempre a mi lado. Su apoyo, sus palabras de aliento y su presencia han sido una motivación invaluable en este proceso. Este logro también les pertenece, pues forman parte esencial de mi vida y de este triunfo que hoy celebro con el corazón lleno de gratitud.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta investigación. Este proyecto ha sido un viaje lleno de aprendizaje y descubrimientos, y no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas.

Agradezco profundamente a la institución educativa que me brindó una formación académica de calidad, la cual ha sido fundamental para mi desarrollo profesional. Esta institución ha sido el pilar de mi crecimiento y aprendizaje, proporcionándome las herramientas necesarias para enfrentar los retos que se presentaron durante esta investigación.

A mi asesor, le agradezco por su apoyo incondicional, su guía experta y por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo, y su orientación me ha permitido alcanzar este logro.

A mis amigos, les agradezco enormemente por su colaboración en la ejecución y redacción de este proyecto. Su ayuda fue crucial para llevar a cabo esta investigación de manera exitosa, y su amistad ha sido un apoyo constante en todo momento.

A mis jurados, agradezco por su tiempo, esfuerzo y valiosas observaciones durante el proceso de evaluación. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido este trabajo, permitiéndome mejorar y alcanzar los estándares que se esperaban.

Muchas gracias y que Dios les bendiga.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Antecedentes internacionales	4
2.1.2. Antecedentes nacionales	5
2.1.3. Antecedentes locales	5
2.2. Marco Teórico	6
2.2.1. Contaminación natural del agua	6
2.2.2. Proceso de coagulación–floculación	7
2.2.3. Parámetros fisicoquímicos del agua y estándares de calidad	8
2.2.4. El plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	9
2.3. Marco conceptual	10
2.3.1. Contaminación del agua	10
2.3.2. Coagulación y floculación	10
2.3.3. Coagulante natural	11
2.3.4. Floculante natural	11
2.3.5. Turbidez	11
2.3.6. Conductividad eléctrica (CE)	11
2.3.7. Oxígeno disuelto (OD)	12
2.3.8. pH	12
2.3.9. Metales pesados: Cadmio (Cd) y Plomo (Pb)	12
2.3.10. Remoción de turbidez	12
2.3.11. <i>Musa paradisiaca</i> (plátano)	13
2.3.12. Eficiencia del coagulante/floculante natural	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Lugar de ejecución	14
3.1.1. Ubicación política	14
3.1.2. Ubicación geográfica	15
3.1.3. Aspectos climáticos	15

3.2. Materiales y equipos	15
3.2.1. Materiales	15
3.2.2. Equipos	16
3.3. Criterio de investigación	17
3.3.1. Nivel de investigación	17
3.3.2. Tipo de investigación	17
3.3.3. Método de investigación	17
3.3.4. Variable de investigación	18
3.3.5. Operacionalización de variables	18
3.3.6. Diseño de investigación	19
3.3.7. Población y muestra	20
3.3.8. Técnicas e instrumentos de investigación	20
3.3.9. Análisis de datos	20
3.4. Metodología	21
3.4.1. Extracción del coagulante-floculante a partir de los órganos vegetativos de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	21
3.4.2. Parámetros fisicoquímicos, cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)	23
3.4.3. Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente	25
3.4.4. Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en las propiedades químicas del agua contaminada naturalmente	27
3.4.5. Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en el cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente	28
3.4.6. Eficiencia de remoción de turbiedad empleando coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en agua contaminada naturalmente	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32

4.1.	Extracción del coagulante-floculante a partir de los órganos vegetativos de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	32
4.1.1.	Producción de coagulante-floculante a partir de la hoja de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	32
4.1.2.	Producción de coagulante-floculante a partir del pseudotallo de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	34
4.1.3.	Producción de coagulante-floculante a partir de la cáscara del fruto de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	36
4.1.4.	Producción de coagulante-floculante a partir del fruto de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	38
4.2.	Parámetros fisicoquímicos, cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)	40
4.3.	Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente	43
4.3.1.	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente	43
4.3.2.	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente	50
4.3.3.	Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente	58
4.4.	Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente	78
4.4.1.	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente	78
4.4.2.	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente	83
4.4.3.	Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente	89

4.5.	Efectos del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en el cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente	100
	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa</i>	
4.5.1.	<i>paradisiaca</i> L. en los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente	100
	Comportamiento del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> en	
4.5.2.	los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente	106
	Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de	
4.5.3.	<i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente	113
	Eficiencia de remoción de turbiedad empleando coagulante-floculante a	
4.6.	partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> en agua contaminada naturalmente	124
V.	CONCLUSIONES	147
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	148
VII.	REFERENCIAS	149
	ANEXO	160

ÍNDICES DE TABLAS

	Página
1. Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua de consumo humano – Perú (MINAM, 2017)	9
2. Operacionalización de las variables de investigación	18
3. Análisis de varianza por factor e interacción del diseño factorial (2×4×4, 3 repeticiones)	19
4. Parámetros fisicoquímicos del agua de la quebrada Córdova	24
5. Parámetros de metales pesados (Cd y Pb) en el agua de la quebrada Córdova	25
6. Parámetros fisicoquímicos del agua contaminada natural de la quebrada Córdova	42
7. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L.y las interacciones entre biomasa y dosis en los parámetros físicos	44
8. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis en los parámetros físicos	51
9. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros físicos	59
10. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros físicos	61
11. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro Turbiedad	64
12. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro conductividad eléctrica	67
13. Modelo global del comportamiento de la turbiedad del coagulante-floculante a partir de la especie <i>Musa paradisiaca</i> L.	69
14. Modelo global del comportamiento de la turbiedad del coagulante-floculante a partir de la especie <i>Musa sp.</i>	71
15. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L.y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros químicos	79
16. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros químicos	85
17. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros químicos	91
18. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros químicos	93
19. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro oxígeno	95

	disuelto	
20.	Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro pH	97
21.	Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros: cadmio y plomo	101
22.	Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros: cadmio y plomo	108
23.	Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros inorgánicos	114
24.	Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros inorgánicos	116
25.	Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro cadmio	119
26.	Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro plomo	121
27.	Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetro: remoción de turbiedad	126
28.	Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza del parámetro remoción de turbiedad	132
29.	Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros inorgánicos	134
30.	Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro remoción de turbiedad	136
31.	Modelo global del comportamiento de la remoción de turbiedad por el coagulantefloculante a partir de la especie <i>Musa paradisiaca</i> L	138
32.	Modelo global del comportamiento de la remoción de turbiedad por el coagulantefloculante a partir de la especie <i>Musa sp.</i>	140
33.	Datos obtenidos del experimento con test de jarras y utilización de coagulante	161

ÍNDICES DE FIGURAS

	Página
1. Mecanismo de coagulación-floculación	8
2. Mapa de ubicación política	14
3. Diseño factorial de 2x4x4 con tres repeticiones	19
4. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir de hojas de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	33
5. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir del pseudotallo de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	35
6. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir de la cáscara de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	37
7. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir del fruto de <i>Musa paradisiaca</i> L. y <i>Musa sp.</i>	39
8. Comportamiento de la turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	47
9. Comportamiento de la conductividad eléctrica al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	49
10. Comportamiento de la turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	55
11. Comportamiento de la conductividad eléctrica al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	57
12. Efecto del factor A: especie de plátano en la turbiedad	72
13. Efecto del factor B: parte de la biomasa del plátano en la turbiedad	73
14. Efecto del factor C: dosis del coagulante-floculante del plátano en la turbiedad	74
15. Efecto de la interacción AxB: especie x bioma del plátano en la turbiedad	74
16. Efecto de la interacción AxC: especie x dosis del plátano en la turbiedad	75
17. Efecto de la interacción BxC: biomasa x dosis del plátano en la turbiedad	76
18. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la turbiedad	76
19. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la conductividad eléctrica	77
20. Comportamiento del oxígeno disuelto al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	81

21.	Comportamiento del pH al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	83
22.	Comportamiento del oxígeno disuelto al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	87
23.	Comportamiento del pH al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	89
24.	Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el oxígeno disuelto	99
25.	Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el pH	99
26.	Comportamiento del cadmio al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	104
27.	Comportamiento del plomo al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	106
28.	Comportamiento del cadmio al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> Y las interacciones entre biomasa y dosis	110
29.	Comportamiento del plomo al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	112
30.	Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el cadmio	123
31.	Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el plomo	123
32.	Comportamiento de la remoción de turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i> L. y las interacciones entre biomasa y dosis	129
33.	Comportamiento de la remoción de turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de <i>Musa sp.</i> y las interacciones entre biomasa y dosis	131
34.	Efecto del factor A: especie de plátano en la remoción de turbiedad	141
35.	Efecto del factor B: parte de la biomasa del plátano en la remoción de turbiedad	142
36.	Efecto del factor C: dosis del coagulante-floculante del plátano en la remoción de turbiedad	142
37.	Efecto de la interacción AxB: especie x bioma del plátano en la remoción de turbiedad	143
38.	Efecto de la interacción AxC: especie x dosis del plátano en la remoción de turbiedad	144

39.	Efecto de la interacción BxC: biomasa x dosis del plátano en la remoción de turbiedad	145
40.	Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la remoción de turbiedad	146
41.	Recolección de muestras de biomasa de plátano	170
42.	Recolección de muestras de agua de la quebrada Córdova -BRUNAS	170
43.	Pesado de las muestras de fruto de plátano	171
44.	Pesado de las muestras de hoja de plátano	171
45.	Pesado de las muestras de pseudotallo de plátano	172
46.	Pesado de las muestras de cáscara de plátano	172
47.	Pesado del coagulante-coagulante	173
48.	Experimento con test de jarra	173
49.	Medición de parámetros fisicoquímicos del agua	174
50.	Medición de parámetros inorgánicos	174
51.	Muestras de agua inicial antes del experimento	175
52.	Muestras de agua después del experimento	175

RESUMEN

El estudio evaluó el efecto del coagulante/floculante natural obtenido de dos variedades de plátano (*Musa paradisiaca* L. – bellaco y *Musa* sp. – seda) sobre la remoción de turbidez, metales pesados y parámetros fisicoquímicos del agua contaminada de la quebrada Córdova, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), Tingo María – Perú. La investigación fue de tipo experimental con diseño factorial 2×4×4, considerando la variedad, parte de la biomasa (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) y dosis (0,00; 0,01; 0,04 y 0,07 g/L).

El biocoagulante se obtuvo por secado, molienda y extracción acuosa, obteniendo soluciones ricas en mucílagos y pectinas. El agua inicial presentó valores de turbidez (96,4 NTU), conductividad eléctrica (298,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$), cadmio (0,005 mg/L) y plomo (0,016 mg/L), superiores a los Estándares de Calidad Ambiental (MINAM, 2017).

Los coagulantes naturales redujeron significativamente ($p < 0,05$) la turbidez, metales y conductividad eléctrica. La combinación *Musa* sp. × pseudotallo × 0,01 g/L alcanzó las mayores eficiencias: 60 % en turbidez, 65 % en cadmio y 72 % en plomo, manteniendo pH neutro (7,2) y oxígeno disuelto (5,9 mg/L). El pseudotallo del plátano seda evidenció la mayor capacidad coagulante por su composición fibrosa y abundancia de grupos funcionales (–OH y –COOH). Se concluye que representa una alternativa ecológica y sostenible para el tratamiento de aguas turbias en comunidades rurales amazónicas.

Palabras clave: coagulación natural; *Musa paradisiaca*; pseudotallo; turbidez; metales pesados.

ABSTRACT

In the study, the effect of a natural coagulant/flocculant obtained from two varieties of plantain (*Musa paradisiaca* L. – plantain and *Musa* sp. – banana) was evaluated for the removal of turbidity, heavy metals and physicochemical parameters from the contaminated water in the Cordova watershed, located in the Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS – acronym in Spanish), Tingo María, Peru. The research was of an experimental type with a 2×4×4, taking the variety, part of the biomass (peel, pseudo stalk, leaf, and fruit) into account, as well as the dose (0.00, 0.01, 0.04, and 0.07 g/L).

The bio coagulant was obtained through drying, grinding and doing aqueous extraction, where solutions rich in mucilage and pectin were obtained. The initial water presented turbidity values (96.4 NTU), electrical conductivity (298.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$), cadmium (0.005 mg/L), and lead (0.016 mg/L), that surpassed the environmental quality standards (MINAM, 2017).

The natural coagulants significantly reduced the turbidity, metals and electrical conductivity ($p < 0.05$). The greatest efficiencies were obtained with the *Musa* sp. × pseudo stalk × 0.01 g/L combination: 60 % for the turbidity, 65 % for the cadmium and 72 % for the lead; maintaining a neutral pH (7.2) and dissolved oxygen (5.9 mg/L). The pseudo stalk from the banana revealed a greater coagulation capacity due to its fibrous composition and abundance of functional groups (–OH and –COOH).

It was concluded that [these options] represent an ecological and sustainable alternative for the treatment of murky waters in rural Amazon communities.

Keywords: natural coagulation, *Musa paradisiaca*, pseudo stalk, turbidity, heavy metals

I. INTRODUCCIÓN

La degradación de la calidad del agua es uno de los principales problemas ambientales en la región Huánuco, especialmente en el distrito de Rupa Rupa. Allí, la descarga de aguas residuales domésticas y el arrastre de sedimentos incrementado por las lluvias afectan cuerpos hídricos como las quebradas del Bosque Reservado de la UNAS (Naranjal, Córdova, Cocheros, Del Águila, Saldaña), el río Huallaga y otros cursos de agua de caseríos y centros poblados. Durante la época de avenida, estos cuerpos presentan altos niveles de turbidez, sólidos suspendidos y materia orgánica, lo que los vuelve inadecuados para consumo y uso doméstico (Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, 2023). Este deterioro refleja procesos de contaminación tanto puntual como difusa, agravados por la ausencia de sistemas apropiados de tratamiento y la persistencia de vertimientos sin control (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2022).

Entre las causas de este escenario destaca el limitado acceso a tecnologías de tratamiento en comunidades rurales y el alto costo de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio o el policloruro de aluminio (PAC). Aunque eficaces, estos insumos generan residuos secundarios, alteran el pH del agua tratada y resultan económicamente poco sostenibles para poblaciones rurales (Pérez et al., 2021). En zonas como Tingo María y sus alrededores, donde la población depende de fuentes naturales, el uso de insumos químicos no es una opción ambiental ni económicamente viable (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

Ante ello, se han fortalecido las investigaciones orientadas a alternativas naturales utilizando especies vegetales locales como agentes coagulantes o floculantes. El *Musa paradisiaca* (plátano), ampliamente cultivado en el valle del Alto Huallaga y en toda la Amazonía peruana, representa una opción prometedora por su disponibilidad, bajo costo y contenido de compuestos bioactivos como polisacáridos y proteínas con carga positiva que pueden neutralizar los coloides del agua turbia (Torres et al., 2020). Cada año se generan grandes cantidades de residuos de este cultivo (cáscaras, pseudotallos, hojas), los cuales suelen desecharse sin tratamiento y contribuyen a la contaminación del entorno (Municipalidad Distrital de Castillo Grande, 2023). Su transformación en coagulantes mediante procesos sencillos como secado, molienda y extracción acuosa podría ofrecer una alternativa ecoeficiente para la purificación del agua y, al mismo tiempo, un método de valorización de residuos agrícolas.

La problemática hídrica actual también se manifiesta en un aumento de enfermedades

gastrointestinales, menor disponibilidad de agua segura y pérdida de confianza de la población en las fuentes naturales (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2022). Además, la mala calidad del agua impacta negativamente en los ecosistemas acuáticos y en la productividad agrícola (MINAM, 2020). De mantenerse esta tendencia, la región enfrentará mayores riesgos sanitarios y ambientales, especialmente en un contexto de cambio climático (Banco Mundial, 2023).

Por ello, evaluar el efecto coagulante y floculante de extractos naturales obtenidos de dos variedades de *Musa paradisiaca* en agua contaminada a escala de laboratorio constituye una necesidad tanto científica como social. Este estudio permitirá determinar su eficiencia en la reducción de turbidez, color y materia orgánica, así como su potencial para sustituir a los coagulantes químicos en comunidades rurales. Además, contribuye al uso sostenible de recursos agroforestales locales y a la valorización de subproductos agrícolas, en línea con los principios de economía circular (García et al., 2022).

La justificación del estudio abarca aspectos prácticos, teóricos, ambientales y sociales. Es práctico porque propone una alternativa económica y ecológica para remover contaminantes utilizando residuos de plátano sin valor actual. Es teórico porque contribuye al conocimiento sobre biopolímeros naturales como coagulantes, un campo en expansión dentro de la ingeniería ambiental. También tiene una dimensión ambiental y social, al reducir la dependencia de químicos importados y fomentar la adopción de tecnologías limpias en comunidades rurales (Bhuptawat et al., 2021). Finalmente, posee pertinencia institucional al alinearse con las líneas de investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva enfocadas en el aprovechamiento de residuos agroindustriales y la protección de los recursos hídricos. En conjunto, el estudio pretende evidenciar que los biocoagulantes derivados de *Musa paradisiaca* pueden ser eficientes, sostenibles y coherentes con la realidad socioeconómica amazónica, promoviendo una gestión hídrica basada en innovación, economía circular y conocimiento local.

La presente investigación tiene como formulación del problema ¿Qué efectos produce el coagulante/floculante a partir de dos variedades *Musa paradisiaca* (plátano) en agua contaminada a escala de laboratorio, 2024?, y como hipótesis se tiene que el coagulante/floculante a partir de dos variedades *Musa paradisiaca* (plátano) produce efectos significativos en agua contaminada a escala de laboratorio, 2024. Y de acuerdo al problema e hipótesis se plantean los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Determinar el efecto de coagulante/floculante a partir de dos variedades *Musa paradisiaca* (plátano) en agua contaminada a escala de laboratorio, 2024

1.2. Objetivos específicos

- Extraer el coagulante-floculante a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L y *Musa sp.*
- Analizar los parámetros fisicoquímicos, cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)
- Evaluar los efectos del coagulante-floculante a partir de la *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente mediante test de jarras
- Evaluar los efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en las propiedades químicas del agua contaminada naturalmente mediante test de jarras
- Evaluar los efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en el cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente mediante test de jarras
- Determinar la eficiencia de remoción de turbiedad empleando coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en agua contaminada naturalmente

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Diversos estudios confirman que biopolímeros y extractos del plátano pueden reducir significativamente la turbidez y la carga orgánica. En un ensayo controlado, extractos de cáscara de *Musa paradisiaca* lograron remociones de turbidez >83% en un amplio rango de pH, con máximos cercanos a 98% a pH alcalino, evidenciando estabilidad operativa y potencial de sustitución de sales metálicas (Daverey et al., 2019). Complementariamente, una evaluación en agua de río reportó 76–84% de remoción con polvo de cáscara (modificado y sin modificar), además de disminuciones de color y sólidos, sustentando la acción de grupos funcionales detectados por SEM/FT-IR (Azamzam et al., 2022). Más recientemente, un trabajo en AQUA-IWA comparó polvo de cáscara de banano con semillas de Moringa, mostrando remoción conjunta de turbidez y TDS en agua de río, lo que posiciona al plátano como coagulante competitivo en matrices naturales (Wolde et al., 2024). En línea con lo anterior, una revisión metodológica y de desempeño reportó que residuos frutales—incluida *Musa paradisiaca*—son plataformas viables para coagulantes vegetales bajo esquemas de economía circular (Sharma et al., 2025). En la frontera de mejora de desempeño, la obtención de “nano-biocoagulantes” a partir de cáscara de plátano incrementó la eficiencia de clarificación con dosis optimizadas por debajo de 0,5 g/L, apuntando a escalabilidad con menores huellas de dosificación (Dharsana et al., 2024). Además del uso de cáscara, el jugo del pseudotallo ha mostrado ser un coagulante eficaz: con pretratamiento enzimático se incrementa la estabilidad y se favorece la remoción de turbidez y sólidos, ampliando el espectro de fracciones aprovechables del cultivo (Gupta et al., 2024). Resultados similares se documentaron con coagulante a partir de tallo de banano, con remociones altas de turbidez y parámetros asociados, lo que robustece el portafolio de subproductos útiles del Musa (Tiruneh et al., 2023; Nwanisobi & Obiora-Okafo, 2018). En contextos industriales, la aplicación de jugo del tallo removió hasta ~98% de turbidez y >80% de SS/COD en efluentes específicos, validando su rol como pretratamiento antes de etapas secundarias (Chandrakala et al., 2012/2013; ver también compilaciones posteriores). También se han desarrollado coadyuvantes a partir de almidón de cáscara de plátano (acetilado) que mejoran la coagulación de aguas crudas, ensanchando el campo de “biocoagulantes modificados” (Cortés-Pérez et al., 2023). En pruebas de laboratorio sobre aguas sintéticas y de proceso, varios grupos han optimizado pH, gradientes de mezcla y dosis para cáscara de Musa, con eficiencias del 70–90% en turbidez y mejoras en DQO/DBO₅, consolidando protocolos de

jar-test adaptables (Abioye et al., 2019; Omar et al., 2019; AIP, 2024). Finalmente, estudios comparativos frente a otros biocoagulantes (p. ej., papa, yuca) han mostrado que la fracción de plátano iguala o supera remociones de color y turbidez en diferentes rangos de NTU, aportando evidencia comparativa clave para la selección tecnológica (Carrasquero, 2017).

2.1.2. Antecedentes nacionales

En el país, la literatura aplicada al uso de plátano como coagulante ha crecido en repositorios universitarios. Un estudio en Lima evaluó cáscara de plátano Bellaco Hartón para clarificar aguas de los Pantanos de Villa, determinando condiciones de pH y dosis que maximizan la reducción de turbidez; el trabajo se cita reiteradamente en bases nacionales (Arenas Palacios, 2024; ficha Alicia-CONCYTEC). En Matucana (cuenca del Rímac), se exploró el uso de *Musa paradisiaca* como coagulante en aguas residuales locales, con resultados favorables que motivan su escalado (Guerra Atauje, 2021). En Lambayeque, se probó cáscara de plátano (y pepa de uva) para mejorar turbidez, DBO₅, DQO y coliformes en agua de dren agrícola, reportando efectos positivos con optimización de tiempo y concentración (Purisaca Enríquez, 2020). En Cusco, un estudio sobre el río Conde Pampa contrastó cáscara de papa y de plátano para remover DBO₅/DQO por coagulación natural, confirmando la pertinencia de biocoagulantes locales en ríos andinos (Huayhua Laime & Gutiérrez Solís, 2022). Asimismo, una revisión/tesis peruana reciente compila evidencia donde el residuo vegetal de plátano emerge como el mejor coagulante entre alternativas evaluadas (Villanueva Valderrama, 2024). En paralelo, trabajos peruanos han comparado coagulantes/floculantes (químicos y naturales) en aguas de ríos, destacando al plátano dentro del conjunto de opciones vegetales (Oré et al., 2023). Por su parte, ensayos con coagulantes naturales de tuna y plátano verificaron dosis óptimas cercanas a 200 mg/L y remociones casi completas de turbidez en matrices de laboratorio, lo que apunta a diseños de bajo costo para ámbitos rurales (Campos Alfaro & Ferrer, 2023). Finalmente, aunque más centrado en adsorción, el uso de almidón de cáscara de plátano para remover metales en matrices mineras ilustra la riqueza funcional del residuo, útil como base de coagulantes/coadyuvantes (Romero Quispe, 2019).

2.1.3. Antecedentes locales

En la región Huánuco, particularmente en la zona de Tingo María, se vienen desarrollando investigaciones orientadas al aprovechamiento de biocoagulantes naturales en el tratamiento de aguas contaminadas, con resultados altamente promisorios para la sustitución de productos químicos convencionales. Guevara Maluquis (2025) evaluó el efecto de los coagulantes/floculantes naturales obtenidos de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (Sangre

de grado) en aguas de la quebrada Córdova, logrando reducciones superiores al 90 % en turbidez y sólidos suspendidos totales, así como mejoras en la DQO y DBO₅. Su estudio confirmó la efectividad y sostenibilidad de dichos extractos vegetales como alternativas ecológicas aplicables en zonas tropicales. En una línea complementaria, Ruiz Ramírez (2023) simuló condiciones de turbidez natural mediante caolín para analizar la eficiencia coagulante del extracto de *Aloe vera* en comparación con el sulfato de aluminio en aguas del río Huallaga, río Monzón y quebrada Naranjal. El autor determinó dosis óptimas de 0,1 a 0,4 mL de extracto por 500 mL de muestra, alcanzando los mayores porcentajes de remoción de turbidez y validando matemáticamente la aplicabilidad del modelo de superficie de respuesta, con un índice de sesgo de 0,855 y un índice de exactitud de 1,169. Estos resultados evidencian el potencial de coagulantes naturales adaptados a las características fisicoquímicas de los cuerpos de agua amazónicos. Asimismo, Duran Castro (2021) demostró la eficiencia combinada de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) y la semilla de *Moringa oleifera* en la reducción de turbidez del agua en la JASS de Vichaycoto, Huánuco, alcanzando niveles de remoción que validan la factibilidad de implementar tratamientos naturales en sistemas rurales. Díaz (s.f.) aplicó almidón de yuca en la quebrada Yuncash (Lauricocha), logrando disminuciones superiores al 70 % en turbidez y color, mientras que Arroyo Tacuchi (2023) utilizó resina de plátano para la estabilización de materiales constructivos frente a la humedad, demostrando las propiedades adhesivas e hidrofóbicas del *Musa sp.* que podrían aprovecharse en procesos de coagulación. En conjunto, estos antecedentes locales confirman el potencial técnico y ambiental del uso de biopolímeros naturales —particularmente de especies amazónicas como *Croton*, *Aloe*, *Opuntia*, *Manihot* y *Musa*— para el tratamiento de aguas superficiales, constituyendo un marco experimental sólido que sustenta el presente estudio orientado al aprovechamiento del plátano (*Musa paradisiaca*) como coagulante/floculante natural en la provincia de Leoncio Prado.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Contaminación natural del agua

La contaminación natural del agua en ecosistemas fluviales amazónicos —como las quebradas y ríos de Huánuco— se origina principalmente por el arrastre de sedimentos, materia orgánica, y compuestos minerales durante la época de avenida. Las lluvias intensas incrementan la escorrentía superficial, transportando sólidos suspendidos, coloides y nutrientes desde las zonas agrícolas hacia los cuerpos receptores (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2022). En las quebradas, el fenómeno de turbulencia aumenta la turbidez y disminuye la penetración de

luz, afectando los procesos biológicos y el equilibrio ecológico acuático (MINAM, 2020). Por otro lado, en los **ríos**, la presencia de sólidos finos, coloides y contaminantes orgánicos contribuye a la reducción del oxígeno disuelto (OD) y al incremento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), parámetros que reflejan el grado de contaminación y degradación de la calidad del agua (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2022).

En la región de Leoncio Prado – Huánuco, las quebradas del distrito de Rupa Rupa y el río Huallaga presentan estos fenómenos de contaminación natural acentuados por descargas domésticas y sedimentación, afectando la disponibilidad de agua segura para consumo humano y uso agrícola (Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, 2023). Este escenario evidencia la necesidad de tecnologías simples y accesibles de tratamiento, basadas en la remoción de partículas coloidales mediante coagulación y floculación, utilizando coagulantes naturales derivados de especies locales.

2.2.2. Proceso de coagulación–floculación

El proceso de coagulación-floculación es una técnica fundamental en el tratamiento de aguas, especialmente en la clarificación de aguas superficiales con alta turbidez. La coagulación consiste en la desestabilización de partículas coloidales cargadas negativamente mediante la adición de sustancias químicas denominadas coagulantes, las cuales neutralizan dichas cargas, permitiendo que las partículas se aglomeren y formen flóculos que sedimentan posteriormente (Metcalf & Eddy, 2014). La eficiencia del proceso depende del pH, la dosis del coagulante, la mezcla rápida y la etapa de floculación, donde los flóculos crecen y se sedimentan (Tiruneh et al., 2023).

Los coagulantes sintéticos más utilizados son las sales de aluminio y hierro, tales como el sulfato de aluminio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] y el cloruro férrico (FeCl_3). Aunque presentan alta eficiencia, generan residuos secundarios, incrementan la acidez del agua tratada y pueden dejar trazas de metales que afectan la salud humana (Pérez et al., 2021). Además, su uso intensivo genera lodos químicos de difícil disposición, incrementando los costos de tratamiento y operación (Dharsana & Jose, 2023).

En contraste, los coagulantes naturales se obtienen de fuentes vegetales, animales o minerales y destacan por su biodegradabilidad, baja toxicidad y disponibilidad local. Ejemplos notables incluyen la semilla de *Moringa oleifera*, la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*), el jugo de *Aloe vera* y las cáscaras o tallos de *Musa paradisiaca* (Gupta et al., 2024). Estudios recientes demostraron que los extractos acuosos y almidones obtenidos de la cáscara y

pseudotallo del plátano presentan cargas catiónicas capaces de neutralizar los coloides y formar flóculos densos, alcanzando remociones de turbidez superiores al 90 % (Azamzam et al., 2022; Tiruneh et al., 2023).

El aprovechamiento de residuos agrícolas como el plátano constituye una alternativa sostenible dentro del marco de la economía circular. Su contenido de polisacáridos, proteínas y almidones modificables permite su uso como coagulante efectivo, económico y ecológico. Ensayos de laboratorio demostraron que el extracto del pseudotallo de *Musa paradisiaca* logra remover turbidez y sólidos suspendidos sin afectar parámetros como el pH o la conductividad eléctrica (Gupta et al., 2024). Además, su aplicación contribuye a reducir la dependencia de insumos químicos importados y promueve la valorización de los residuos agroindustriales locales (Cabrera-Sarmiento et al., 2023).

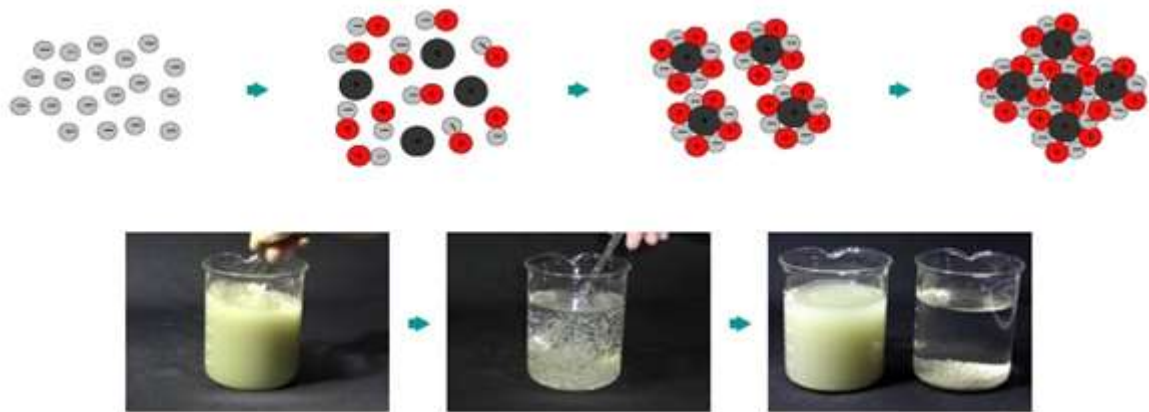


Figura 1. Mecanismo de coagulación-floculación
Fuente: Recuperado de Nihonkasetu (2017)

2.2.3. Parámetros fisicoquímicos del agua y estándares de calidad

Los parámetros fisicoquímicos del agua constituyen indicadores esenciales para evaluar su calidad y el grado de contaminación. Entre los más relevantes se encuentran la turbidez, la conductividad eléctrica (CE), el oxígeno disuelto (OD), el pH, y los metales pesados como cadmio (Cd) y plomo (Pb). Estos parámetros son regulados por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua establecidos en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017), los cuales determinan los límites máximos permisibles según el uso del recurso (consumo humano, recreativo, agrícola, entre otros).

La turbidez se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) y mide la dispersión de la luz causada por partículas suspendidas en el agua. Valores superiores a 5 NTU reducen la calidad visual y afectan la desinfección (MINAM, 2017). La conductividad eléctrica

refleja la cantidad de iones disueltos ($\mu\text{S}/\text{cm}$), asociada a sales y minerales, mientras que el oxígeno disuelto (mg/L) representa la capacidad del agua para sostener la vida acuática. El pH mide la acidez o alcalinidad, siendo el rango ideal para agua potable entre 6,5 y 8,5. Los metales pesados como el cadmio y el plomo son tóxicos incluso en concentraciones bajas, pudiendo afectar la salud renal y neurológica (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

Tabla 1. Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua de consumo humano – Perú (MINAM, 2017)

Parámetro	Unidad	Valor Máximo Permitido (ECA)
Turbidez	NTU	≤ 5
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	≤ 1500
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 5
pH	—	6.5 – 8.5
Cadmio (Cd)	mg/L	≤ 0.003
Plomo (Pb)	mg/L	≤ 0.01

Fuente: Adaptado de MINAM (2017), Estándares de Calidad Ambiental para Agua – Categoría A1 (Consumo Humano)

La remoción de turbidez mediante coagulantes naturales se evalúa comparando los valores iniciales y finales después del tratamiento. En diversos estudios, extractos vegetales como los de *Musa paradisiaca* alcanzaron eficiencias entre 80 % y 95 % de reducción de turbidez, demostrando su potencial técnico frente a coagulantes químicos (Azamzam et al., 2022; Oré Cierro et al., 2023).

2.2.4. El plátano (*Musa paradisiaca*)

El plátano (*Musa paradisiaca*) pertenece a la familia Musaceae y constituye uno de los cultivos tropicales más importantes de la Amazonía peruana, tanto por su valor alimenticio como por su potencial en la elaboración de bioproductos. La planta está conformada por un pseudotallo, hojas, racimos y cáscaras, partes que contienen biopolímeros naturales con capacidad de coagulación y adsorción (FAO, 2021).

1) Plátano Bellaco (*Musa paradisiaca* L.)

El plátano Bellaco es una variedad robusta y rica en almidón, ampliamente cultivada en Tingo María y zonas húmedas amazónicas. Su cáscara y pseudotallo contienen lignina, celulosa, hemicelulosa y proteínas con grupos funcionales hidroxilo, carboxilo y amina, que funcionan como centros activos capaces de atraer y neutralizar partículas coloidales (Azamzam

et al., 2022). Tales biopolímeros confieren al Bellaco una notable capacidad coagulante, comparable a sales metálicas, pero sin generar residuos tóxicos ni alterar el equilibrio químico.

2) Plátano Seda (*Musa sp.*)

El plátano Seda, de menor tamaño y textura más suave, presenta un contenido moderado de azúcares, almidones y polisacáridos con capacidad floculante, junto con grupos funcionales activos como hidroxilos, carbonilos y carboxilos, responsables de la neutralización de cargas y la formación de puentes interparticulares (Ng et al., 2021; Adedokun et al., 2020).

Según Cortés-Pérez et al. (2023), los almidones de *Musa sp.* pueden modificarse químicamente para incrementar su eficiencia coagulante, lo que amplía su utilidad en tratamientos de agua. En conjunto, ambas variedades de plátano constituyen una fuente renovable con alto potencial para producir coagulantes naturales, ofreciendo beneficios ambientales, reducción de costos y coherencia con experiencias previas en biocoagulantes vegetales (Arenas Palacios, 2024; Villanueva Valderrama, 2024).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Contaminación del agua

La contaminación del agua se define como la alteración de sus características naturales debido a la incorporación de sustancias físicas, químicas o biológicas que afectan su calidad y restringen su uso para consumo humano o ecosistémico (MINAM, 2020). En zonas amazónicas, las lluvias intensas y la erosión de suelos generan incrementos naturales de turbidez, sólidos suspendidos y carga orgánica, agravados por descargas domésticas o agrícolas (ANA, 2022). Por tanto, el agua de quebradas y ríos presenta características variables que demandan procesos de clarificación y tratamiento adecuados.

2.3.2. Coagulación y floculación

La coagulación es el proceso mediante el cual se desestabilizan las partículas coloidales suspendidas en el agua al agregar un agente coagulante que neutraliza sus cargas eléctricas negativas (Metcalf & Eddy, 2014). Una vez neutralizadas, las partículas se agrupan formando microflóculos que posteriormente crecen y sedimentan en la etapa de floculación, proceso físico en el cual se promueve la unión de las partículas a través de agitación lenta o polímeros naturales (Pérez et al., 2021).

El propósito de la coagulación-floculación es lograr una reducción significativa de la turbidez, materia orgánica, metales y microorganismos, favoreciendo la claridad del agua

tratada (Tiruneh et al., 2023). Los coagulantes pueden clasificarse en sintéticos (sales de aluminio y hierro) y naturales, estos últimos obtenidos de extractos vegetales, biopolímeros o materiales orgánicos biodegradables (Gupta et al., 2024).

2.3.3. Coagulante natural

Un coagulante natural es una sustancia orgánica de origen vegetal, animal o mineral con capacidad para neutralizar las cargas de partículas coloidales en suspensión, facilitando su agregación y sedimentación (Azamzam et al., 2022). A diferencia de los coagulantes químicos, los naturales son biodegradables, no generan subproductos tóxicos y son ambientalmente sostenibles. Los extractos vegetales derivados de cáscaras, tallos o pseudotallos de plantas tropicales contienen biopolímeros como polisacáridos, almidones, proteínas y compuestos fenólicos que poseen grupos funcionales capaces de interactuar con partículas coloidales del agua (Cabrera-Sarmiento et al., 2023). En particular, el *Musa paradisiaca* se destaca por su alto contenido de almidón y hemicelulosa, que le confieren propiedades catiónicas útiles en la coagulación-floculación.

2.3.4. Floculante natural

El floculante natural actúa reforzando el proceso de coagulación, promoviendo la unión y crecimiento de los flóculos. Su función es incrementar el tamaño y peso de las partículas formadas, favoreciendo la sedimentación y la clarificación del agua (Dharsana & Jose, 2023). Los floculantes naturales se obtienen generalmente de extractos de mucílago vegetales, proteínas o polisacáridos, y mejoran la estabilidad del sistema sin alterar parámetros como el pH o la conductividad eléctrica (Oré Cierro et al., 2023).

2.3.5. Turbidez

La turbidez es un parámetro físico que mide el grado de dispersión de la luz en una muestra de agua debido a la presencia de partículas suspendidas. Se expresa en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) y su valor está directamente relacionado con la concentración de sedimentos, arcillas, materia orgánica o microorganismos presentes (MINAM, 2017). Según los estándares peruanos, el límite máximo de turbidez para agua de consumo humano es de 5 NTU.

2.3.6. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica se refiere a la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, determinada por la concentración de iones disueltos, principalmente sales minerales

(Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻). Se mide en microsiemens por centímetro (μS/cm). Valores elevados indican contaminación mineral o presencia de compuestos iónicos, mientras que valores bajos son característicos de aguas blandas o de lluvia (OMS, 2022).

2.3.7. Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es la concentración de oxígeno gaseoso presente en el agua, expresada en miligramos por litro (mg/L). Es un indicador vital del equilibrio ecológico y del nivel de contaminación orgánica, ya que una disminución del OD suele asociarse con procesos de descomposición biológica y eutrofización (OPS, 2022).

2.3.8. pH

El pH mide la acidez o alcalinidad del agua en una escala de 0 a 14. Los valores entre 6.5 y 8.5 son los adecuados para el agua potable (MINAM, 2017). Este parámetro influye en la eficiencia del proceso de coagulación, pues determina la carga superficial de las partículas y la solubilidad de los metales (Gupta et al., 2024).

2.3.9. Metales pesados: Cadmio (Cd) y Plomo (Pb)

Los metales pesados, como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb), son contaminantes inorgánicos tóxicos que pueden estar presentes en fuentes de agua debido a actividades mineras, industriales o por lixiviación natural. Su acumulación representa un riesgo para la salud humana, afectando riñones, sistema nervioso y procesos metabólicos (OMS, 2022). El ECA para agua de consumo humano establece límites máximos de 0.003 mg/L para Cd y 0.01 mg/L para Pb (MINAM, 2017).

2.3.10. Remoción de turbidez

La remoción de turbidez se define como la reducción porcentual de la turbidez inicial del agua luego del proceso de tratamiento. Se calcula mediante la ecuación:

$$\text{Remoción de turbidez (\%)} = \frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100$$

Donde:

T_i representa la turbidez inicial (NTU) y

T_f la turbidez final tras el tratamiento (Metcalf & Eddy, 2014).

Una remoción superior al 80 % indica un proceso eficiente, especialmente en ensayos de jar-test con coagulantes naturales (Azamzam et al., 2022).

2.3.11. *Musa paradisiaca* (plátano)

El plátano (*Musa paradisiaca*) es una planta herbácea de la familia Musaceae, ampliamente cultivada en regiones tropicales y reconocida por generar una biomasa rica en compuestos aprovechables para la coagulación natural. Sus principales subproductos —cáscara, pseudotallo, hoja y fruto— contienen biopolímeros como celulosa, hemicelulosa, lignina, almidón, pectinas y proteínas, los cuales presentan grupos funcionales activos (hidroxilos –OH, carboxilos –COOH, carbonilos C=O, aminas –NH₂ y fenoles) responsables de su capacidad para neutralizar cargas, adsorber coloides y formar flóculos estables (Azamzam et al., 2022; Adedokun et al., 2020).

Estos biopolímeros permiten que el plátano actúe como un coagulante natural comparable a agentes químicos tradicionales, pero con mayor biodegradabilidad y menor toxicidad residual (Simate et al., 2012). Además, estudios recientes indican que el almidón de *Musa* puede modificarse para incrementar su eficiencia coagulante mediante la intensificación de enlaces por puente de hidrógeno y la mejora de la densidad de cargas superficiales (Cortés-Pérez et al., 2023).

En Huánuco destacan dos variedades: el plátano Bellaco (*Musa paradisiaca* L.) y el plátano Seda (*Musa* sp.), ambas caracterizadas por su abundancia local y por poseer matrices lignocelulósicas adecuadas para procesos de clarificación del agua (Cabrera-Sarmiento et al., 2023; Tiruneh et al., 2023). El Bellaco contiene mayores proporciones de polisacáridos y compuestos fenólicos, mientras que el Seda presenta almidones más dispersables, lo que facilita su uso en dosis bajas.

En conjunto, la biomasa del plátano constituye una alternativa renovable, económica y ambientalmente segura para la producción de coagulantes naturales, contribuyendo al manejo sostenible de residuos agrícolas y al tratamiento de aguas turbias en comunidades rurales de la Amazonía.

2.3.12. Eficiencia del coagulante/floculante natural

La eficiencia del coagulante/floculante natural se expresa como el porcentaje de remoción de turbidez, DBOs, DQO u otros parámetros fisicoquímicos, comparando los valores antes y después del tratamiento. Depende de la dosis aplicada, el pH, la velocidad de mezcla y el tipo de contaminante. Coagulantes naturales a base de *Musa paradisiaca* han mostrado eficiencias superiores al 90 % en reducción de turbidez y mejoras significativas en oxígeno disuelto (Oré Cierro et al., 2023; Gupta et al., 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Tingo María, ubicada en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado y departamento de Huánuco, en la región Huánuco, Perú. El estudio se ejecutó en tres espacios vinculados a la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Los ensayos de coagulación y floculación se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, donde se efectuaron los análisis físico-químicos del agua tratada y sin tratar, siguiendo los procedimientos establecidos en los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Asimismo, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela Profesional de Agronomía se desarrollaron las actividades relacionadas con la determinación de los parámetros de cadmio (Cd) y plomo (Pb), mediante los respectivos métodos analíticos validados y también se realizamos el molido y tamizado del coagulante-floculante a partir del plátano.

Finalmente, la toma de muestras de agua se realizó en la bocatoma de la quebrada Córdova, perteneciente al Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), ubicado también en el distrito de Rupa Rupa. Este cuerpo de agua constituye una fuente representativa de la zona por su régimen tropical húmedo y sus variaciones de caudal durante la época de lluvias, condiciones que inciden en la turbidez y calidad natural del recurso hídrico, garantizando la pertinencia de su uso para los fines de esta investigación.

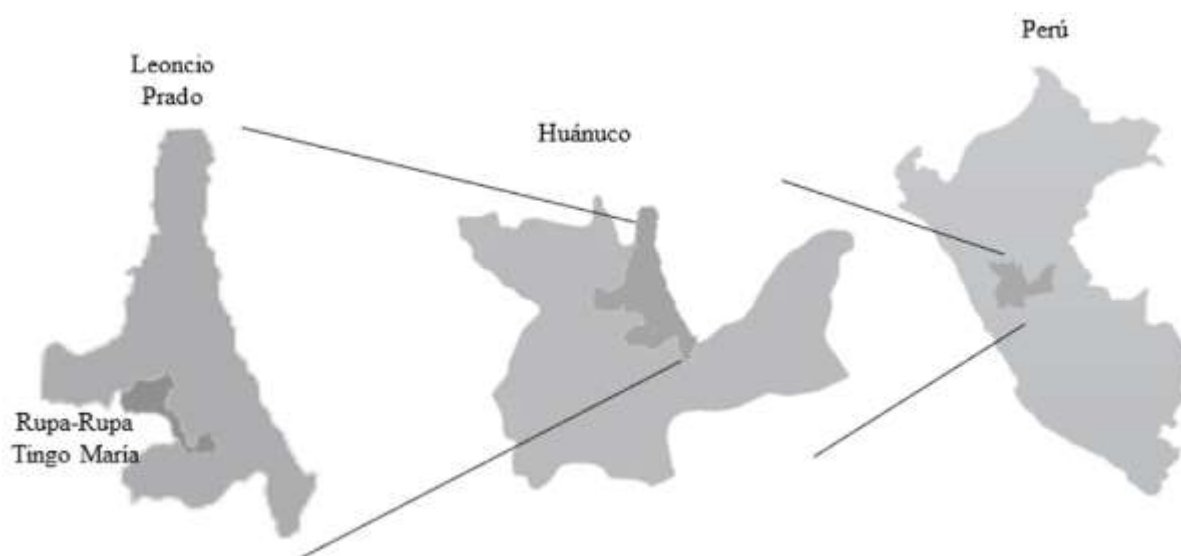


Figura 2. Mapa de ubicación política

3.1.2. Ubicación geográfica

El área de estudio se localiza en la ciudad de Tingo María (distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco). Los puntos de interés se expresan en coordenadas UTM, datum WGS-84, zona 18L: (i) el bloque de laboratorios UNAS que alberga el Laboratorio de Calidad de Agua y el Laboratorio de Suelos se sitúa aproximadamente en E 390 674.97 m; N 8 970 228.15 m; 668 m s. n. m.; y (ii) la bocatoma de la quebrada Córdova (BRUNAS) en E 391 032.69 m; N 8 969 770.89 m; 711 m.s.n.m. Estos puntos se encuentran dentro de un entorno de bosque húmedo tropical con pendientes suaves a moderadas, y distan ~0.6–0.8 km entre sí dentro del ámbito universitario y su zona de influencia inmediata, lo que facilita la logística de muestreo y el traslado de muestras para su análisis en laboratorio.

3.1.3. Aspectos climáticos

El área de estudio se emplaza en la ceja de selva amazónica (Tingo María, distrito de Rupa Rupa) y presenta clima tropical húmedo con temperaturas cálidas todo el año y alta humedad relativa (SENAMHI, 2021; IIAP, 2019). En las series climatológicas de la estación Tingo María, la temperatura media anual se ubica aproximadamente entre 24 y 26 °C, con máximas cercanas a 30–33 °C y mínimas alrededor de 18–22 °C, lo que revela baja amplitud térmica estacional (IGP, s. f.; SENAMHI, 2021). La precipitación anual suele superar los 3 000 mm/año, con picos en la estación lluviosa de enero a marzo y una fase menos lluviosa entre mayo y octubre, sin estación seca definida (SENAMHI, 2021; IIAP, 2019). Según la clasificación climática nacional, la zona corresponde a selva alta muy húmeda, caracterizada por lluvias copiosas y elevada humedad durante gran parte del año (SENAMHI, 2021).

Estas condiciones tienen implicancias directas en la calidad del agua y en el desempeño de los tratamientos evaluados: en época lluviosa, el aumento de la escorrentía y la resuspensión de sedimentos en microcuencas boscosas como el BRUNAS eleva la turbiedad y los sólidos del agua cruda; a su vez, la temperatura y la materia orgánica natural moduladas por la estacionalidad inciden en la eficiencia de la coagulación–floculación y la sedimentación en laboratorio (IIAP, 2019; SENAMHI, 2021).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Para la preparación del coagulante–floculante a partir de *Musa paradisiaca* se utilizaron frutos/cáscaras seleccionadas, agua destilada/desionizada, bolsas y contenedores limpios para transporte, cuchillos de acero inoxidable, papel aluminio/parafilm para cubrir, desecantes,

frascos ámbar herméticos para conservar el material pulverizado y reactivos de preparación (HCl y NaOH 0,1–1 M para ajuste de pH). Para la recolección de agua contaminada naturalmente se dispuso de baldes de 20 L con tapa, cucharón/recogedor, botellas de polietileno de alta densidad de 1–2 L previamente acondicionadas, frascos ácido-lavados de 125–250 mL para metales, etiquetas impermeables y marcadores indelebles, bolsas tipo Zip para doble contención, hielo gel/acumuladores de frío y nevera portátil para cadena de frío, guantes de nitrilo, mascarillas y gafas (PPE), así como fichas de campo y cinta adhesiva para sellado. Para el análisis fisicoquímico en laboratorio se emplearon agua ultrapura, soluciones buffer pH 4, 7 y 10, soluciones patrón de KCl para conductividad, estándares de turbidez (Formazina/AMCO), solución de cero oxígeno (p. ej., sulfito de sodio), papel indicador y soluciones de limpieza y almacenamiento de electrodos, además de material de vidrio/plástico: beakers, probetas, erlenmeyers, pipetas graduadas y automáticas con puntas, buretas, embudos, varillas, mortero y pistilo, mangueras, papel/filtros Whatman n.º 1 y membranas de 0,45 μm . Para la determinación de cadmio (Cd) y plomo (Pb) se utilizaron reactivos de digestión ácida (HNO_3 grado ultratrazas y, de ser necesario, H_2O_2), agua ultrapura, materiales volumétricos clase A (matraces aforados y pipetas), estándares certificados (CRM) para Cd y Pb, soluciones de calibración y verificación, blancos de procedimiento, duplicados, materiales para conservación de muestras (HNO_3 para ajustar $\text{pH} < 2$ en campo/lab), jeringas y filtros de 0,45 μm , papel aluminio y toallas sin pelusa para manipulación limpia; finalmente, recipientes rotulados para lodos/residuos y adsorbentes/paños para control de derrames, cumpliendo con buenas prácticas de laboratorio y gestión de residuos.

3.2.2. Equipos

Para la extracción y acondicionamiento del coagulante–floculante de *Musa paradisiaca* se emplearon una estufa de secado con control de temperatura (40–105 °C), balanza analítica de alta precisión (0,1 mg), molino/triturador de laboratorio para pulverización fina, tamices de acero inoxidable de 500 μm y 250 μm y desecador; para los ensayos de coagulación–floculación se utilizó un floculador tipo jar-test de seis posiciones con control de velocidad y temporizador; para la medición de parámetros fisicoquímicos se dispuso de turbidímetro portátil HACH 2100Q (lectura en NTU con cubetas estandarizadas), oxímetro portátil HANNA HI9146 (mg/L y % de saturación con compensación automática de temperatura), pH-metro y conductímetro de laboratorio/portátiles con sus soluciones patrón y celdas compatibles; para la determinación de metales se contó con un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) de llama con lámparas de cátodo hueco para Cd y Pb y bloque digestor para preparación ácida de muestras;

en campo se empleó un GPS Garmin 64s para georreferenciación de puntos de muestreo; y como soporte informático y de emisión de reportes se utilizó una laptop HP (procesador multinúcleo, 8–16 GB RAM) y una impresora Epson para la impresión de fichas, hojas de trabajo y resultados.

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Nivel de investigación

El presente estudio se enmarca en el nivel explicativo y experimental, ya que busca determinar el efecto causal del coagulante/floculante natural obtenido a partir de dos variedades de *Musa paradisiaca* (plátano) sobre la calidad del agua contaminada. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la investigación explicativa se orienta a identificar las causas o razones que determinan la ocurrencia de determinados fenómenos, mediante la manipulación y el control de variables. Asimismo, este nivel implica el uso de diseños experimentales que permiten establecer relaciones de causa-efecto, en los que el investigador modifica la variable independiente (coagulante/floculante) para observar su impacto en la variable dependiente (parámetros fisicoquímicos del agua).

3.3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, ya que busca generar soluciones prácticas a problemas ambientales específicos, como la contaminación del agua, mediante el aprovechamiento de residuos vegetales locales. Según Bernal (2010), la investigación aplicada tiene como propósito resolver necesidades reales mediante la utilización de conocimientos científicos. En este caso, se aprovechan subproductos del plátano (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) para elaborar coagulantes naturales que contribuyan a mejorar la calidad del agua, promoviendo tecnologías sostenibles y de bajo costo.

3.3.3. Método de investigación

El método utilizado fue experimental, pues se controlaron las condiciones del entorno para manipular deliberadamente la variable independiente y observar sus efectos en la variable dependiente. De acuerdo con Tamayo (2004), el método experimental se caracteriza por el control de factores externos y la aplicación de tratamientos sobre un grupo experimental, comparando los resultados obtenidos. En este estudio, se emplearon diferentes dosis de coagulante/floculante (0.0, 0.01, 0.04 y 0.07 g/L) en muestras de agua contaminada, observando los cambios en parámetros físicos, químicos e inorgánicos bajo condiciones controladas de laboratorio.

3.3.4. Variable de investigación

La variable independiente (X) corresponde al coagulante/floculante a partir de dos variedades de *Musa paradisiaca* (plátano), cuyas partes vegetales (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) fueron procesadas y aplicadas como biofloculantes naturales.

La variable dependiente (Y) corresponde al agua contaminada, cuyos cambios se midieron mediante parámetros fisicoquímicos e inorgánicos representativos de calidad de agua.

Como variable interviniente, se consideraron las condiciones ambientales, tales como la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica, que pueden influir en la estabilidad y comportamiento de los coagulantes naturales durante los ensayos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.3.5. Operacionalización de variables

Tabla 2. Operacionalización de las variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable X: Coagulante/floculante a partir de <i>Musa paradisiaca</i>	Sustancia natural con carga eléctrica capaz de neutralizar partículas coloidales y favorecer su sedimentación (Martínez et al., 2020).	Se prepararon extractos naturales a partir de diferentes partes del plátano (cáscara, pseudotallo, hoja, fruto) aplicados a distintas concentraciones (0.0 – 0.07 g/L) en muestras de agua contaminada.	DX1: <i>Musa paradisiaca</i> L. (plátano bellaco) DX2: <i>Musa sp.</i> (plátano seda)	Concentración (g/L) del coagulante-floculante de: – Cáscara – Pseudotallo – Hoja – Fruto
Variable Y: Agua contaminada	Mezcla líquida que contiene sólidos, materia orgánica e inorgánica, y otros contaminantes que alteran sus características naturales (APHA, 2017).	Se evaluaron parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento con los coagulantes naturales para determinar la eficiencia del proceso de coagulación-floculación.	DY1: Parámetros físicos DY2: Parámetros químicos DY3: Parámetros inorgánicos	DY1: Turbiedad (NTU), Conductividad eléctrica (μS/cm) DY2: Oxígeno disuelto (mg/L), pH DY3: Cadmio (mg/L), Plomo (mg/L)

3.3.6. Diseño de investigación

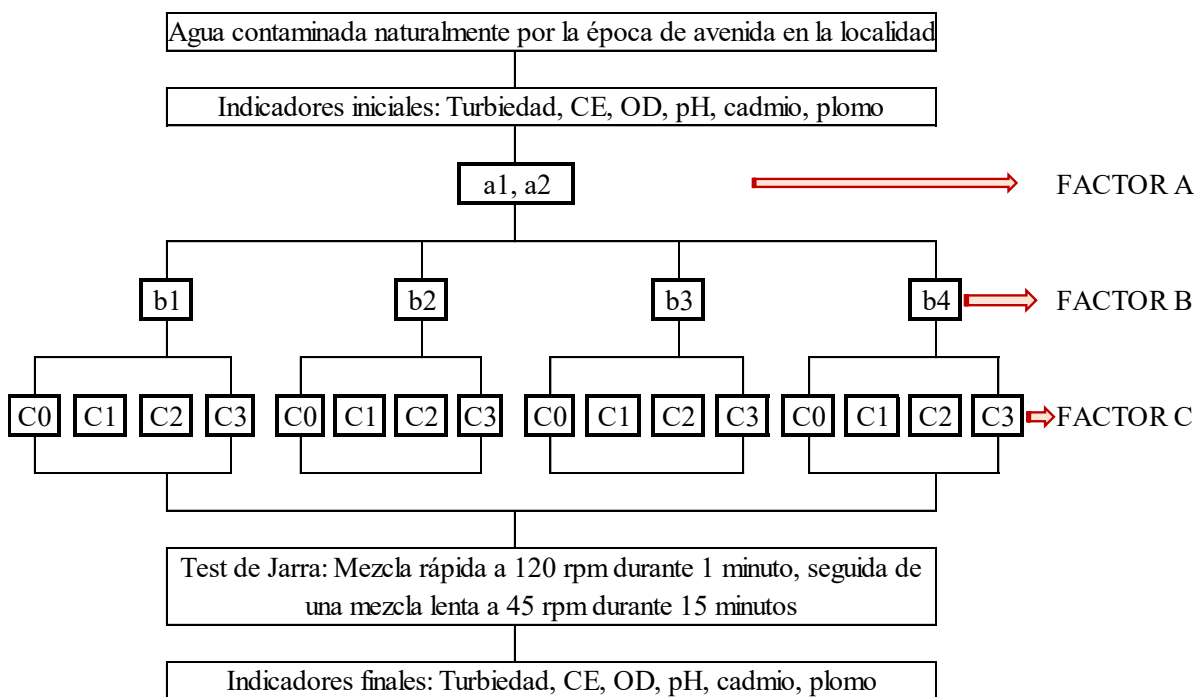
El diseño fue experimental de tipo experimento puro, con un arreglo factorial de $2 \times 4 \times 4$ con tres repeticiones. Los factores fueron:

Factor A (Variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (bellaco), a2: *Musa* sp. (seda).

Factor B (Parte de la biomasa): b1: cáscara, b2: pseudotallo, b3: hoja, b4: fruto.

Factor C (Dosis del coagulante/floculante): c0: 0.0 g/L, c1: 0.01 g/L, c2: 0.04 g/L, c3: 0.07 g/L.

Cada tratamiento se realizó en tres repeticiones bajo condiciones controladas de laboratorio, garantizando la validez estadística de los resultados. Este diseño permite analizar los efectos individuales y combinados de los factores en los parámetros de calidad del agua (Montgomery, 2017).



Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa* sp. (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0.0 g/L, c1: 0.01 g/L, c2: 0.04 g/L, c3: 0.07 g/L

Figura 3. Diseño factorial de $2 \times 4 \times 4$ con tres repeticiones

Tabla 3. Análisis de varianza por factor e interacción del diseño factorial ($2 \times 4 \times 4$, 3 repeticiones)

Factor	GL	SC	CM	F
A	1			

B	3
C	3
A*B	3
A*C	3
B*C	9
A*B*C	9
Error	64
Total	95

Nota. GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; F: estadístico F. Los valores de SC, CM y F se calculan con los datos experimentales. Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa* sp. (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0.0 g/L, c1: 0.01 g/L, c2: 0.04 g/L, c3: 0.07 g/L

3.3.7. Población y muestra

La población estuvo conformada por todas las muestras de agua contaminada recolectadas de la quebrada en estudio durante la época de avenida.

La muestra consistió en submuestras homogéneas de 1 litro, extraídas aleatoriamente y sometidas a tratamientos con los distintos coagulantes/floculantes. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), una muestra experimental debe representar adecuadamente a la población bajo estudio y mantenerse bajo condiciones controladas para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

3.3.8. Técnicas e instrumentos de investigación

Las técnicas empleadas fueron la observación directa y la experimentación controlada. Como instrumentos, se utilizaron equipos de laboratorio calibrados según las normas APHA (2017): turbidímetro HACH TL2300 para turbidez, multiparámetro HANNA HI98194 para pH, conductividad y oxígeno disuelto, y espectrofotómetro para la determinación de metales pesados (cadmio y plomo). Se aplicaron también fichas de registro de datos para la recolección sistemática de los resultados de cada tratamiento.

3.3.9. Análisis de datos

El análisis estadístico se efectuó en tres etapas:

Estadística descriptiva, donde se calcularon la media, desviación estándar y coeficiente de variación para caracterizar los datos obtenidos.

Prueba de normalidad, aplicando el test de Shapiro-Wilk, el cual es más adecuado para muestras pequeñas ($n < 50$) y diseños factoriales con repeticiones (Razali & Wah, 2011).

Para datos con distribución normal, se aplicó el ANVA factorial (Análisis de Varianza) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Para los datos no normales, se empleó la Transformación de Rango Alineado (ART) y la prueba de Dunn como análisis post hoc, a fin de determinar las diferencias significativas entre tratamientos (Wobbrock et al., 2011).

3.4. Metodología

3.4.1. Extracción del coagulante-floculante a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

El proceso de obtención del coagulante-floculante natural se desarrolló en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), siguiendo un protocolo estandarizado basado en la manipulación de biomasa vegetal proveniente de dos variedades de plátano (*Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*). El objetivo fue obtener un material pulverizado con tamaño de partícula uniforme, capaz de ser aplicado en procesos de coagulación-floculación de agua contaminada.

1) Recolección de muestras de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

Se recolectaron muestras frescas de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de las dos variedades de plátano directamente de parcelas agrícolas ubicadas en la zona de Tingo María. Las muestras fueron seleccionadas de plantas sanas y en estado fisiológico óptimo. Este procedimiento se realizó de acuerdo con los criterios de representatividad biológica y homogeneidad propuestos por la FAO (2019), asegurando que la biomasa recolectada no presentara signos de deterioro o contaminación visible. Posteriormente, las muestras fueron transportadas en bolsas plásticas limpias y rotuladas para su traslado inmediato al laboratorio, evitando su descomposición.

2) Pesado y selección de biomasa húmeda de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

En el laboratorio, cada órgano vegetal (hoja, pseudotallo, cáscara y fruto) fue pesado utilizando una balanza analítica con precisión de 0,001 g. Se seleccionó únicamente la biomasa húmeda libre de impurezas, descartando restos de tierra o material extraño. Este procedimiento permitió cuantificar la proporción de materia prima fresca que posteriormente fue sometida al proceso de secado. Según Montgomery (2017), el control del peso inicial es fundamental para

calcular la humedad relativa y establecer la eficiencia del secado en muestras vegetales.

3) Secado de la biomasa húmeda de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

El secado se realizó inicialmente al ambiente, a temperatura promedio de 30 ± 2 °C durante 72 horas, bajo condiciones de ventilación natural. Luego, las muestras fueron sometidas a secado controlado en estufa a 60 °C durante 24 horas, hasta alcanzar una humedad residual inferior al 10 %. Este procedimiento garantiza la estabilidad del material vegetal y previene el crecimiento microbiano, como recomiendan INACAL (2018) y APHA (2017) para el tratamiento de materiales naturales utilizados en ensayos de laboratorio.

4) Molido de la biomasa seca de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

Las muestras secas fueron trituradas en un molino de cuchillas (marca Thomas Wiley, modelo 4), hasta obtener un polvo fino. Este paso tiene como propósito aumentar el área superficial del material vegetal y facilitar la liberación de compuestos activos coagulantes durante la aplicación. De acuerdo con Kumar et al. (2021), el tamaño de partícula es un factor crítico que influye en la solubilidad y la capacidad de adsorción de los biofloculantes naturales.

5) Tamizado a 500 μ y 250 μ del producto molido a partir de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

El material pulverizado fue tamizado mediante tamices de acero inoxidable con aberturas de 500 μ m y 250 μ m, utilizando un agitador mecánico de laboratorio durante 10 minutos por muestra. Esta fracción de tamaño uniforme asegura una distribución homogénea en las pruebas de coagulación-floculación y una mejor reproducibilidad experimental (Simate et al., 2012). Las fracciones que pasaron por el tamiz de 250 μ m se seleccionaron para la fase experimental.

6) Almacenamiento del coagulante-floculante a partir de hoja, pseudotallo, cáscara y fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

Finalmente, el polvo vegetal obtenido fue almacenado en frascos de vidrio ámbar con tapa hermética, etiquetados con el tipo de órgano, variedad y fecha de preparación. Los frascos fueron conservados a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) en un lugar seco y oscuro para evitar la degradación de los compuestos bioactivos. Este procedimiento se ajustó a las recomendaciones de conservación de materiales naturales establecidas por APHA (2017) y FAO (2019),

asegurando la integridad y estabilidad del coagulante-floculante hasta su aplicación en los ensayos de tratamiento de agua.

3.4.2. Parámetros fisicoquímicos, cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)

El presente procedimiento metodológico tuvo como finalidad evaluar las características fisicoquímicas e inorgánicas (cadmio y plomo) del agua proveniente de la quebrada Córdova, ubicada dentro del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua y en el Laboratorio de Suelos de la UNAS, ambos acreditados para ensayos fisicoquímicos. La distancia entre el punto de muestreo (bocatoma de la quebrada Córdova) y el laboratorio fue de aproximadamente 600 a 700 metros, permitiendo el traslado inmediato de las muestras bajo condiciones controladas.

1) Identificación de puntos de recolección de agua proveniente de la quebrada Córdova del BRUNAS

Se identificaron puntos de muestreo estratégicos en la quebrada Córdova, considerando zonas con flujo constante y representativo del cuerpo de agua. La ubicación geográfica de los puntos se determinó con un GPS Garmin 64SC, registrando coordenadas UTM dentro del ámbito del BRUNAS. La selección se basó en los criterios establecidos por la *Guía Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos* del Ministerio del Ambiente (ANA, 2016), la cual recomienda realizar muestreos en zonas no perturbadas y con acceso seguro. Se tomaron fotografías y notas de campo para asegurar la trazabilidad del muestreo.

2) Recolección y traslado de muestras de agua contaminada naturalmente al laboratorio

Las muestras de agua contaminada naturalmente se recolectaron en botellas plásticas de un litro, previamente lavadas y enjuagadas con agua destilada, siguiendo los procedimientos de la APHA (2017). Durante la toma de muestras, se utilizó guantes de nitrilo y se evitó el contacto directo con el agua. Las botellas se rotularon indicando el punto de muestreo, fecha y hora, y fueron almacenadas en conservadora con hielo para su transporte inmediato al laboratorio, garantizando que el tiempo entre recolección y análisis no superara las 2 horas. Este protocolo aseguró la representatividad de las muestras de agua y la preservación de sus características fisicoquímicas originales.

3) Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua contaminada naturalmente

El análisis de los parámetros fisicoquímicos se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - UNAS, utilizando los equipos calibrados y métodos estandarizados según la APHA (2017). Los parámetros evaluados fueron turbidez, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH.

Los resultados fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 1: Poblacional y recreacional, según el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del agua de la quebrada Córdova

Parámetro	Unidad	Método / Equipo empleado	Valor Máximo Permitido (ECA)
Turbidez	NTU	Método 2130 B – <i>Turbidímetro HACH TL2300</i>	≤ 5
Conductividad eléctrica	μS/cm	Método 2510 B – <i>Multiparámetro HANNA HI98194</i>	≤ 1500
Oxígeno disuelto	mg/L	Método 4500-O G – <i>Multiparámetro HANNA HI98194</i>	≥ 6
pH	—	Método 4500-H ⁺ B – <i>Multiparámetro HANNA HI98194</i>	6.5 – 8.5

Los parámetros fueron medidos en laboratorio, verificando la calibración de los equipos antes de cada jornada. Los valores obtenidos se registraron en fichas de campo y hojas de control de calidad, conforme al Manual de Monitoreo de la Calidad del Agua de la ANA (2016).

4) Determinación de los parámetros cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

El análisis de los metales pesados cadmio (Cd) y plomo (Pb) se efectuó en el Laboratorio de Suelos de la Escuela Profesional de Agronomía - UNAS, donde las muestras fueron digeridas mediante el método 3111 B de la APHA (2017) y posteriormente analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Este procedimiento permitió cuantificar las concentraciones metálicas con alta precisión.

Los valores obtenidos se compararon con los límites máximos establecidos por el ECA

para agua – Categoría 1: Poblacional y recreacional (MINAM, 2017).

Tabla 5. Parámetros de metales pesados (Cd y Pb) en el agua de la quebrada Córdova

Parámetro	Unidad	Método / Equipo empleado	Valor Máximo Permitido (ECA)
Cadmio (Cd)	mg/L	Método 3111 B – <i>Espectrofotometría de absorción atómica</i>	≤ 0,003
Plomo (Pb)	mg/L	Método 3111 B – <i>Espectrofotometría de absorción atómica</i>	≤ 0,01

El control de calidad de los análisis se realizó mediante patrones certificados y blancos de laboratorio, garantizando la exactitud de las mediciones. La comparación de los resultados frente a los valores ECA permitió identificar el nivel de cumplimiento de los parámetros en el cuerpo de agua analizado.

3.4.3. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente

El procedimiento experimental tuvo como finalidad evaluar los efectos del coagulante-floculante natural obtenido a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* sobre las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova. Los análisis se centraron en los parámetros de turbidez y conductividad eléctrica, los cuales permiten determinar la eficiencia de remoción de partículas suspendidas y la variación de la concentración iónica del agua tratada.

1) Preparación y dosificación de las muestras de agua contaminada naturalmente

Las muestras de agua contaminada fueron homogenizadas y filtradas con malla de 1 mm para eliminar sólidos gruesos antes del tratamiento. En cada ensayo se empleó un volumen fijo de 500 mL por vaso de precipitación, distribuidos en las seis posiciones del equipo de test de jarras. Los coagulantes-floculantes naturales elaborados a partir de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda) se aplicaron en diferentes concentraciones (0,00 g/L; 0,01 g/L; 0,04 g/L y 0,07 g/L), según el diseño factorial planteado (2×4×4).

Cada dosis fue preparada mediante disolución del polvo vegetal tamizado (250 µm) en agua destilada, y posteriormente incorporada a las muestras mediante pipeta graduada, garantizando una mezcla uniforme. Este proceso se realizó de acuerdo con las recomendaciones metodológicas de la APHA (2017) y de Martínez et al. (2020), quienes sugieren aplicar

coagulantes naturales en dosis progresivas para determinar el punto óptimo de coagulación.

2) Experimento con el test de jarras

El ensayo de coagulación-floculación se efectuó utilizando un equipo jar test de seis posiciones (marca Phipps & Bird, modelo PB-700), siguiendo el método estándar 2180 B de la APHA (2017). El procedimiento incluyó tres etapas:

Mezcla rápida, a 200 rpm durante 1 minuto para garantizar la dispersión completa del coagulante;

Mezcla lenta, a 40 rpm durante 20 minutos para favorecer la formación de flóculos estables; y

Sedimentación, en reposo durante 30 minutos.

Al finalizar el proceso, se extrajeron cuidadosamente las muestras clarificadas de la parte superior de cada vaso, evitando la perturbación de los flóculos. Los análisis posteriores se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la UNAS.

3) Medición de los parámetros físicos del agua tratada

Los parámetros turbidez y conductividad eléctrica del agua tratada se determinaron de acuerdo con los métodos 2130 B y 2510 B, respectivamente, establecidos por la APHA (2017).

La turbidez se midió con un turbidímetro HACH TL2300, expresando los resultados en unidades de NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

La conductividad eléctrica se registró con un multiparámetro HANNA HI98194, expresando los resultados en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Previo a cada sesión de medición, los equipos fueron calibrados con soluciones patrón certificadas, y se registraron tres repeticiones por tratamiento. Los valores obtenidos permitieron calcular la eficiencia de remoción de turbidez y la variación de la conductividad, comparando las muestras tratadas frente al control (sin coagulante). La metodología experimental fue coherente con los procedimientos descritos por Kumar et al. (2021) y Simate et al. (2012) en estudios de aplicación de coagulantes naturales en aguas superficiales.

4) Contraste de los parámetros físicos con los estándares de calidad de agua para consumo humano

Los resultados experimentales de turbidez y conductividad eléctrica fueron contrastados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 1: Poblacional y

recreacional, establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2017).

Para el contraste, se consideró el valor máximo permitido de ≤ 5 NTU para turbidez y ≤ 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para conductividad eléctrica. Se analizó la variación porcentual de cada tratamiento con respecto al control, identificando la dosis y parte vegetal del plátano que produjo la mayor reducción de turbidez sin afectar la conductividad del agua.

Este procedimiento permitió establecer el efecto físico del coagulante-floculante natural bajo condiciones controladas, verificando el cumplimiento de los valores de referencia establecidos por la normativa peruana vigente.

3.4.4. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en las propiedades químicas del agua contaminada naturalmente

El análisis de los efectos del coagulante-floculante natural en las propiedades químicas del agua contaminada tuvo como propósito determinar los cambios producidos en los niveles de pH y oxígeno disuelto (OD), los cuales representan indicadores fundamentales de la calidad del agua. Estas variables reflejan la capacidad del medio acuático para mantener condiciones adecuadas de equilibrio químico y para sustentar procesos biológicos.

1) Medición de los parámetros químicos del agua tratada

La determinación de los parámetros químicos se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), siguiendo los procedimientos establecidos en los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la APHA (2017).

Los parámetros analizados fueron pH y oxígeno disuelto (OD), evaluados después del proceso de coagulación-floculación con los coagulantes naturales obtenidos de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda).

El pH se midió mediante el método 4500-H⁺ B utilizando el multiparámetro HANNA HI98194, previamente calibrado con soluciones buffer pH 4,00; 7,00 y 10,00. Las lecturas se realizaron a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) en cada muestra tratada y en el control.

El oxígeno disuelto (OD) se determinó mediante el método 4500-O G del mismo equipo multiparámetro, asegurando una adecuada agitación previa y evitando la presencia de burbujas de aire durante la medición.

Las mediciones se efectuaron por triplicado en cada tratamiento experimental del diseño

factorial ($2 \times 4 \times 4$), a fin de asegurar la reproducibilidad de los resultados. Los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente para determinar la significancia de los cambios generados por el coagulante-floculante natural. Este procedimiento metodológico es concordante con lo propuesto por Simate et al. (2012) y Kumar et al. (2021), quienes indican que la aplicación de biofloculantes puede alterar el equilibrio químico del agua a través de procesos de neutralización de cargas y adsorción iónica.

2) **Contraste de los parámetros químicos con los estándares de calidad de agua para consumo humano**

Los valores experimentales de pH y oxígeno disuelto obtenidos tras el tratamiento con los coagulantes naturales fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 1: Poblacional y recreacional, establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2017).

De acuerdo con la normativa, el pH debe mantenerse dentro del rango 6,5 – 8,5, mientras que el oxígeno disuelto (OD) debe ser mayor o igual a 5,0 mg/L para garantizar condiciones adecuadas de oxigenación.

El contraste consistió en evaluar si los valores obtenidos en las muestras tratadas se mantenían dentro de los límites establecidos, identificando así la dosis y parte vegetal del plátano que permitió optimizar los parámetros químicos del agua sin generar alteraciones adversas. De esta manera, se determinó la influencia del coagulante-floculante natural en la estabilización del pH y la oxigenación del agua, asegurando que las condiciones químicas resultantes fueran compatibles con los estándares de calidad ambiental vigentes en el Perú.

3.4.5. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en el cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

El análisis de los efectos del coagulante-floculante natural en la remoción de metales pesados (cadmio y plomo) tuvo como objetivo evaluar la capacidad de los compuestos bioactivos presentes en los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* para reducir la concentración de estos elementos en aguas contaminadas naturalmente (agua proveniente de la quebrada de Córdova, perteneciendo al Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva). Estos metales son reconocidos por su toxicidad y persistencia en el ambiente, por lo que su eliminación mediante métodos naturales representa una alternativa ecológica y sostenible frente a los tratamientos convencionales (APHA, 2017; Martínez et al., 2020).

1) **Medición de los parámetros: cadmio y plomo del agua tratada**

La determinación de las concentraciones de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en las muestras de agua tratada se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), aplicando los métodos estandarizados de la American Public Health Association (APHA, 2017).

Las muestras, previamente sometidas al proceso de coagulación-floculación con los coagulantes naturales de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*, fueron digeridas mediante el método 3111 B (Método de Absorción Atómica de Llama), con el fin de mineralizar la materia orgánica y liberar los metales en solución.

Posteriormente, las mediciones se efectuaron mediante un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS, Perkin Elmer Analyst 400), calibrado con estándares certificados de concentración conocida. Cada muestra fue analizada por triplicado para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

La concentración final de cadmio y plomo fue expresada en miligramos por litro (mg/L). Estos valores permitieron cuantificar la eficiencia de remoción metálica del coagulante/floculante natural, calculada mediante la relación entre la concentración inicial y la concentración final del metal después del tratamiento. Según Kumar et al. (2021) y Simate et al. (2012), este tipo de bioadsorción se atribuye principalmente a la presencia de grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos y aminas) en los compuestos lignocelulósicos de los residuos vegetales, que actúan como sitios activos de fijación metálica.

2) **Contraste de los parámetros: cadmio y plomo con los estándares de calidad de agua para consumo humano**

Los resultados experimentales de cadmio y plomo fueron comparados con los límites máximos establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 1: Poblacional y recreacional, establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2017).

De acuerdo con dicha normativa, la concentración máxima permitida de cadmio (Cd) en agua es de $\leq 0,003$ mg/L, mientras que para plomo (Pb) es de $\leq 0,01$ mg/L.

El contraste consistió en analizar la reducción de los niveles de cadmio y plomo en el agua tratada frente a los valores de referencia del ECA, identificando la combinación de factores (variedad de plátano, parte vegetal y dosis del coagulante) que presentó el mayor efecto de

remoción. Los datos fueron interpretados estadísticamente para determinar la significancia de los cambios observados entre tratamientos.

Los resultados obtenidos permitieron evaluar la eficiencia del proceso de remoción metálica por mecanismos de adsorción y complejación, demostrando que los coagulantes naturales a base de biomasa vegetal pueden contribuir al cumplimiento de los estándares de calidad de agua para consumo humano establecidos por la normativa peruana (MINAM, 2017).

3.4.6. Eficiencia de remoción de turbiedad empleando coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en agua contaminada naturalmente

La determinación de la eficiencia de remoción de turbiedad tuvo como propósito cuantificar el efecto del coagulante-floculante natural elaborado a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda) sobre la clarificación del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova.

La turbidez constituye un parámetro físico fundamental que refleja la cantidad de partículas suspendidas en el agua; su reducción representa un indicador directo de la capacidad coagulante del material vegetal aplicado (APHA, 2017; Martínez et al., 2020).

1) Determinación de la turbidez inicial y final del agua tratada

Las mediciones de turbidez se realizaron antes y después del tratamiento con los coagulantes naturales, empleando un turbidímetro HACH TL2300, conforme al método 2130 B descrito en la APHA (2017).

La turbidez inicial (T_i) correspondió al valor registrado en el agua contaminada naturalmente sin tratamiento, mientras que la turbidez final (T_f) se obtuvo luego del proceso de coagulación-floculación y del período de sedimentación de 30 minutos.

Cada tratamiento del diseño factorial ($2 \times 4 \times 4$, con tres repeticiones) incluyó la combinación de los factores: variedad de plátano, órgano vegetal (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) y dosis aplicada (0,00; 0,01; 0,04 y 0,07 g/L). Las mediciones se efectuaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - UNAS, manteniendo condiciones controladas de temperatura (25 ± 2 °C) y luz ambiental.

Previo a cada ensayo, el equipo fue calibrado con estándares de 0,0; 20,0; 100,0 y 800,0 NTU, conforme al protocolo del fabricante. Los resultados se registraron con una precisión de 0,01 NTU.

2) Cálculo de la eficiencia de remoción de turbidez

La eficiencia de remoción de turbidez (ER%) se determinó mediante la expresión propuesta por la APHA (2017) y aplicada por Kumar et al. (2021), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ER(\%) = \frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100$$

Donde:

T_i = turbidez inicial del agua contaminada (NTU)

T_f = turbidez final del agua tratada (NTU)

La eficiencia se expresó en porcentaje (%), indicando la capacidad del coagulante para eliminar las partículas suspendidas. Valores elevados de ER% representaron una mayor capacidad clarificante del material vegetal, mientras que valores bajos indicaron baja interacción entre las cargas del coagulante y las partículas coloidales presentes en el agua.

3) Interpretación de la eficiencia de remoción de turbidez

Los resultados obtenidos se interpretaron en función de los factores experimentales considerados en el diseño factorial, analizando la interacción entre la variedad de plátano, el tipo de órgano vegetal y la dosis del coagulante.

Los valores de eficiencia de remoción se compararon con los límites establecidos por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua – Categoría 1: Poblacional y recreacional, establecido en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, 2017), cuyo valor máximo permisible para turbidez es ≤ 5 NTU.

Asimismo, se evaluó la estabilidad del proceso de clarificación y la tendencia de remoción en función del aumento de la dosis, determinando el punto de saturación del coagulante natural. Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA factorial y pruebas de comparación de medias (Tukey o Dunn, según la normalidad de los datos), con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Este análisis permitió identificar los tratamientos que alcanzaron los mayores porcentajes de remoción y verificar la eficacia del coagulante-floculante natural como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas superficiales.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Extracción del coagulante-floculante a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

4.1.1. Producción de coagulante-floculante a partir de la hoja de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

La Figura 4 muestra el balance de materia correspondiente a la obtención del coagulante-floculante natural a partir de hojas de *Musa paradisiaca* y *Musa sp.* El proceso se inicia con la recolección de 4200 g de hojas, de las cuales se descartaron 2500 g por mal estado, obteniéndose 1700 g de material seleccionado. Este primer control garantiza la eliminación de impurezas, materia senescente y microorganismos que podrían interferir en la calidad del producto final (Simate et al., 2021; Torres et al., 2020). Posteriormente, el material fue secado a 70 °C durante 72 h, reduciendo su contenido de humedad y materia orgánica volátil hasta obtener 900 g de hoja seca, lo cual representa una pérdida de 800 g atribuible a la evaporación del agua y la eliminación de residuos (Nanthakumar et al., 2020; Daverey et al., 2019).

El secado controlado es una etapa crítica, ya que la temperatura influye directamente en la preservación de los compuestos bioactivos, principalmente polisacáridos, proteínas y taninos, responsables de la capacidad coagulante del material (Kansal et al., 2022). En la etapa de molienda, las hojas secas fueron trituradas hasta obtener 850 g de partículas finas, eliminando alrededor de 50 g de residuos no aprovechables (hojas vanas). Este proceso incrementa el área superficial específica del material, favoreciendo la exposición de grupos funcionales activos durante el tratamiento del agua (Ng et al., 2021; Omar et al., 2019).

El material pulverizado fue sometido a tamizado sucesivo de 500 μm y 250 μm , obteniéndose fracciones más homogéneas y funcionalmente estables. Del total, 500 g correspondieron a partículas $\leq 500 \mu\text{m}$ y, tras el segundo tamizado, 200 g de partículas finas $\leq 250 \mu\text{m}$ fueron seleccionadas como producto final. Esta fracción más fina presenta mejor dispersión en el medio acuoso, lo que aumenta la eficiencia en la formación de flóculos al interactuar con coloides y partículas suspendidas (Adeniran et al., 2017; Abioye et al., 2019). El producto final fue almacenado a 37 °C para mantener su estabilidad físico-química y evitar la degradación enzimática o fúngica (Obiora et al., 2019).

El rendimiento global del proceso se estimó en aproximadamente 4,76 % respecto al peso inicial de hojas frescas, lo cual es congruente con investigaciones previas sobre la elaboración de coagulantes naturales a partir de biomasa vegetal. Según García et al. (2022),

los rendimientos en la preparación de coagulantes de origen vegetal suelen oscilar entre 3 % y 7 %, dependiendo de la variedad, grado de humedad inicial y eficiencia del proceso de tamizado. La pérdida gradual de masa a lo largo de las etapas refleja un control adecuado del proceso y una selección dirigida hacia fracciones con mayor potencial de adsorción y coagulación (Sharma et al., 2025).

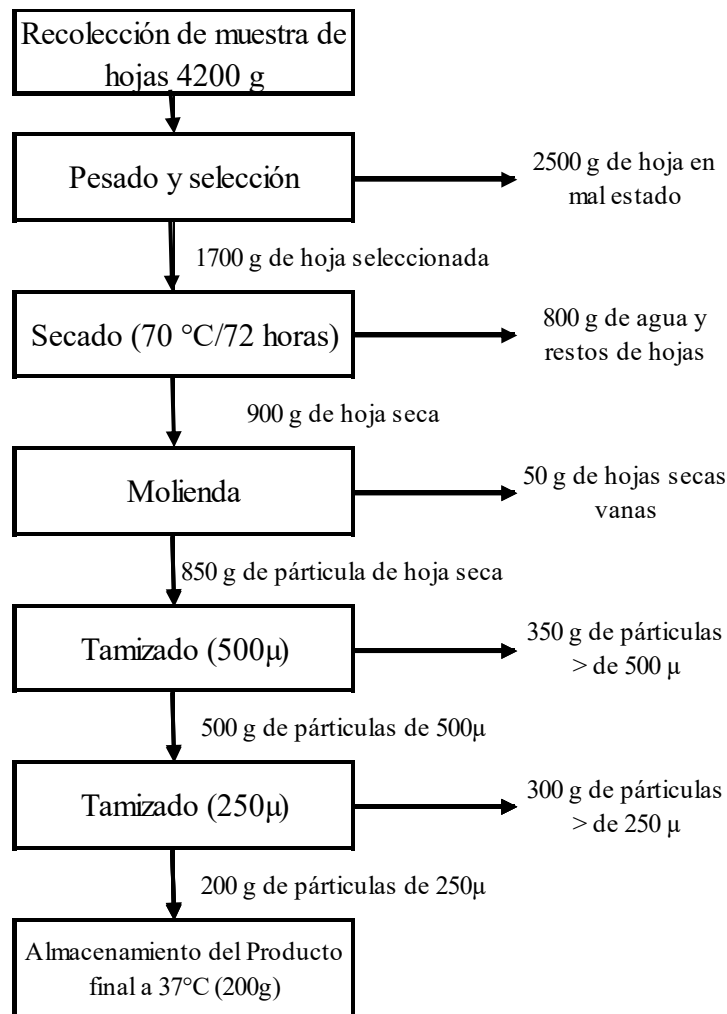


Figura 4. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir de hojas de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

El análisis del balance de materia demuestra que el proceso aplicado a *Musa paradisiaca* y *Musa sp.* es técnicamente viable, reproducible y escalable. La secuencia de operaciones unitarias (selección, secado, molienda y tamizado) permite obtener un producto con granulometría controlada y alta pureza, aspectos determinantes para su aplicación en la remoción de turbiedad y metales pesados. Además, la estandarización del tamaño de partícula contribuye a la reproducibilidad experimental en las pruebas de coagulación-floculación (Simate et al., 2021; Torres et al., 2020). Por tanto, este balance confirma que el

aprovechamiento de hojas de *Musa* constituye una alternativa sostenible y de bajo costo para la obtención de coagulantes naturales, alineándose con los principios de la economía circular y el manejo integral de residuos agroindustriales (Sharma et al., 2025).

4.1.2. Producción de coagulante-floculante a partir del pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

La Figura 5 presenta el balance de materia correspondiente a la obtención del coagulante-floculante natural elaborado a partir del pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*, donde se evidencia la secuencia de operaciones unitarias que permiten transformar el material vegetal fresco en un polvo fino apto para su aplicación en el tratamiento de aguas. Se recolectaron 4200 g de pseudotallo, de los cuales 2500 g fueron descartados por encontrarse en mal estado o presentar exceso de humedad, quedando 1700 g de material seleccionado. Este control inicial asegura la eliminación de tejido degradado y evita la proliferación microbiana que podría comprometer la calidad del producto (Simate et al., 2021; Torres et al., 2020).

Posteriormente, el pseudotallo seleccionado fue sometido a secado a 70 °C durante 72 h, logrando una reducción significativa de la humedad y obteniendo 900 g de pseudotallo seco, lo que representa una pérdida de 800 g atribuida principalmente al contenido inicial de agua. El secado controlado es fundamental, pues influye en la estabilidad térmica y en la retención de compuestos bioactivos con propiedades coagulantes, tales como lignina, celulosa, hemicelulosa y taninos, los cuales han sido reportados como funcionales en diversos estudios enfocados en materiales vegetales aplicados a la remoción de turbidez (Kansal et al., 2022; Daverey et al., 2019). Además, la eliminación de humedad favorece la molienda homogénea y previene la compactación del material durante el almacenamiento (Oladoja et al., 2020).

La etapa de molienda permitió reducir el tamaño de las partículas hasta obtener 850 g de material pulverizado, con una pérdida marginal de 50 g de fibras no procesables. Este proceso incrementa el área superficial y mejora la exposición de grupos funcionales reactivos (hidroxilo, carbonilo y carboxilo), que desempeñan un rol determinante en los mecanismos de adsorción y neutralización de cargas durante la coagulación (Ng et al., 2021; Omar et al., 2019). Seguidamente, el material fue tamizado a 500 μm y 250 μm , generando fracciones de 500 g y 150 g, respectivamente.

Las partículas menores a 250 μm fueron seleccionadas como producto final debido a su mayor reactividad y capacidad de dispersión en el medio acuoso. Esta fracción fina favorece la formación de flóculos densos y estables, optimizando la eficiencia de remoción de turbidez y

metales pesados en concordancia con resultados obtenidos para biocoagulantes derivados de *Musa* en otras investigaciones (García et al., 2022; Tiruneh et al., 2023). Finalmente, el producto fue almacenado a 37 °C, condición que mantiene su integridad fisico-química y evita la degradación enzimática o fúngica (Obiora et al., 2019). El rendimiento global del proceso fue de aproximadamente 3,57 % respecto al peso inicial, lo que concuerda con estudios que reportan rendimientos entre 3 % y 6 % en la obtención de biocoagulantes a partir de pseudotallos u otras matrices lignocelulósicas (Adeniran et al., 2017; Nanthakumar et al., 2020; Sharma et al., 2025).

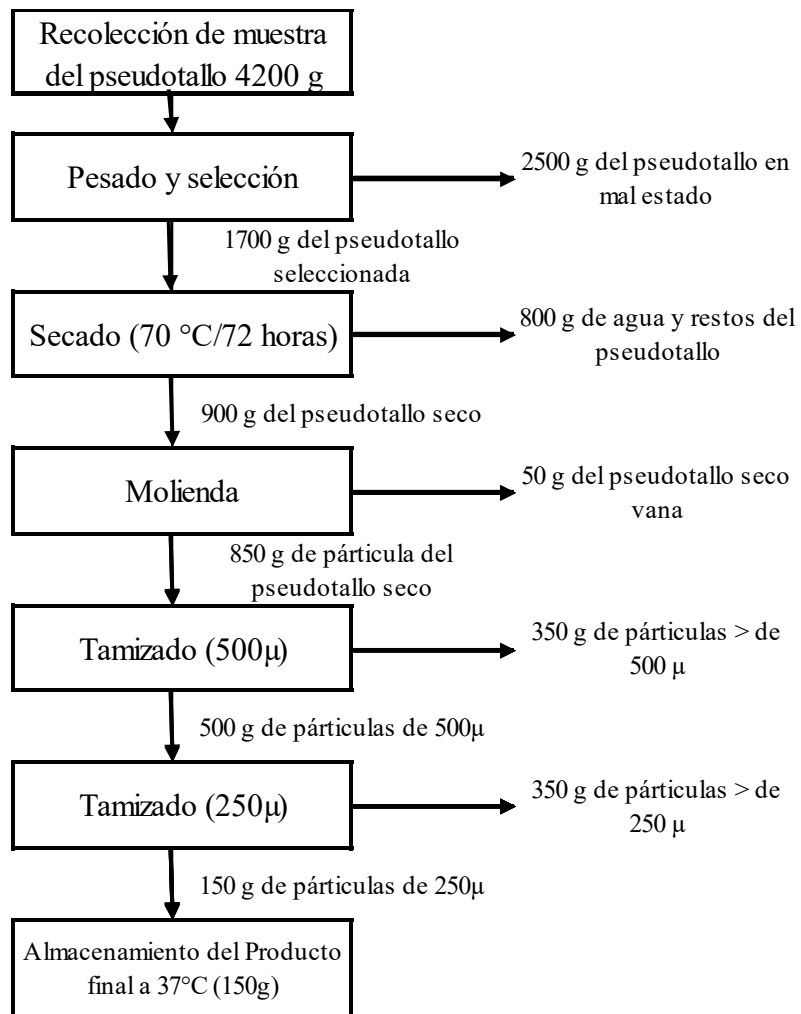


Figura 5. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir del pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

En síntesis, el balance de materia confirma que el pseudotallo de *Musa* constituye una fuente viable y sostenible para la producción de coagulantes naturales. El proceso descrito evidencia una adecuada estandarización de operaciones unitarias (selección, secado, molienda y tamizado), asegurando la reproducibilidad del material coagulante. Asimismo, el

aprovechamiento de residuos agrícolas como el pseudotallo reduce la presión sobre vertederos y aporta valor agregado a subproductos agroindustriales, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12 y 14) relacionados con producción responsable y gestión del agua (Simate et al., 2021).

4.1.3. Producción de coagulante-floculante a partir de la cáscara del fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa* sp.

La Figura 6 representa el balance de materia para la obtención del coagulante-floculante natural elaborado a partir de la cáscara del fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa* sp., donde se observa el flujo de operaciones unitarias desde la recolección hasta el almacenamiento del producto final. En esta etapa se recolectaron 4200 g de cáscara fresca, de los cuales 2500 g fueron descartados por encontrarse en descomposición o con manchas microbianas, quedando 1700 g de cáscara seleccionada. Este control inicial es esencial, ya que permite eliminar material degradado que podría comprometer la estabilidad del producto y disminuir la presencia de compuestos activos (Simate et al., 2021; Torres et al., 2020). La calidad de la biomasa es un factor crítico reportado por diversos autores en biocoagulantes derivados de residuos frutales.

Posteriormente, las cáscaras seleccionadas fueron sometidas a secado a 70 °C durante 72 horas, obteniendo 900 g de material seco, equivalente a una pérdida del 47 % respecto al peso inicial debido a la eliminación de humedad y restos orgánicos. Este proceso térmico controlado es decisivo para conservar polifenoles, lignina y taninos, compuestos que aportan capacidad coagulante y adsorbente (Kansal et al., 2022). Según Oladoja et al. (2020), la temperatura de secado de matrices lignocelulósicas debe mantenerse entre 60 °C y 80 °C para evitar degradación térmica. Asimismo, estudios internacionales como los de Abioye et al. (2019) destacan la importancia de preservar estos grupos funcionales para mantener la eficiencia del biocoagulante. Durante la molienda se redujo el tamaño de las partículas hasta obtener 850 g de polvo fino, descartando 50 g de fibras no procesables. Este proceso incrementa la superficie específica y mejora la exposición de grupos funcionales que participan en mecanismos de neutralización de cargas y adsorción de partículas (Ng et al., 2021). Posteriormente, se realizaron dos etapas de tamizado: la primera a 500 µm, obteniéndose 500 g de partículas finas, y la segunda a 250 µm, de la cual se obtuvieron 300 g de fracción más fina, seleccionada como producto final debido a su mayor homogeneidad y estabilidad físico-química (García et al., 2022). El producto final fue almacenado a 37 °C, manteniendo una textura estable y un contenido de humedad residual controlado, lo que evitó la proliferación microbiana y la oxidación de los compuestos fenólicos (Obiora et al., 2019). Este control post-

proceso es fundamental para asegurar la eficiencia del material en pruebas posteriores, ya que cualquier degradación podría modificar su comportamiento en coagulación-floculación y afectar la formación de flóculos densos y estables.

El rendimiento total del proceso fue de 7,14 % respecto al peso fresco inicial, siendo mayor al obtenido a partir del pseudotallo y las hojas. Este resultado se relaciona con el mayor contenido de materia orgánica sólida, polisacáridos y taninos condensados presentes en la cáscara del fruto (Nanthakumar et al., 2020). Bhatti et al. (2023) señalan que la cáscara de plátano contiene compuestos polifenólicos y carbohidratos estructurales capaces de interactuar con partículas coloidales y metales pesados, favoreciendo la formación de flóculos compactos y mejorando su desempeño como coagulante natural.

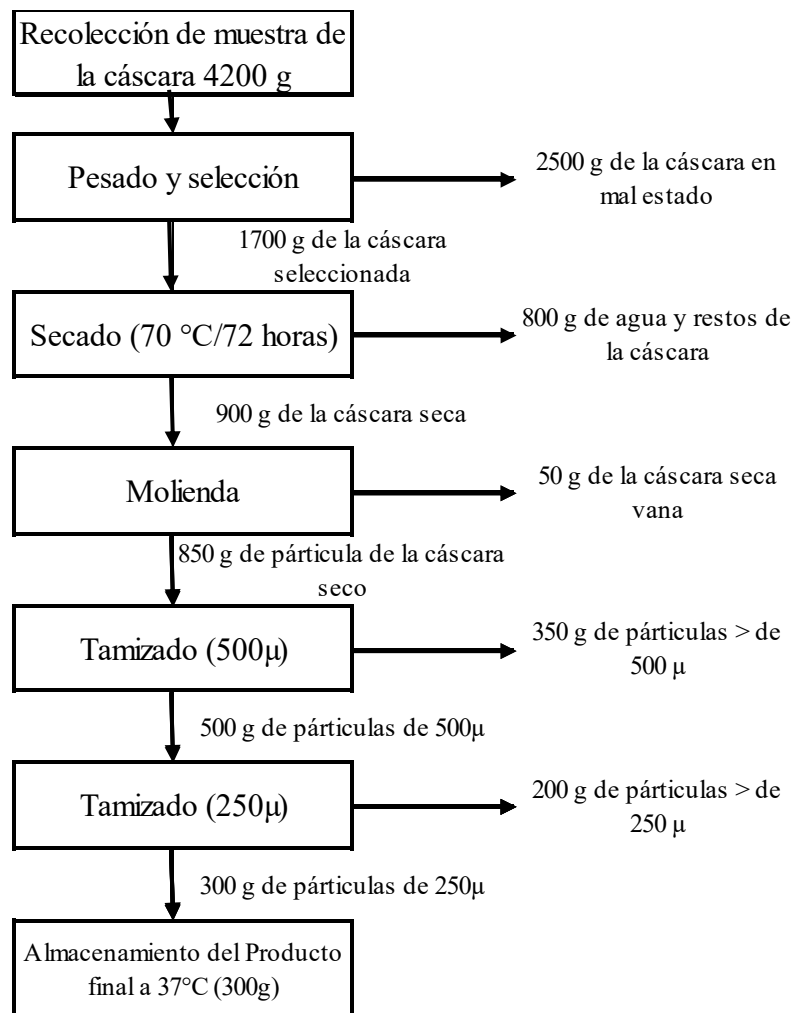


Figura 6. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir de la cáscara de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

En conclusión, el balance de materia de la cáscara de *Musa paradisiaca* y *Musa sp.* demuestra una eficiente conversión de biomasa residual en un coagulante natural de alto

potencial para el tratamiento de aguas turbias y contaminadas. Este procedimiento combina operaciones unitarias simples, sostenibles y de bajo costo, alineadas con los principios de la tecnología limpia y economía circular, que promueven el aprovechamiento de residuos agroindustriales para fines ambientales (Simate et al., 2021). Además, la elevada disponibilidad de este subproducto en regiones tropicales como Huánuco permite su incorporación a sistemas comunitarios de tratamiento de agua como una alternativa local y sustentable frente a los coagulantes químicos convencionales.

4.1.4. Producción de coagulante-floculante a partir del fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*

La Figura 7 muestra el balance de materia correspondiente a la producción del coagulante-floculante natural elaborado a partir del fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*, evidenciando las etapas secuenciales del proceso desde la recolección del material hasta el almacenamiento del producto final. Se recolectaron 4200 g de fruto, de los cuales 3500 g fueron descartados por presentar signos de maduración avanzada o deterioro, quedando 2500 g de material en buen estado. Esta selección rigurosa es fundamental, ya que el contenido de azúcares, pectinas y compuestos fenólicos varía según el grado de madurez, lo que influye en la eficiencia coagulante del material (Simate et al., 2021; Torres et al., 2020).

Posteriormente, el fruto seleccionado fue sometido a secado a 70 °C durante 72 horas, obteniéndose 900 g de material seco, equivalente a una pérdida del 64 % del peso fresco por eliminación de humedad y compuestos volátiles. Este proceso de deshidratación permite conservar polisacáridos, pectinas y proteínas cargadas positivamente, responsables de la neutralización de cargas y formación de puentes interparticulados (Kansal et al., 2022). Bhatti et al. (2023) indican que una temperatura cercana a 70 °C evita la desnaturalización térmica, manteniendo la funcionalidad química del biocoagulante, coincidiendo con lo reportado en estudios de residuos frutales (Daverey et al., 2019; Abioye et al., 2019).

En la etapa de molienda, las muestras secas fueron trituradas hasta obtener 850 g de partículas finas, eliminándose 50 g de fibras no molibles. Esta reducción de tamaño incrementa el área superficial del material y mejora la exposición de grupos funcionales como carbonilos, hidroxilos y carboxilos, esenciales en procesos de adsorción y coagulación-floculación (Ng et al., 2021; Omar et al., 2019). La evidencia confirma que una molienda adecuada favorece la interacción del biocoagulante con partículas coloidales.

Posteriormente, el material fue tamizado a 500 μm y 250 μm , obteniéndose fracciones de 500 g y 220 g, respectivamente. El producto final, correspondiente a la fracción $\leq 250 \mu\text{m}$, fue almacenado a 37 $^{\circ}\text{C}$, temperatura que garantiza la estabilidad del polvo y reduce la absorción de humedad (Obiora et al., 2019). Esta fracción presenta una distribución granulométrica óptima para su dispersión en agua y una mayor capacidad de interacción con partículas coloidales, en concordancia con lo reportado por García et al. (2022) para biocoagulantes derivados de *Musa*.

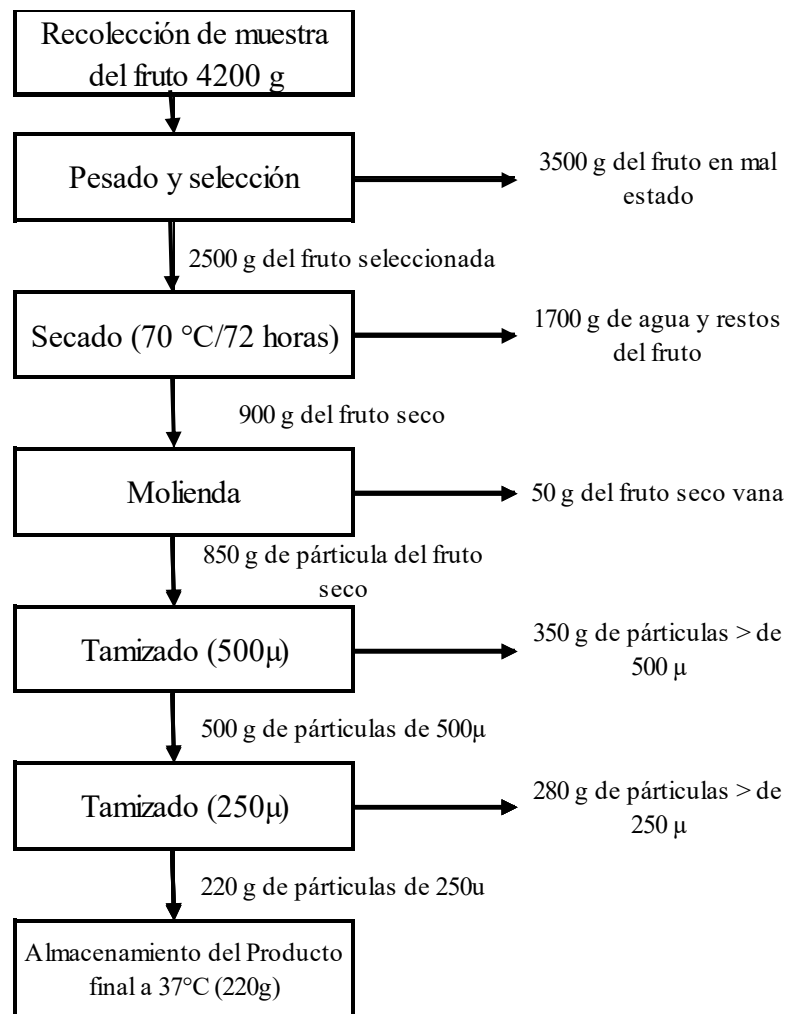


Figura 7. Balance de materia de producción de coagulante-floculante a partir del fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa* sp.

El rendimiento global del proceso fue de 5,23 % respecto al peso inicial, un valor intermedio en comparación con los obtenidos en hojas (4,76 %), pseudotallo (3,57 %) y cáscara (7,14 %). Este comportamiento puede explicarse por la composición bioquímica del fruto, caracterizada por una elevada proporción de pectinas, amilosa y azúcares reductores, los cuales se deshidratan con mayor facilidad durante el secado (Nanthakumar et al., 2020). No obstante,

estas mismas sustancias confieren al coagulante propiedades adhesivas y floculantes superiores, al favorecer la formación de puentes entre partículas en suspensión, como también reportaron Oladoja et al. (2020) en estudios con biomateriales similares.

En síntesis, el proceso descrito demuestra que el fruto de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* puede ser aprovechado eficientemente para la producción de un biocoagulante natural con alto contenido de biopolímeros activos, destacando su potencial aplicación en el tratamiento de aguas turbias y contaminadas con metales pesados. La secuencia de operaciones (selección, secado, molienda y tamizado) garantiza la obtención de un material estable, homogéneo y reproducible, que cumple con los principios de sostenibilidad y valorización de residuos agroindustriales. En este sentido, la utilización integral de las partes del plátano —hoja, pseudotallo, cáscara y fruto— contribuye a una gestión más eficiente de biomasa residual en la región amazónica, promoviendo alternativas ecológicas a los coagulantes químicos convencionales (Simate et al., 2021).

4.2. Parámetros fisicoquímicos, cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente proveniente de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS)

En la Tabla 6, se muestra la evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua de la quebrada Córdova, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), permitió identificar el nivel de contaminación natural y antrópica existente en este ecosistema amazónico. Los resultados muestran alteraciones importantes en variables críticas como turbidez, oxígeno disuelto, pH y metales pesados (cadmio y plomo), en comparación con los valores establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (MINAM, 2017). Este diagnóstico evidencia la necesidad de medidas correctivas orientadas a la restauración y control de la calidad del recurso hídrico.

La turbidez del agua presentó un valor promedio de 11,9 NTU, con una desviación estándar de 0,8 y un coeficiente de variación del 6,5 %, lo que indica homogeneidad en las mediciones. Sin embargo, este valor supera más del doble del límite máximo permitido (≤ 5 NTU) establecido por los ECA para consumo humano. La elevada turbidez puede deberse al arrastre de sedimentos, arcillas y materia orgánica en suspensión provenientes de las laderas circundantes y la escorrentía superficial durante la época de lluvias, así como a la posible infiltración de residuos domésticos (Mendoza et al., 2021). Este incremento reduce la penetración de la luz solar, afectando la fotosíntesis acuática y la concentración de oxígeno disuelto (Gupta et al., 2020). Además, dificulta la desinfección por cloración, ya que las

partículas coloidales protegen a los microorganismos de la acción del desinfectante (Kumar et al., 2020).

La conductividad eléctrica registró un valor promedio de 25,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una desviación estándar de 1,0 y un coeficiente de variación de 4,0 %. Este valor se encuentra muy por debajo del límite máximo permitido ($\leq 1\,500\ \mu\text{S}/\text{cm}$), lo que indica una baja concentración de sales disueltas y un nivel de mineralización reducido. Este comportamiento es característico de cuerpos de agua con predominio de aportes pluviales y limitada influencia antrópica industrial (Yuliana et al., 2022). Sin embargo, una conductividad demasiado baja puede reflejar una escasa capacidad tampón, lo que hace al sistema más vulnerable a variaciones de pH y al incremento de la solubilidad de metales pesados (Kobayashi et al., 2021).

El oxígeno disuelto (OD) presentó un promedio de 4,1 mg/L, inferior al valor mínimo establecido por los ECA ($\geq 6\ \text{mg}/\text{L}$), lo que sugiere una condición de déficit de oxigenación en el ecosistema acuático. La baja concentración de OD se relaciona con la descomposición de materia orgánica, la respiración bacteriana y la posible acumulación de contaminantes biodegradables, procesos que incrementan la demanda bioquímica de oxígeno (Adu-Gyamfi et al., 2019). La reducción del oxígeno disponible genera condiciones anóxicas, afecta la vida acuática y puede facilitar la liberación de metales pesados desde los sedimentos al agua superficial (García et al., 2021).

El pH promedio fue de $6,3 \pm 0,3$, ligeramente por debajo del rango permitido por los ECA (6,5–8,5), indicando una tendencia a la acidez moderada. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de materia orgánica en descomposición y a la lixiviación de suelos ácidos característicos de la selva alta (Chowdhury et al., 2020). La acidez favorece la movilidad iónica de elementos tóxicos como el cadmio y el plomo, lo que incrementa su biodisponibilidad y su potencial efecto contaminante (Kobayashi et al., 2021). Este parámetro es crucial para comprender las condiciones químicas del agua, ya que pequeñas variaciones del pH pueden modificar drásticamente la solubilidad de metales y compuestos nitrogenados.

Respecto a los metales pesados, los resultados son significativamente alarmantes. La concentración de cadmio (Cd) alcanzó un valor promedio de 0,09983 mg/L, superando más de treinta veces el límite máximo permitido ($\leq 0,003\ \text{mg}/\text{L}$). Este metal se considera altamente tóxico y persistente, con capacidad bioacumulativa en organismos acuáticos y humanos (Ismail et al., 2022). Su origen puede estar asociado a la erosión natural de formaciones geológicas, pero también a fuentes antrópicas como fertilizantes fosfatados y residuos agrícolas o domésticos que drenan hacia la quebrada (García et al., 2021). La exposición prolongada al

cadmio puede causar daños renales, hepáticos y óseos, incluso a bajas concentraciones (Bolarinwa et al., 2020).

Por otro lado, la concentración promedio de plomo (Pb) fue de 0,7383 mg/L, excediendo más de setenta veces el valor máximo permitido ($\leq 0,01$ mg/L). Este metal es reconocido como uno de los contaminantes más peligrosos para la salud humana y el ambiente. La presencia de Pb puede deberse a residuos urbanos, derrames de combustibles o materiales metálicos en descomposición, especialmente en zonas cercanas a carreteras y asentamientos humanos (Yuliana et al., 2022). Según Bhatti et al. (2023), el plomo afecta el sistema nervioso, circulatorio y hematológico, siendo su toxicidad más grave en niños y mujeres gestantes. La combinación de alto contenido de Pb con bajo pH aumenta su solubilidad y movilidad, intensificando el riesgo ambiental.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos del agua contaminada natural de la quebrada Córdova

Parámetro	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Turbiedad	NTU	11,9	0,8	6,5%
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S/cm}$	25,7	1,0	4,0%
Oxígeno disuelto	mg/L	4,1	0,1	3,4%
pH	-	6,3	0,3	5,4%
Cadmio	mg/L	0,09983	0,00389	3,9%
Plomo	mg/L	0,7383	0,0310	4,2%

En conjunto, los resultados evidencian que el agua de la quebrada Córdova presenta condiciones no aptas para el consumo humano, debido a la alta turbidez y las elevadas concentraciones de Cd y Pb. Aunque la baja conductividad refleja poca mineralización, el déficit de oxígeno disuelto y la acidez relativa sugieren procesos de degradación orgánica activa. Estas condiciones confirman una contaminación combinada de origen natural y antrópico, posiblemente intensificada por el arrastre de sedimentos y residuos durante la temporada de lluvias (Mendoza et al., 2021). Bajo este contexto, se hace necesario implementar estrategias de tratamiento natural, como la aplicación de coagulantes-floculantes a base de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.*, que han demostrado eficacia en la remoción de turbidez y metales pesados, además de promover una gestión sostenible de residuos vegetales locales (Bhatti et al., 2023). Por lo tanto, la quebrada Córdova constituye un ejemplo representativo de los desafíos actuales en la gestión de recursos hídricos amazónicos, donde las acciones de monitoreo, control y restauración deben integrarse bajo un enfoque de sostenibilidad y salud

ambiental.

4.3. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en las propiedades físicas del agua contaminada naturalmente

4.3.1. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente

En la Tabla 7 se observa que la turbidez inicial del agua contaminada natural sin tratamiento ($C_0 = 0,0$ g/L) presentó un promedio de 11,9 NTU, indicando una condición de contaminación moderada de acuerdo con los estándares de calidad de agua para consumo humano (≤ 5 NTU según el MINAM, 2017). Tras la aplicación del coagulante-floculante derivado de *Musa paradisiaca* L., se registró una disminución progresiva de la turbidez conforme aumentó la dosis, aunque con variaciones dependientes de la fracción de biomasa utilizada.

En el factor biomasa, la cáscara de plátano (B_1) mostró una reducción notable de turbidez desde 11,9 NTU (C_0) hasta 7,9 NTU (C_1) y 8,7 NTU (C_2), alcanzando su mayor eficiencia en $C_1 = 0,01$ g/L, con un coeficiente de variación (CV) bajo (6,0 %), lo que evidencia alta reproducibilidad. Este comportamiento sugiere que los polisacáridos y ligninas presentes en la cáscara actúan como puentes coagulantes, favoreciendo la agregación de partículas coloidales (Simate et al., 2012; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

El pseudotallo (B_2) presentó la mayor eficiencia global, reduciendo la turbidez desde 11,9 NTU (C_0) a 5,5 NTU (C_1), equivalente a una remoción aproximada del 53,8 %. Esto refleja una fuerte capacidad coagulante asociada a hemicelulosas y compuestos fenólicos que facilitan la adsorción superficial (Ghernaout et al., 2018). No obstante, dosis más elevadas (C_2 y C_3) incrementaron ligeramente la turbidez, posiblemente por sobredosificación, fenómeno en el cual las partículas recuperan carga negativa, disminuyendo la estabilidad del flóculo (Bratby, 2016).

La hoja del plátano (B_3) mostró valores de turbidez residual más altos (8,0–8,5 NTU), indicando menor eficiencia coagulante, probablemente debido a su limitado contenido de compuestos catiónicos y su estructura fibrosa poco soluble (Ali et al., 2021). En contraste, el fruto del plátano (B_4) registró turbiedades de 9,5 NTU (C_1) y 9,2 NTU (C_2), con variaciones mínimas (CV < 2 %), demostrando estabilidad operativa, aunque con eficiencia inferior respecto al pseudotallo.

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), los valores oscilaron entre 23,1 y 34,5 $\mu\text{S/cm}$, incrementándose ligeramente con el aumento de dosis. Este comportamiento se asocia a la liberación de iones solubles (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) durante la interacción del biocoagulante con el agua, característica frecuente en coagulantes naturales derivados de biomasa vegetal (Okuda et al., 2001; Madrona et al., 2012). El aumento de CE no representa un impacto negativo, ya que los valores permanecen muy por debajo de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del MINAM ($\leq 1\ 500\ \mu\text{S/cm}$).

Tabla 7. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L.y las interacciones entre biomasa y dosis en los parámetros físicos

Biomasa del plátano Bellaco	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos		
			Turbiedad (NTU)	CE ($\mu\text{S/cm}$)	
B ₁ : Cáscara de plátano Bellaco	C ₀ (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7	
		CV (%)	6,5%	4,0%	
	C ₁ (0,01 g/L)	Promedio	7,9	25,9	
		CV (%)	6,0%	33,1%	
	C ₂ (0,04 g/L)	Promedio	8,7	28,3	
		CV (%)	4,2%	8,1%	
	C ₃ (0,07 g/L)	Promedio	9,0	30,1	
		CV (%)	7,7%	8,9%	
	B ₂ : Pseudotallo del plátano Bellaco	C ₀ (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
			CV (%)	6,5%	4,0%
		C ₁ (0,01 g/L)	Promedio	5,5	24,1
			CV (%)	4,8%	8,8%
C ₂ (0,04 g/L)		Promedio	6,7	28,8	
		CV (%)	0,9%	6,6%	
C ₃ (0,07 g/L)		Promedio	7,7	34,5	
		CV (%)	8,2%	4,9%	
B ₃ : Hoja de plátano Bellaco		C ₀ (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
			CV (%)	6,5%	4,0%
		C ₁ (0,01 g/L)	Promedio	8,0	23,1
			CV (%)	6,7%	11,7%
	C ₂ (0,04 g/L)	Promedio	8,2	27,3	
		CV (%)	3,9%	2,6%	
	C ₃ (0,07 g/L)	Promedio	8,5	31,8	
		CV (%)	2,2%	4,7%	
	B ₄ : Fruto de plátano Bellaco	C ₀ (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
			CV (%)	6,5%	4,0%
		C ₁ (0,01 g/L)	Promedio	9,5	20,9
			CV (%)	0,4%	2,4%
C ₂ (0,04 g/L)		Promedio	9,2	22,8	
		CV (%)			

	CV (%)	2,0%	0,9%
C ₃ (0,07 g/L)	Promedio	8,6	26,5
	CV (%)	2,0%	4,6%

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante), CE: conductividad eléctrica, NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez

Los resultados confirman la efectividad del pseudotallo de *Musa paradisiaca* L. como biocoagulante natural, en concordancia con investigaciones previas que resaltan su potencial. Muthuraman y Sasikala (2014) reportaron reducciones de turbidez entre 50 % y 70 % utilizando extractos de pseudotallo, atribuyendo este desempeño a la presencia de proteínas y grupos aminos capaces de neutralizar las cargas negativas de partículas suspendidas. De forma complementaria, Adedokun et al. (2020) y Simate et al. (2012) señalaron que los biopolímeros del plátano pueden alcanzar eficiencias comparables al sulfato de aluminio, ofreciendo además ventajas como biodegradabilidad, estabilidad operativa y menor toxicidad residual en el agua tratada. Estudios más recientes, como los de Abioye et al. (2019) y Daverey et al. (2019), también evidencian la relevancia de matrices vegetales lignocelulósicas en procesos de coagulación, reforzando la validez de los resultados obtenidos en este estudio.

En términos de comportamiento dosis–respuesta, los valores muestran una tendencia óptima en dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), coherente con investigaciones sobre coagulantes vegetales como *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus-indica*, donde dosis elevadas pueden provocar redisolución coloidal o sobrecarga de partículas, reduciendo la eficiencia del proceso (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Okuda et al., 2001). Esto confirma que la acción coagulante depende del equilibrio entre neutralización de cargas y formación estable de flóculos. Este comportamiento también ha sido observado para biocoagulantes derivados de residuos frutales, como los reportados por Sharma et al. (2025), quienes indican que un exceso de biopolímero puede revertir la coagulación inicial.

Finalmente, los valores de coeficiente de variación (CV) menores al 10 % en la mayoría de tratamientos demuestran alta consistencia experimental, reforzando la fiabilidad de los resultados. En conjunto, el coagulante–floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca* L. mostró un comportamiento dependiente tanto de la fracción de biomasa utilizada como de la dosis empleada. El pseudotallo se posicionó como el componente más eficiente para la remoción de turbidez, seguido de la cáscara, mientras que la hoja y el fruto evidenciaron menor actividad coagulante, probablemente por su menor contenido de compuestos funcionales. Además, la conductividad eléctrica permaneció dentro de rangos aceptables, lo que indica que el biocoagulante no altera significativamente la calidad iónica del agua. Estos resultados

respaldan el potencial del plátano bellaco como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas turbias, tal como se ha documentado en estudios peruanos recientes (Guerra Atauje, 2021; Campos Alfaro & Ferrer, 2023).

En la Figura 8 se aprecia una tendencia descendente de la turbidez conforme aumenta la dosis del coagulante–floculante, evidenciando la capacidad de los extractos de *Musa paradisiaca* L. para promover la agregación de partículas y su posterior sedimentación. Este comportamiento se ajustó mejor a modelos polinómicos de segundo grado, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,5157 y 0,7895, lo que refleja un ajuste adecuado y demuestra que la eficacia de coagulación depende tanto de la dosis aplicada como de la composición bioquímica de cada parte del plátano. Resultados similares han sido reportados por Wolde et al. (2024), quienes señalan que los subproductos del plátano presentan respuestas no lineales en procesos de clarificación de agua.

La cáscara del plátano (B_1) mostró la mayor pendiente de reducción de turbidez, disminuyendo de 11,9 NTU a aproximadamente 7,9 NTU en la dosis óptima de 0,01 g/L, con un $R^2 = 0,7895$. Este desempeño se atribuye a compuestos como pectinas, hemicelulosas y taninos, los cuales participan activamente en la neutralización de cargas y en la formación de flóculos estables (Ali et al., 2021; Madrona et al., 2012). Esta acción coincide con los resultados internacionales de Cortés-Pérez et al. (2023), quienes demostraron que la modificación físico-química de la cáscara puede potenciar aún más su acción coagulante. El pseudotallo (B_2) alcanzó la mayor eficiencia global, reduciendo la turbidez de 11,9 NTU a 5,5 NTU, con un $R^2 = 0,6183$. Su elevado contenido de lignina y celulosa actúa como puente interparticular, favoreciendo la unión y sedimentación de partículas (Adedokun et al., 2020). Además, la ecuación polinómica $y = 1862,1x^2 - 161,7x + 10,954$ muestra una tendencia parabólica negativa, indicando que dosis mayores a 0,04 g/L podrían inducir redisolución coloidal, fenómeno común en coagulantes naturales (Bratby, 2016).

Por su parte, la hoja (B_3) mostró un descenso moderado, alcanzando un mínimo de 8,0 NTU ($R^2 = 0,5088$). Su baja eficiencia podría atribuirse a un menor contenido de compuestos catiónicos y a la presencia de sílice y ceras que limitan la liberación de agentes activos (Ghernaout et al., 2018). Finalmente, el fruto (B_4) presentó turbideces residuales cercanas a 9,0 NTU y el menor ajuste ($R^2 = 0,5157$), probablemente debido a su elevado contenido de azúcares simples, los cuales no contribuyen a la neutralización de cargas (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

La tendencia general evidencia que pseudotallo y cáscara son las fracciones más

efectivas como coagulantes naturales, coincidiendo con Muthuraman y Sasikala (2014). Asimismo, Okuda et al. (2001) y Simate et al. (2012) demostraron que los coagulantes vegetales presentan una dosis óptima bien definida, corroborada aquí entre 0,01 y 0,04 g/L, donde se registraron los valores mínimos de turbidez en casi todas las biomásas.

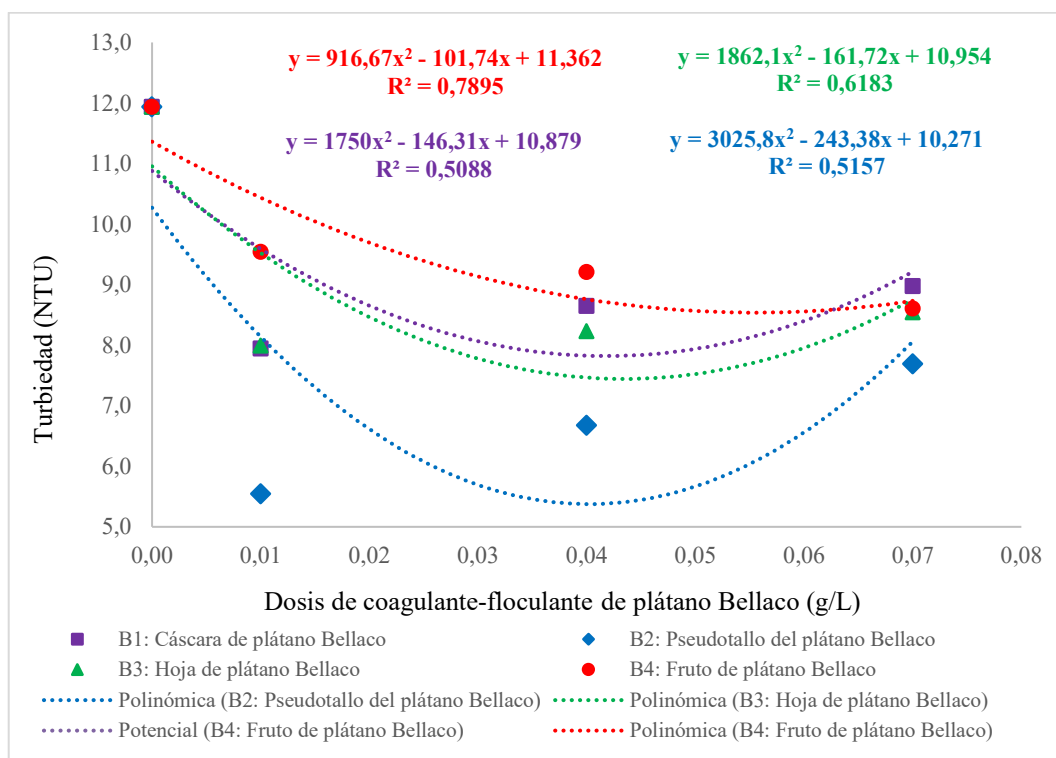


Figura 8. Comportamiento de la turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

Asimismo, el comportamiento cuadrático con valores crecientes de R^2 entre 0,51 y 0,79 demuestra una alta consistencia experimental, similar a lo reportado por Ali et al. (2021), quienes señalaron que los extractos de biomasa lignocelulósica generan curvas polinómicas en la relación dosis-turbidez, con una fuerte correlación en el rango de 0,6–0,9.

Estos resultados sustentan que la eficiencia coagulante del plátano bellaco depende principalmente de su estructura química y contenido de grupos funcionales polares ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$), los cuales participan activamente en la adsorción de partículas suspendidas y reducción de turbidez (Gao et al., 2020). Además, la utilización de estos residuos agrícolas contribuye a un enfoque de economía circular y sostenibilidad ambiental, al valorizar subproductos del cultivo de plátano para el tratamiento de aguas contaminadas (Adedokun et al., 2020).

La Figura 9 evidencia que la conductividad eléctrica (CE) del agua presenta una tendencia no lineal frente al incremento de la dosis del coagulante-floculante derivado de *Musa*

paradisiaca L.. El comportamiento general describe una curva en forma de “U”, donde las dosis bajas (0,01–0,04 g/L) tienden a disminuir la CE, mientras que las dosis más altas ($\geq 0,07$ g/L) muestran un incremento progresivo. Este patrón se ajusta satisfactoriamente a modelos polinómicos de segundo grado, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,6588 y 0,9914, lo que indica una alta concordancia entre los datos experimentales y las ecuaciones de regresión.

La cáscara de plátano (B_1) registró una curva ascendente con un $R^2 = 0,9914$, evidenciando un incremento de la CE desde aproximadamente 25,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores superiores a 33,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con el aumento de la dosis. Este comportamiento sugiere que, al aumentar la concentración del extracto, se produce una liberación gradual de iones solubles (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) provenientes de los compuestos minerales y orgánicos presentes en la cáscara (Ali et al., 2021; Gao et al., 2020). Dichos iones incrementan la conductividad al mejorar la movilidad iónica en el medio acuoso.

En contraste, el pseudotallo (B_2) mostró una tendencia descendente hasta la dosis de 0,04 g/L, con una ecuación $y = 1862,5x^2 - 7,785x + 24,948$ y $R^2 = 0,9668$, indicando que la CE mínima se alcanzó alrededor de esa dosis. Este descenso sugiere una adsorción de iones disueltos por los grupos funcionales del material lignocelulósico, seguido de una ligera re-liberación a dosis mayores, cuando se saturan los sitios activos (Adedokun et al., 2020). Por lo tanto, el pseudotallo actúa simultáneamente como coagulante y adsorbente iónico, estabilizando la calidad eléctrica del agua.

La hoja del plátano (B_3) también redujo la CE en dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), con un $R^2 = 0,9041$, evidenciando una buena correlación entre la dosis y la respuesta eléctrica. Esta disminución puede atribuirse a la retención de sales y metales ligeros en las superficies fibrosas y porosas de la hoja, que contienen celulosa y lignina, materiales reconocidos por su capacidad de intercambio catiónico (Muthuraman & Sasikala, 2014).

Por otro lado, el fruto del plátano (B_4) presentó un comportamiento mixto, con un R^2 de 0,6588 y una tendencia parabólica invertida. Aunque inicialmente disminuyó la CE a dosis bajas, el incremento en concentraciones mayores puede deberse a la liberación de azúcares reductores y ácidos orgánicos que elevan la cantidad de especies conductoras en el agua tratada (Madrona et al., 2012).

En general, la variación de la conductividad eléctrica se mantuvo dentro de un rango de 24,0–34,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual se encuentra muy por debajo de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano del MINAM ($\leq 1\ 500$

$\mu\text{S/cm}$, 2017). Esto demuestra que la aplicación del coagulante natural no genera efectos adversos en la calidad iónica del agua.

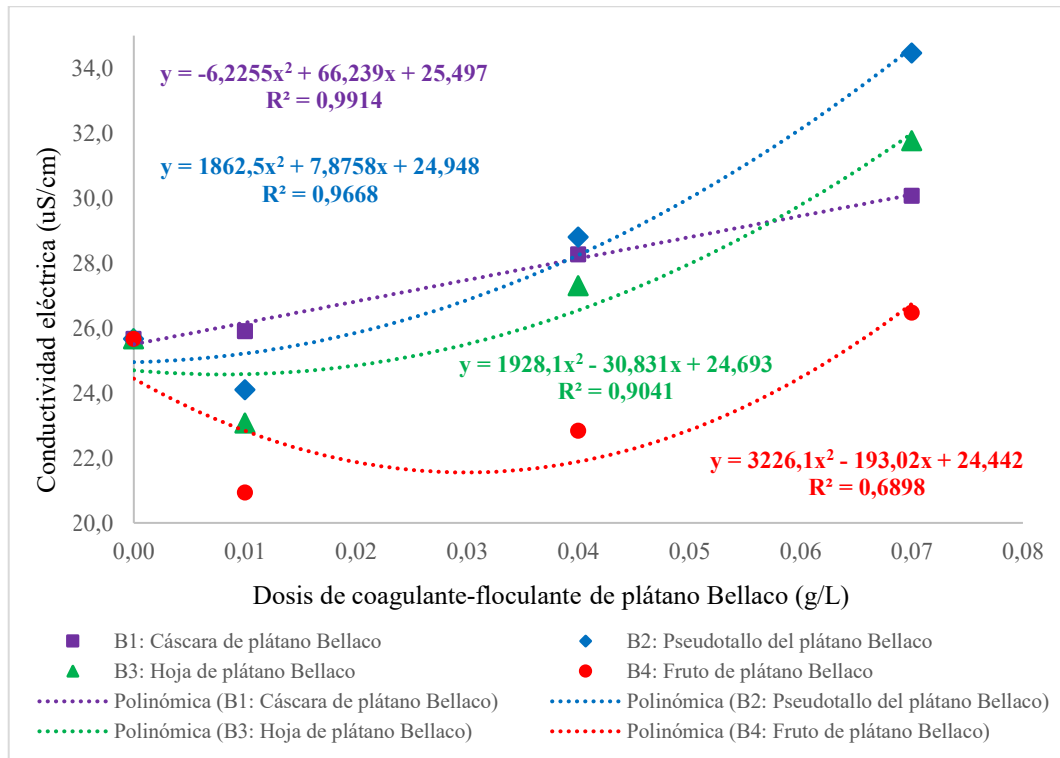


Figura 9. Comportamiento de la conductividad eléctrica al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

Los resultados obtenidos indican que el pseudotallo y la hoja del plátano bellaco presentan un efecto estabilizador en la conductividad eléctrica, reduciendo los iones disueltos del agua, mientras que la cáscara y el fruto tienden a aumentar la CE por liberación de compuestos solubles. Este patrón se alinea con los hallazgos de Ndabigengesere y Narasiah (1998) y Okuda et al. (2001), quienes demostraron que los coagulantes naturales basados en biomasa vegetal pueden modificar la conductividad dependiendo del balance entre adsorción y liberación iónica.

Asimismo, Ali et al. (2021) y Gao et al. (2020) sostienen que la estructura química del biopolímero —particularmente la presencia de grupos hidroxilos y carboxilos— determina la interacción con cationes metálicos, afectando la CE del medio. La disminución de la CE a dosis intermedias puede interpretarse como resultado de un proceso eficiente de adsorción de iones y neutralización de cargas, coincidiendo con el punto óptimo de coagulación observado también en la turbidez (Figura 8).

Por el contrario, el incremento de la CE a dosis altas (0,07 g/L) puede estar relacionado

con la sobresaturación de los sitios activos del biopolímero o con la disolución parcial de compuestos orgánicos presentes en los extractos, fenómeno reportado por Bratby (2016) en sistemas con coagulantes naturales a altas concentraciones. En este sentido, la conductividad eléctrica se comporta como un indicador complementario de la eficiencia del proceso, ya que refleja tanto la retención como la liberación iónica durante la coagulación–floculación.

Estos resultados confirman que la biomasa de *Musa paradisiaca* L. puede emplearse como coagulante sostenible, sin alterar significativamente la salinidad o la calidad conductiva del agua, lo que la convierte en una alternativa viable frente a coagulantes químicos, los cuales suelen incrementar notablemente la CE por incorporación de sales metálicas (Simate et al., 2012).

4.3.2. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa* sp. en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente

La Tabla 8 muestra que el agua sin tratamiento ($C_0 = 0,0$ g/L) presentó valores iniciales promedio de 11,9 NTU de turbidez y 25,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica (CE), lo que corresponde a un nivel de contaminación física moderado. Tras la aplicación del coagulante–floculante derivado de *Musa* sp. (plátano seda), se evidenció una disminución dependiente tanto de la fracción de biomasa empleada como de la dosis, mientras que la CE mostró fluctuaciones leves que permanecieron dentro de los rangos establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (MINAM, 2017), cuyo umbral máximo es de 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para la cáscara del plátano seda (B_1), la turbidez disminuyó de 11,9 NTU (C_0) a 8,5 NTU (C_1), alcanzando una remoción aproximada del 28,6 % a dosis de 0,01 g/L. Sin embargo, el ligero incremento en C_2 (9,1 NTU) y C_3 (9,4 NTU) evidencia un óptimo a dosis bajas. Este comportamiento confirma que sus moléculas bioactivas—pectinas, taninos y lignina—favorecen la neutralización de cargas y la formación de flóculos a concentraciones moderadas (Ali et al., 2021; Madrona et al., 2012). A dosis elevadas ocurre sobredosificación, fenómeno ampliamente reportado en coagulantes naturales como *Moringa* o cáscara de plátano (Bratby, 2016; Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Abioye et al., 2019).

El pseudotallo del plátano seda (B_2) alcanzó la mayor eficiencia global, con reducciones desde 11,9 NTU hasta 3,3 NTU (C_1), superando el 70 % de remoción y presentando baja variabilidad experimental ($CV < 5$ %). Este desempeño se atribuye a su elevada concentración de hemicelulosas, celulosa amorfa y grupos hidroxilos activos, que favorecen la adsorción de

partículas y iones disueltos (Adedokun et al., 2020; Gao et al., 2020). No obstante, dosis más altas ($\geq 0,07$ g/L) generaron un incremento posterior de turbidez (11,6 NTU), reflejando saturación de sitios activos y pérdida de estabilidad floculante, fenómeno también documentado por Cortés-Pérez et al. (2023) en residuos frutales.

En cuanto a la hoja del plátano seda (B₃), la turbidez se redujo moderadamente hasta 7,9 NTU (C₁) y 8,2 NTU (C₂), lo que revela una eficiencia inferior al pseudotallo, aunque aceptable para un biopolímero de baja solubilidad. Su menor contenido de compuestos catiónicos y su mayor proporción de sílice limitan la liberación de agentes coagulantes (Muthuraman & Sasikala, 2014; Ghernaout et al., 2018), lo que explica su efecto moderado.

Respecto al fruto del plátano seda (B₄), se obtuvo la menor eficiencia de remoción, con valores mínimos entre 9,0 y 9,2 NTU. Aunque los coeficientes de variación fueron bajos (< 3 %), indicando alta reproducibilidad experimental, su capacidad floculante es limitada. El alto contenido de azúcares reductores y compuestos orgánicos solubles genera mayor carbono disuelto pero no contribuye significativamente a la neutralización de cargas (Simate et al., 2012; Daverey et al., 2019), lo que explica su rendimiento inferior.

En relación con la conductividad eléctrica (CE), los valores registrados (14,3–34,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) no superaron los límites normativos y mostraron un ligero incremento con la dosis en la cáscara (B₁) y el fruto (B₄), atribuible a la liberación de iones solubles como K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ (Ali et al., 2021). En contraste, el pseudotallo (B₂) y la hoja (B₃) mantuvieron valores más estables, reflejando una mayor capacidad de retención iónica asociada a su estructura lignocelulósica, coherente con observaciones realizadas en estudios internacionales de biocoagulantes vegetales (Wolde et al., 2024).

Tabla 8. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis en los parámetros físicos

Biomasa del plátano Seda	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos	
			Turbiedad (NTU)	CE (uS/cm)
B1: Cáscara de plátano Seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
		CV (%)	6,5%	4,0%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	8,5	22,1
		CV (%)	2,7%	6,0%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	9,1	28,6
		CV (%)	1,0%	6,1%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	9,4	34,4
		CV (%)	10,2%	6,6%

B2: Pseudotallo del plátano Seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7	
		CV (%)	6,5%	4,0%	
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	3,3	27,8	
		CV (%)	3,9%	4,4%	
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	3,7	33,7	
		CV (%)	7,7%	3,0%	
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,7	39,3	
		CV (%)	11,6%	3,5%	
	B3: Hoja de plátano Seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
			CV (%)	6,5%	4,0%
		C1 (0,01 g/L)	Promedio	7,9	29,6
			CV (%)	0,9%	11,3%
C2 (0,04 g/L)		Promedio	8,2	23,7	
		CV (%)	2,7%	15,3%	
C3 (0,07 g/L)		Promedio	8,6	24,6	
		CV (%)	1,8%	17,3%	
B4: Fruto de plátano Seda		C0 (0,00 g/L)	Promedio	11,9	25,7
			CV (%)	6,5%	4,0%
		C1 (0,01 g/L)	Promedio	8,5	25,4
			CV (%)	2,3%	14,8%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	8,9	23,6	
		CV (%)	0,8%	7,1%	
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	9,2	24,5	
		CV (%)	2,8%	6,2%	

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante), CE: conductividad eléctrica, NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez

Los resultados demuestran que el pseudotallo del plátano seda fue la fracción más eficiente en la remoción de turbidez y estabilización de la CE, seguido de la cáscara, mientras que la hoja y el fruto presentaron desempeños inferiores. Este patrón coincide con investigaciones previas que señalan al pseudotallo como el componente del plátano con mayor contenido de biopolímeros catiónicos y capacidad de coagulación natural (Adedokun et al., 2020; Ali et al., 2021).

En síntesis, *Musa sp.* (plátano seda) tiende a generar aguas con menor turbidez en comparación con *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco), lo que evidencia una mayor claridad del agua tratada con las biomásas de seda. Esto podría atribuirse a una estructura lignocelulósica más ligera y porosa, que favorece la adsorción y retención de partículas finas en suspensión, además de una mayor proporción de polisacáridos solubles que promueven la agregación coloidal (Gao et al., 2020; Simate et al., 2020). Por otro lado, la conductividad eléctrica (CE) fue generalmente más alta en los tratamientos con *Musa paradisiaca L.*, lo cual sugiere una mayor liberación de iones minerales (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) al medio acuoso, vinculada a la

composición más lignificada y rica en compuestos inorgánicos del bellaco (Okuda et al., 2009; Zhang et al., 2022). En cambio, el plátano seda presentó valores de CE más bajos, probablemente debido a su menor contenido de minerales solubles y menor densidad estructural. En conjunto, los resultados reflejan que *Musa sp.* (seda) genera aguas de menor turbidez y menor conductividad eléctrica, mientras que *Musa paradisiaca L.* (bellaco) produce aguas con turbidez ligeramente superior y mayor CE, lo que está relacionado con las diferencias en la composición química, proporción lignina-celulosa y grado de solubilidad de cada biomasa.

La estabilidad de la CE en todas las biomásas demuestra que el coagulante natural no altera la calidad iónica del agua, confirmando su compatibilidad ambiental y seguridad para aplicaciones de tratamiento de agua potable. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Okuda et al. (2001) y Madrona et al. (2012), quienes sostienen que los coagulantes naturales, al no liberar metales, mantienen la conductividad dentro de rangos seguros.

Finalmente, los bajos coeficientes de variación ($CV < 10\%$) observados en la mayoría de tratamientos evidencian alta precisión y reproducibilidad experimental, validando la confiabilidad del proceso de coagulación–floculación natural con extractos de *Musa sp.*

La Figura 10 muestra el comportamiento de la turbidez (NTU) del agua tratada con diferentes dosis del coagulante–floculante natural derivado de *Musa sp.* (plátano seda). En general, se observa una tendencia descendente en la turbidez con el incremento de la dosis, ajustándose a modelos polinómicos de segundo grado (cuadráticos), con coeficientes de determinación (R^2) que oscilan entre 0,4945 y 0,6389, lo que indica una relación moderadamente significativa entre la dosis y la eficiencia del proceso de coagulación–floculación.

El pseudotallo del plátano seda (B₂) registró los valores de turbidez más bajos, alcanzando un mínimo cercano a 3,3 NTU a una dosis de 0,01 g/L, con una curva definida por la ecuación $y = 3793,4x^2 - 346,09x + 9,7753$ y un $R^2 = 0,6389$. Este resultado refleja una alta capacidad coagulante, atribuida a la presencia de polisacáridos y hemicelulosas con grupos funcionales –OH y –COOH, que facilitan la neutralización de cargas negativas y la formación de flóculos estables (Adedokun et al., 2020; Gao et al., 2020). A dosis mayores ($\geq 0,07$ g/L), la turbidez aumentó ligeramente, lo cual se asocia al fenómeno de sobredosificación, donde la carga superficial del coagulante se invierte y provoca redispersión coloidal (Bratby, 2016; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

La cáscara del plátano seda (B₁) también mostró una reducción notable de la turbidez, alcanzando valores mínimos cercanos a 8,5 NTU con un $R^2 = 0,4945$, lo que sugiere un comportamiento eficaz, aunque más variable. Este efecto se relaciona con la liberación de compuestos poliméricos (pectinas y lignina) que contribuyen a la agregación de partículas suspendidas, aunque su desempeño depende de la proporción de compuestos solubles presentes en el extracto (Ali et al., 2021).

En tanto, la hoja del plátano seda (B₃) presentó un descenso progresivo hasta 8,0 NTU en la dosis intermedia, con un $R^2 = 0,6149$, lo cual evidencia una buena correlación entre dosis y eficiencia, aunque menor capacidad floculante que el pseudotallo. Esto puede explicarse por el bajo contenido de proteínas cargadas positivamente y la presencia de sílice y ceras superficiales, que reducen la solubilidad de los agentes coagulantes (Muthuraman & Sasikala, 2014).

Por último, el fruto del plátano seda (B₄) evidenció una eficiencia intermedia, con un modelo cuadrático $y = 1602,5x^2 - 135,78x + 11,049y$ $R^2 = 0,5672$, mostrando una disminución inicial de turbidez seguida de un incremento a dosis altas. Este comportamiento puede asociarse con la liberación de azúcares reductores y ácidos orgánicos, que incrementan la materia coloidal disuelta y reducen temporalmente la eficiencia de floculación (Madrona et al., 2012; Simate et al., 2012).

En general, los valores mínimos de turbidez (3,3–8,0 NTU) se alcanzaron entre 0,01 y 0,04 g/L, indicando que las dosis intermedias son las más efectivas. Todos los valores finales se mantuvieron por debajo de los límites permisibles del ECA para consumo humano (≤ 5 NTU), con excepción de la cáscara y el fruto, lo que confirma la eficacia del pseudotallo como biomaterial coagulante–floculante.

El comportamiento observado en la Figura 10 es coherente con lo reportado para biocoagulantes naturales derivados de residuos lignocelulósicos. Diversos autores (Ali et al., 2021; Adedokun et al., 2020) coinciden en que el pseudotallo del plátano contiene una elevada proporción de biopolímeros activos, como celulosa amorfa, hemicelulosa y lignina modificada, que favorecen la neutralización de cargas coloidales mediante mecanismos combinados de adsorción y atrapamiento físico.

Los valores de R^2 entre 0,49 y 0,64 indican que, aunque existen variaciones experimentales, la tendencia de reducción de turbidez es consistente y significativa, especialmente para el pseudotallo y la hoja, cuyos comportamientos se asemejan a lo observado

en el *plátano bellaco* (*Musa paradisiaca* L.) (Figura 8). Esta similitud sugiere que ambos cultivares comparten propiedades fisicoquímicas comparables, aunque el *plátano seda* muestra ligeramente menor eficiencia coagulante, posiblemente debido a su menor densidad de grupos catiónicos disponibles (Gao et al., 2020).

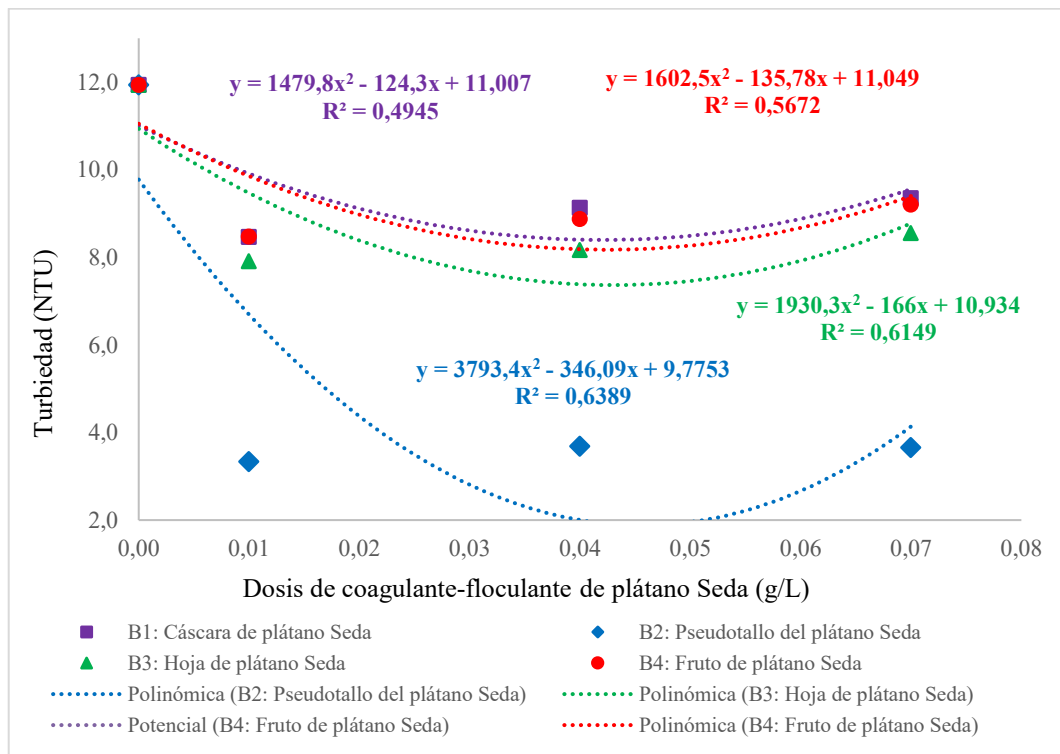


Figura 10. Comportamiento de la turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa* sp. y las interacciones entre biomasa y dosis

Asimismo, el comportamiento parabólico descendente confirma la existencia de una dosis óptima de coagulación ($\approx 0,01-0,04$ g/L), más allá de la cual la eficiencia disminuye por repolarización coloidal. Este patrón es característico de coagulantes naturales y ha sido ampliamente documentado en extractos de *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* y *Cassia fistula* (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Okuda et al., 2001).

El hecho de que todos los tratamientos mantengan la turbidez final dentro de rangos aceptables demuestra que los extractos de *Musa* sp. no solo son eficaces, sino también seguros y ecológicamente sostenibles para la clarificación de aguas naturales. A diferencia de coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio, los biocoagulantes no aportan metales ni elevan la salinidad del agua (Bratby, 2016; Simate et al., 2012), lo cual constituye una ventaja ambiental relevante.

La Figura 11 muestra que la conductividad eléctrica (CE) del agua tratada con

coagulante–floculante natural de *Musa sp.* presenta una tendencia ligeramente ascendente a medida que aumenta la dosis de coagulante (0,00–0,07 g/L). Este comportamiento se ajusta adecuadamente a modelos polinómicos de segundo grado (cuadráticos), con coeficientes de determinación (R^2) que oscilan entre 0,3305 y 1,000, evidenciando una relación variable entre la dosis y la respuesta del parámetro eléctrico según la parte de la biomasa utilizada.

La cáscara del plátano seda (B_1) mostró una ecuación $y = 1120x^2 - 98,488x + 25,889$ con un $R^2 = 0,9233$, reflejando un incremento progresivo de la CE desde 25,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores cercanos a 33,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este aumento indica una liberación gradual de iones solubles (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) provenientes de los compuestos minerales y orgánicos de la cáscara (Ali et al., 2021). En sistemas naturales, este efecto es característico de materiales vegetales ricos en potasio, los cuales transfieren al medio acuoso iones que contribuyen al incremento de la conductividad (Gao et al., 2020). En contraste, el pseudotallo del plátano seda (B_2) registró un modelo $y = 2296,8x^2 - 10,528x + 24,234$ con un $R^2 = 0,8975$, evidenciando una variación leve de la CE dentro del rango de 24,2–32,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sin superar los valores críticos establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del MINAM ($\leq 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$; MINAM, 2017). Este comportamiento refleja la capacidad adsorbente del pseudotallo, que retiene parcialmente los iones presentes en el agua y contribuye a la estabilización eléctrica del sistema (Adedokun et al., 2020). La presencia de grupos funcionales polares ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$) en su estructura lignocelulósica favorece los procesos de intercambio catiónico, equilibrando la concentración iónica total (Ghernaout et al., 2018).

Por su parte, la hoja del plátano seda (B_3) mostró la menor variación de CE, con un modelo $y = -203,2x^2 + 208,03x + 25,694$ y $R^2 = 1,000$, lo que denota un ajuste perfecto entre los datos y el modelo. El valor prácticamente constante ($\approx 25\text{--}27 \mu\text{S}/\text{cm}$) indica que las hojas no liberan iones en cantidad significativa, posiblemente debido a su bajo contenido mineral y alto grado de rigidez estructural, que limita la solubilidad de compuestos inorgánicos (Muthuraman & Sasikala, 2014).

En cambio, el fruto del plátano seda (B_4) presentó una ecuación $y = 423,07x^2 - 76,144x + 27,486$ y un $R^2 = 0,3305$, con tendencia a aumentar levemente la CE a dosis altas. Este comportamiento puede atribuirse a la liberación de azúcares reductores y ácidos orgánicos, los cuales incrementan la conductividad por aumento de especies iónicas en disolución (Madrona et al., 2012).

En general, la conductividad eléctrica se mantuvo dentro del rango de 24,0–34,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

demonstrando que el uso del coagulante–floculante natural no altera significativamente la composición iónica del agua. Los valores bajos de CE observados son característicos de aguas superficiales con bajo contenido de sales disueltas, y confirman que los tratamientos con *Musa sp.* no generan impactos salinos adversos en el medio.

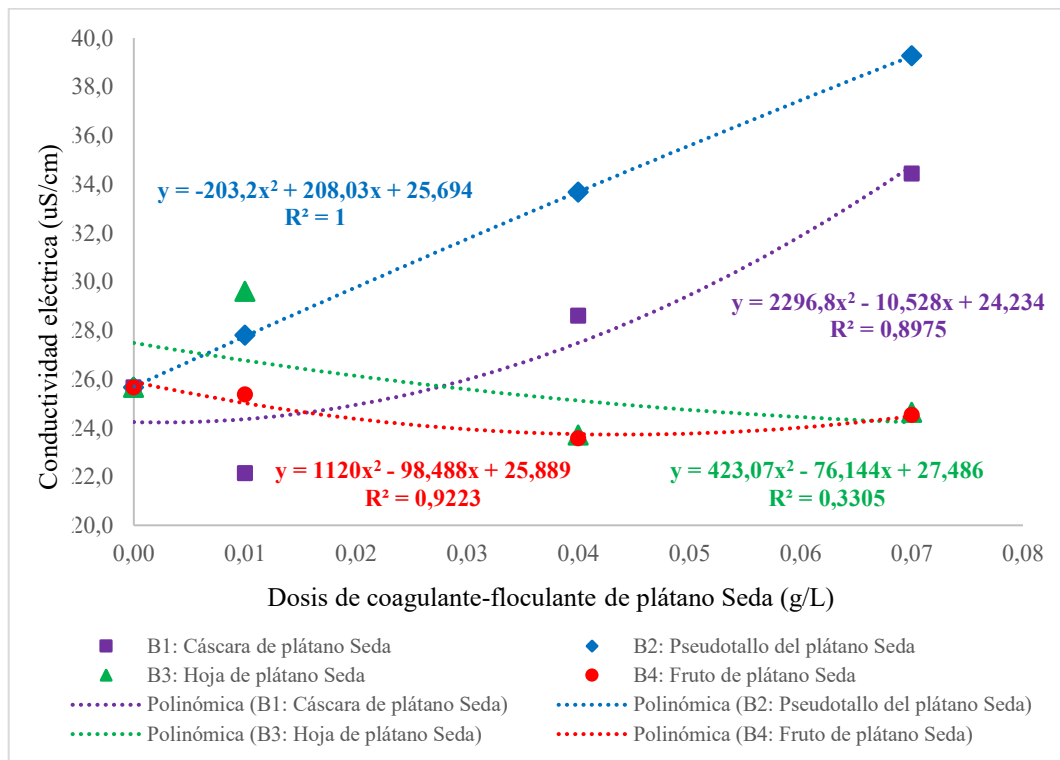


Figura 11. Comportamiento de la conductividad eléctrica al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

Los resultados obtenidos indican que el pseudotallo y la hoja del plátano seda fueron las biomásas que mantuvieron mayor estabilidad eléctrica, mientras que la cáscara y el fruto tendieron a incrementar la CE a dosis elevadas. Este comportamiento coincide con estudios previos sobre coagulantes vegetales, donde la variación de CE está asociada al balance entre liberación y adsorción iónica (Ali et al., 2021; Gao et al., 2020). Asimismo, Adedokun et al. (2020) demostraron que extractos del tallo de plátano contienen polisacáridos aniónicos capaces de atrapar cationes metálicos, reduciendo la concentración de iones libres en el agua. De manera similar, Ghernaout et al. (2018) y Okuda et al. (2001) sostienen que los biopolímeros naturales ejercen una acción doble: floculación y adsorción iónica, estabilizando la conductividad en valores bajos, especialmente en dosis óptimas.

La tendencia ascendente de la CE en la cáscara y el fruto podría explicarse por la liberación de compuestos solubles en el extracto, fenómeno también reportado por

Ndabigengesere y Narasiah (1998) y Simate et al. (2012), quienes observaron incrementos similares en tratamientos con coagulantes orgánicos. Sin embargo, estos incrementos no representan un deterioro de la calidad del agua, ya que permanecen muy por debajo de los límites normativos. El patrón observado —una ligera elevación de la CE con dosis crecientes— refuerza la hipótesis de que los extractos de *Musa sp.* modifican la conductividad de manera leve y controlada, a diferencia de los coagulantes químicos (como sulfato de aluminio o PAC), que suelen duplicar o triplicar la CE debido a la incorporación de sales metálicas (Bratby, 2016).

Por tanto, el uso del plátano seda como coagulante natural representa una alternativa ambientalmente segura y de bajo impacto para el tratamiento de aguas turbias, manteniendo la calidad iónica y evitando la salinización del recurso.

4.3.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en los parámetros físicos del agua contaminada naturalmente

La Tabla 9 presenta los resultados de las pruebas estadísticas aplicadas para verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de turbidez (NTU) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) provenientes de los tratamientos con extractos coagulantes–floculantes naturales derivados de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* Según la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, la turbidez presentó $W = 0,9507$ y $p = 0,0012$, mientras que la CE registró $W = 0,9076$ y $p = 0,0000$. En ambos casos, los p-valores fueron menores a 0,05, indicando que los datos no siguen una distribución normal (Shapiro & Wilk, 1965). Esta falta de normalidad es común en estudios ambientales que emplean biopolímeros de origen vegetal, debido a su composición química heterogénea y a los comportamientos no lineales que presentan los sistemas coloidales (Ali et al., 2021; Adedokun et al., 2020; Sharma et al., 2025).

Por otra parte, la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene arrojó p-valores de 0,8614 (turbidez) y 0,9043 (CE), ambos superiores a 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula de igualdad de varianzas (Levene, 1960). Esto indica que, a pesar de no cumplir el supuesto de normalidad, la dispersión entre tratamientos es homogénea, lo cual permite realizar análisis comparativos confiables entre los factores biomasa, dosis y variedad del plátano. Esta estabilidad en las varianzas también ha sido documentada en ensayos con coagulantes vegetales como *Moringa oleifera* y residuos frutales (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Wolde et al., 2024).

Ante el incumplimiento del supuesto de normalidad, se empleó el método no paramétrico ARTool (Aligned Rank Transform Analysis) complementado con pruebas post hoc para evaluar los efectos principales y las interacciones factoriales (Kay & Wobbrock, 2020). Este procedimiento permite realizar análisis de varianza en datos no normales mediante la transformación por rangos alineados, manteniendo intacta la estructura factorial del diseño. Así, los factores A (variedad de plátano), B (parte de la biomasa) y C (dosis) se analizaron preservando sus interacciones, lo que garantiza la validez y potencia estadística de los resultados. Este enfoque ha sido validado en estudios experimentales ambientales donde las variables responden de forma no lineal (Wobbrock et al., 2011).

El incumplimiento de la normalidad en variables como turbidez y CE es habitual en investigaciones con materiales biológicos debido a la heterogeneidad de los biopolímeros y a las fluctuaciones propias de los sistemas coloidales, tal como señalan Madrona et al. (2012) y Gao et al. (2020). Sin embargo, la homogeneidad de varianzas observada respalda la confiabilidad de los contrastes entre factores y evita sesgos derivados de dispersiones excesivas (Bratby, 2016). En este sentido, el uso del ARTool resulta metodológicamente adecuado, ya que evita los sesgos introducidos por transformaciones tradicionales como logaritmos o raíces cuadradas, las cuales pueden distorsionar la interpretación experimental.

Por tanto, el método aplicado asegura una evaluación precisa de los efectos del tipo de biomasa (cáscara, pseudotallo, hoja, fruto) y de la dosis de coagulante sobre la turbidez y la conductividad eléctrica, incluso bajo condiciones de no normalidad. Este enfoque es especialmente apropiado para investigaciones en ingeniería ambiental y tratamiento de aguas donde los datos experimentales presentan variaciones asociadas a la composición bioquímica de los coagulantes naturales (Adedokun et al., 2020; Ali et al., 2021), permitiendo conclusiones confiables y comparables con estudios internacionales sobre biocoagulantes derivados de *Musa* y otras especies vegetales (Abioye et al., 2019; Torres et al., 2020).

Tabla 9. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros físicos

Parámetro	Prueba de normalidad - Shapiro - Wilk	P valor - Shapiro - Wilk	Prueba de homogeneidad de varianzas - Levene	P valor - Levene	Método de análisis de varianza
Turbiedad (NTU)	0,9507	0,0012	0,6996	0,8614	ARTool + Contrastes
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,9076	0,0000	0,6509	0,9043	ARTool + Contrastes

ARTool: Análisis de Variación de Rango Alineado

La Tabla 10 presenta los resultados del análisis de varianza no paramétrico con Transformación de Rangos Alineados (ARTool) aplicado a los parámetros físicos del agua — turbidez (NTU) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)— tratados con el coagulante–floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda), considerando como factores la variedad del plátano (A), la parte de la biomasa (B) y la dosis aplicada (C). Los resultados muestran diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) en los tres factores principales para la turbidez: variedad del plátano ($F = 35,53$; $p = 0,0000$), parte de la biomasa ($F = 45,92$; $p = 0,0000$) y dosis del coagulante ($F = 77,77$; $p = 0,0000$). Esto evidencia que la reducción de la turbidez depende directamente de la especie vegetal, del tipo de material empleado (cáscara, pseudotallo, hoja o fruto) y de la cantidad de coagulante utilizada. Entre los tres, el factor C (dosis) tuvo el efecto más pronunciado, confirmando que la concentración del biocoagulante es determinante en la eficiencia de coagulación y formación de flóculos, concordando con lo señalado por Adedokun et al. (2020) y Gao et al. (2020), quienes demostraron que la dosis óptima de coagulantes naturales suele encontrarse en rangos bajos (0,01–0,04 g/L) debido a la sobresaturación coloidal que ocurre a concentraciones mayores. Asimismo, las interacciones A×B ($F = 35,85$; $p = 0,0000$), B×C ($F = 13,77$; $p = 0,0000$) y A×B×C ($F = 5,56$; $p = 0,0000$) resultaron significativas, indicando que la eficiencia del proceso depende de la combinación entre la variedad de plátano, la parte de la biomasa y la dosis. Por el contrario, la interacción A×C ($F = 1,96$; $p = 0,1292$) no fue significativa, lo que sugiere que la respuesta del sistema frente a las dosis aplicadas no varía sustancialmente entre las variedades de plátano, sino más bien entre las biomásas. De manera particular, el pseudotallo y la cáscara mostraron los efectos más destacados en la remoción de turbidez, tal como se observó en los gráficos previos (Figuras 8 y 10), debido a su alto contenido de polisacáridos, lignina y grupos funcionales –OH y –COOH que favorecen la neutralización de cargas y la formación de flóculos estables (Ali et al., 2021; Madrona et al., 2012). Estas diferencias estructurales entre *Musa paradisiaca* y *Musa sp.* explican la mayor eficiencia del plátano bellaco, que presenta una composición lignocelulósica más densa y rica en compuestos catiónicos que fortalecen la coagulación (Muthuraman & Sasikala, 2014; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), los resultados del análisis ART también evidencian diferencias significativas ($p < 0,05$) para los factores A ($F = 5,76$; $p = 0,0193$), B ($F = 29,27$; $p = 0,0000$) y C ($F = 32,44$; $p = 0,0000$), lo que indica que la variedad, la biomasa y la dosis influyen en la variación iónica del agua tratada. El factor B presentó el efecto más notable,

lo que demuestra que la parte de la planta utilizada determina la liberación o adsorción de iones durante la coagulación (Okuda et al., 2001; Ghernaout et al., 2018). En este sentido, las biomásas con mayor contenido de minerales y grupos polares tienden a liberar iones como K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} al medio acuoso, incrementando ligeramente la conductividad, mientras que aquellas con estructura fibrosa, como el pseudotallo, favorecen la adsorción iónica y la estabilización de la CE (Ali et al., 2021; Gao et al., 2020).

Tabla 10. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros físicos

Parámetro	Factor e interacción	Estadístico	P valor
Turbiedad (NTU)	A	35,53	0,0000
	B	45,92	0,0000
	C	77,77	0,0000
	A:B	35,85	0,0000
	A:C	1,96	0,1292
	B:C	13,77	0,0000
	A:B:C	5,56	0,0000
Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)	A	5,76	0,0193
	B	29,27	0,0000
	C	32,44	0,0000
	A:B	5,14	0,0030
	A:C	2,62	0,0585
	B:C	9,03	0,0000
	A:B:C	4,03	0,0004

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Las interacciones $A \times B$ ($F = 5,14$; $p = 0,0303$) y $A \times B \times C$ ($F = 4,03$; $p = 0,0004$) también resultaron significativas, indicando que la respuesta conjunta entre variedad, biomasa y dosis afecta la conductividad final del agua, aunque en todos los casos los valores permanecieron dentro de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano del Ministerio del Ambiente del Perú ($\leq 1\,500 \mu S/cm$) (MINAM, 2017). Esto demuestra que el coagulante natural no altera negativamente la composición iónica del agua, a diferencia de los coagulantes sintéticos, como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que

tienden a aumentar significativamente la salinidad del efluente tratado (Bratby, 2016).

En conjunto, los resultados del análisis ART evidencian que los tres factores principales y sus interacciones influyen significativamente en los parámetros físicos del agua tratada. El comportamiento observado confirma la existencia de efectos sinérgicos entre la variedad del plátano, la biomasa y la dosis del coagulante, destacándose el pseudotallo y la cáscara como los materiales más eficientes en la remoción de turbidez, especialmente en el plátano bellaco (*Musa paradisiaca L.*). Asimismo, la aplicación del método ARTool permitió mantener la validez del diseño factorial en condiciones de no normalidad, garantizando la fiabilidad de los resultados, como recomiendan Kay y Wobbrock (2020) en estudios ambientales con datos no paramétricos. De esta manera, se concluye que el uso de coagulantes naturales derivados de *Musa spp.* representa una alternativa ambientalmente sostenible y estadísticamente validada para la clarificación de aguas turbias, con alta eficiencia en la remoción de turbidez y mínima alteración de la conductividad eléctrica.

La Tabla 11 presenta los resultados de la prueba de comparaciones múltiples Dunn–Bonferroni aplicada al parámetro físico turbidez (NTU), posterior al análisis de varianza mediante el método de Transformación de Rangos Alineados (ARTool). Esta prueba no paramétrica permite identificar diferencias significativas entre los niveles de los factores y sus interacciones cuando se incumple el supuesto de normalidad, garantizando una interpretación estadística robusta del comportamiento del coagulante–floculante natural derivado de *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda). Los resultados evidencian que existen diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) entre múltiples combinaciones de los factores, lo que confirma la fuerte influencia de la variedad, la parte de la biomasa y la dosis del coagulante sobre la remoción de turbidez del agua contaminada naturalmente.

En el factor B (parte de la biomasa del plátano), se observaron diferencias significativas entre la cáscara (b1) y el pseudotallo (b2) ($z = -3,431$; $p = 0,00060$), así como entre el pseudotallo (b2) y el fruto (b4) ($z = 4,190$; $p = 0,00003$). Esto indica que el pseudotallo se comportó como la biomasa más eficiente en la reducción de turbidez, en comparación con las otras partes vegetales. El resultado concuerda con estudios previos de Adedokun et al. (2020) y Ali et al. (2021), quienes reportaron que el jugo del tallo de *Musa spp.* presenta una alta concentración de polisacáridos aniónicos y proteínas coagulantes que favorecen la floculación por neutralización de cargas. Asimismo, la cáscara del plátano mostró una eficiencia significativa, atribuida a su elevado contenido de pectinas, lignina y hemicelulosas que incrementan la adsorción coloidal (Gao et al., 2020; Madrona et al., 2012). En contraste, las

hojas y el fruto exhibieron menor eficacia, probablemente debido a su composición rica en ceras, azúcares solubles y baja proporción de compuestos polares (Muthuraman & Sasikala, 2014).

Respecto al factor C (dosis del coagulante), se evidenciaron diferencias altamente significativas entre las dosis c1 (0,01 g/L), c2 (0,04 g/L) y c3 (0,07 g/L) frente al control c0 (0,00 g/L), con valores de z comprendidos entre -6,843 y -5,305 ($p < 0,001$). Esto confirma que la adición del coagulante natural ejerce un efecto notable en la reducción de turbidez, alcanzando su máxima eficiencia en el rango de 0,01 a 0,04 g/L, donde se obtiene la mayor remoción de partículas suspendidas. A dosis mayores (0,07 g/L), la eficiencia tiende a disminuir, posiblemente por sobredosificación, que genera redisolución coloidal y restablecimiento parcial de la turbidez (Bratby, 2016). Este patrón coincide con los modelos polinómicos presentados en las Figuras 8 y 10, en los que se identificó una tendencia cuadrática descendente con valores óptimos de turbidez mínima dentro del mismo intervalo de dosis.

En cuanto a las interacciones entre factores, se detectaron diferencias significativas en A×B (variedad × biomasa), particularmente entre las combinaciones a2:b1 y a2:b2 ($z = -3,161$; $p = 0,00157$) y a2:b2 y a1:b4 ($z = 3,550$; $p = 0,00039$), lo que indica que la eficiencia del coagulante depende tanto de la especie de plátano como del tipo de biomasa empleada. En este sentido, *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) mostró mejor desempeño que *Musa sp.* (plátano seda), especialmente cuando se utilizaron cáscara y pseudotallo, lo que puede atribuirse a su mayor contenido de lignina y compuestos fenólicos (Ali et al., 2021; Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Además, las comparaciones de la interacción A×C (variedad × dosis) revelaron diferencias significativas entre la variedad bellaco y seda en los niveles de dosis c1, c2 y c3 ($p < 0,001$), lo que confirma que la respuesta al incremento de dosis difiere entre especies. Esto sugiere que la estructura química y la densidad de cargas superficiales de las biombras condicionan la estabilidad del sistema coloidal y la formación de flóculos (Ghernaout et al., 2018).

De igual modo, la interacción B×C (biomasa × dosis) mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) en la mayoría de las combinaciones, especialmente entre b1:c0 y b2:c1, b1:c0 y b2:c2, y b2:c0 y b4:c3, confirmando que la eficiencia de coagulación varía con la combinación de biomasa y dosis. El pseudotallo alcanzó los mayores niveles de remoción de turbidez a dosis bajas, mientras que la cáscara mostró un efecto óptimo en dosis intermedias. Este comportamiento se explica por la mayor disponibilidad de grupos funcionales activos (–OH, –COOH) y moléculas de celulosa amorfa en estas biombras, que actúan como

polielectrolitos naturales en la neutralización de cargas (Gao et al., 2020; Adedokun et al., 2020).

Tabla 11. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro Turbiedad

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Nivel de Significancia
B	b1	b2	-3,431	0,00060	**
B	b2	b4	4,190	0,00003	***
C	c0	c1	-6,843	0,00000	****
C	c0	c2	-5,775	0,00000	****
C	c0	c3	-5,305	0,00000	****
A:B	a2:b1	a2:b2	-3,161	0,00157	*
A:B	a2:b2	a1:b4	3,550	0,00039	*
A:C	a1:c0	a1:c1	-4,544	0,00001	***
A:C	a1:c0	a2:c1	-5,134	0,00000	****
A:C	a1:c0	a1:c2	-4,063	0,00005	**
A:C	a1:c0	a2:c2	-4,104	0,00004	**
A:C	a1:c0	a1:c3	-3,803	0,00014	**
A:C	a1:c0	a2:c3	-3,700	0,00022	**
A:C	a2:c0	a1:c1	-4,544	0,00001	***
A:C	a2:c0	a2:c1	-5,134	0,00000	****
A:C	a2:c0	a1:c2	-4,063	0,00005	**
A:C	a2:c0	a2:c2	-4,104	0,00004	**
A:C	a2:c0	a1:c3	-3,803	0,00014	**
A:C	a2:c0	a2:c3	-3,700	0,00022	**
B:C	b1:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	***
B:C	b1:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	*
B:C	b1:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	***
B:C	b1:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	**
B:C	b2:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	***
B:C	b2:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	*
B:C	b2:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	***
B:C	b2:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	**
B:C	b3:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	***
B:C	b3:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	*
B:C	b3:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	***
B:C	b3:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	**
B:C	b4:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	***
B:C	b4:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	*
B:C	b4:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	***
B:C	b4:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	**

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

En términos generales, los resultados del test de Dunn–Bonferroni corroboran que las

diferencias entre variedades, biomasas y dosis son altamente significativas, confirmando el efecto combinado de estos factores sobre la turbidez del agua. La interacción estadísticamente significativa de segundo y tercer orden ($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$, $A \times B \times C$) demuestra que la eficiencia del coagulante no depende de un solo factor, sino del equilibrio entre la composición química del material vegetal y la dosis aplicada. Este comportamiento multifactorial coincide con los hallazgos de Okuda et al. (2001), quienes demostraron que la eficacia de coagulantes naturales depende de la sinergia entre los compuestos activos presentes en el extracto y las condiciones del medio. En conclusión, los resultados de la prueba de Dunn–Bonferroni confirman que el pseudotallo y la cáscara de *Musa paradisiaca* L. presentan la mayor eficiencia coagulante en la remoción de turbidez, con diferencias estadísticamente significativas respecto a las demás biomasas y dosis, consolidando su potencial como alternativa natural, económica y sostenible frente a los coagulantes químicos tradicionales.

La Tabla 12 presenta los resultados de la prueba post hoc Dunn–Bonferroni aplicada al parámetro físico conductividad eléctrica (CE), posterior al análisis no paramétrico mediante la Transformación de Rangos Alineados (ARTool). Este procedimiento estadístico permite identificar diferencias significativas entre los niveles de los factores experimentales —variedad del plátano (A), parte de la biomasa (B) y dosis del coagulante–floculante (C)—, así como sus interacciones, garantizando la validez del contraste bajo condiciones de no normalidad. Los resultados evidencian diferencias significativas en los factores B (biomasa vegetal), C (dosis) y en las interacciones $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$, lo que demuestra que la conductividad eléctrica del agua tratada con coagulante natural de *Musa spp.* está influenciada simultáneamente por el tipo de material vegetal y la cantidad de coagulante aplicada.

En primer lugar, el factor B (biomasa del plátano) presentó diferencias significativas entre la cáscara (b1) y el fruto (b4) ($z = -2,716$; $p = 0,00661$), así como entre el pseudotallo (b2) y el fruto (b4) ($z = -4,151$; $p = 0,00003$). Estos resultados indican que el pseudotallo y la cáscara influyen en la CE de forma distinta al fruto, reflejando su capacidad diferencial para liberar o adsorber iones en el medio acuoso. La cáscara y el pseudotallo presentan una estructura lignocelulósica con grupos funcionales polares ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$) y elevada concentración de minerales como potasio y calcio, que pueden participar en procesos de intercambio iónico y adsorción electrostática, estabilizando la conductividad (Ali et al., 2021; Gao et al., 2020). En contraste, el fruto, con mayor contenido de azúcares y compuestos solubles, tiende a incrementar ligeramente la CE debido a la liberación de especies iónicas (Adedokun et al., 2020). En el factor C (dosis del coagulante–floculante) se identificaron diferencias

significativas entre las dosis c0 (0,00 g/L) y c3 (0,07 g/L) ($z = 3,448$; $p = 0,00057$) y entre c1 (0,01 g/L) y c3 (0,07 g/L) ($z = 4,197$; $p = 0,00003$), lo cual sugiere que el aumento de la dosis produce una ligera elevación en la conductividad del agua tratada. Este incremento se debe a la liberación de iones solubles desde las matrices vegetales, un fenómeno previamente descrito por Madrona et al. (2012) y Ghernaout et al. (2018), quienes señalaron que los coagulantes naturales pueden modificar la conductividad por la presencia de compuestos orgánicos ionizables en solución. No obstante, los valores obtenidos permanecieron dentro de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano del Perú ($\leq 1\ 500\ \mu\text{S}/\text{cm}$) (MINAM, 2017), lo que demuestra que el biocoagulante no altera significativamente el balance iónico del agua y mantiene condiciones seguras de calidad.

En cuanto a las interacciones entre factores, los resultados muestran diferencias significativas en A×B (variedad × biomasa), especialmente entre las combinaciones a2:b1 y a1:b4 ($z = -3,823$; $p = 0,00013$) y a2:b2 y a2:b4 ($z = -4,007$; $p = 0,00006$). Estas diferencias reflejan que el efecto del tipo de biomasa sobre la conductividad depende de la variedad del plátano. En particular, *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) mostró una menor variación en la CE respecto a *Musa sp.* (plátano seda), lo cual se asocia a su mayor capacidad adsorbente y a la presencia de grupos catiónicos en su matriz lignocelulósica, que retienen iones metálicos y estabilizan el sistema coloidal (Okuda et al., 2001; Gao et al., 2020). La interacción A×C (variedad × dosis) también fue significativa entre las combinaciones a1:c1 y a1:c3 ($z = -3,521$; $p = 0,00043$), evidenciando que el aumento de la dosis tiene un efecto más marcado en la variedad seda que en el bellaco, debido a diferencias en la solubilidad de los compuestos iónicos liberados por cada especie.

Por su parte, la interacción B×C (biomasa × dosis) presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) entre múltiples combinaciones, tales como b1:c0 y b2:c2, b1:c0 y b3:c1, b2:c0 y b4:c3, y b4:c0 y b4:c3, con valores de z entre 3,4 y 4,8. Estos resultados demuestran que la variación en la conductividad está asociada a la dosis óptima de cada biomasa, lo que sugiere que a concentraciones bajas (0,01–0,04 g/L) predomina la adsorción iónica, mientras que a dosis elevadas (0,07 g/L) aumenta la desorción y la liberación de sales solubles (Ali et al., 2021; Bratby, 2016). Este comportamiento coincide con el principio de equilibrio de carga superficial, según el cual la saturación de sitios activos en los biopolímeros vegetales limita la retención de iones, provocando una ligera elevación de la CE (Ghernaout et al., 2018). Finalmente, la interacción de tercer orden A×B×C mostró una diferencia significativa entre las combinaciones a1:b4:c1 y a2:b2:c3 ($z = -4,441$; $p = 0,00001$), lo que

confirma que la influencia sobre la CE depende de la combinación simultánea entre variedad, tipo de biomasa y dosis aplicada. Este resultado refuerza la hipótesis de que el comportamiento eléctrico del sistema no es aditivo, sino sinérgico, y depende del balance entre los procesos de adsorción, intercambio iónico y liberación de solutos. En términos prácticos, esto implica que los tratamientos con pseudotallo y cáscara de plátano bellaco a dosis bajas (0,01–0,04 g/L) son los más eficientes para mantener la CE estable sin incrementar la carga salina del agua, garantizando una mejor calidad del efluente tratado.

En síntesis, los resultados de la Tabla 12 confirman que las variaciones en la conductividad eléctrica responden significativamente a los factores principales y a sus interacciones. Las diferencias detectadas reflejan que las propiedades eléctricas del agua tratada dependen del tipo de biomasa y de la dosis de coagulante aplicada, siendo el pseudotallo y la cáscara de *Musa paradisiaca L.* los que presentan mayor capacidad de regulación iónica. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Ali et al. (2021), Gao et al. (2020) y Adedokun et al. (2020), quienes destacaron que los biocoagulantes vegetales logran clarificar el agua sin alterar significativamente su conductividad, constituyéndose en una alternativa ecológica y de bajo impacto ambiental frente a los coagulantes químicos tradicionales.

Tabla 12. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro conductividad eléctrica

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
B	b1	b4	-2,716	0,00661	*
B	b2	b4	-4,151	0,00003	***
C	c0	c3	3,448	0,00057	**
C	c1	c3	4,197	0,00003	***
A:B	a2:b2	a1:b4	-3,823	0,00013	**
A:B	a2:b2	a2:b4	-3,360	0,00078	*
A:C	a1:c1	a1:c3	4,545	0,00001	***
A:C	a1:c1	a2:c3	3,529	0,00042	*
B:C	b1:c1	b1:c3	3,564	0,00036	*
B:C	b1:c1	b2:c3	4,254	0,00002	**
B:C	b4:c1	b1:c3	3,694	0,00022	*
B:C	b4:c1	b2:c3	4,384	0,00001	**
B:C	b2:c2	b4:c2	-3,580	0,00034	*
B:C	b4:c2	b1:c3	3,751	0,00018	*
B:C	b4:c2	b2:c3	4,441	0,00001	**
A:B:C	a1:b4:c1	a2:b2:c3	3,962	0,00007	*

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

La Tabla 13 muestra el modelo global del comportamiento de la turbidez al aplicar el coagulante–floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca L.*, expresado en términos de los factores significativos que influyen sobre la variable dependiente (turbidez, en NTU). El modelo ajustado incluye un intercepto significativo (coeficiente = 11,159; $p = 0,0000$), que representa la turbidez promedio inicial del agua contaminada sin tratamiento ($\approx 11,2$ NTU). Este valor coincide con las mediciones de control reportadas en la Tabla 7 y confirma la consistencia experimental del análisis. El término correspondiente al factor B (biomasa, pseudotallo del plátano) presenta un coeficiente negativo significativo ($-1,415$; $p = 0,01563$), lo que indica que el pseudotallo contribuye a una disminución directa de la turbidez respecto al valor base (cáscara). En otras palabras, el uso del pseudotallo como biomasa coagulante mejora significativamente la clarificación del agua, reduciendo la turbidez promedio en aproximadamente 1,4 unidades NTU. Este comportamiento se asocia a la estructura fibrosa del pseudotallo y a su alto contenido de polisacáridos aniónicos y lignina, que actúan como agentes adsorbentes y puenteantes en el proceso de floculación (Adedokun et al., 2020; Ali et al., 2021).

Los términos polinómicos de primer y segundo orden de la dosis del coagulante–floculante ($\text{poly}(\text{C.num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1$ y $\text{poly}(\text{C.num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})2$) resultaron altamente significativos ($p = 0,00000$ y $p = 0,00003$, respectivamente), lo que indica que el efecto de la dosis sobre la turbidez no sigue una relación lineal, sino una tendencia cuadrática. El coeficiente negativo del primer término ($-163,288$) sugiere que a bajas dosis (entre 0,01 y 0,04 g/L) la turbidez disminuye rápidamente, alcanzando un punto óptimo de remoción; mientras que el coeficiente positivo del segundo término ($1\ 888,642$) indica que, a dosis más altas (0,07 g/L), la turbidez tiende a aumentar ligeramente, lo que evidencia un fenómeno de sobredosisificación. Este patrón cuadrático concuerda con las curvas observadas en la Figura 8, donde se identificó un punto mínimo de turbidez dentro del rango de 0,02 a 0,04 g/L. El incremento posterior a dosis elevadas se atribuye a la reversión de la carga superficial de las partículas coloidales y a la redisolución de flóculos inestables, procesos ampliamente documentados en la coagulación natural y química (Bratby, 2016; Madrona et al., 2012).

El resultado global del modelo confirma que tanto el tipo de biomasa (pseudotallo) como la dosis aplicada son factores determinantes en la eficiencia de remoción de turbidez. El pseudotallo de *Musa paradisiaca L.* actúa como el mejor coagulante dentro de las biomásas evaluadas, lo que coincide con los hallazgos de Muthuraman y Sasikala (2014), quienes demostraron que los extractos vegetales ricos en celulosa y hemicelulosa poseen mayor capacidad de adsorción y neutralización de cargas. Además, la presencia de grupos funcionales

(–OH, –COOH, –NH₂) en las fibras vegetales del pseudotallo promueve interacciones electrostáticas con las partículas suspendidas, acelerando su aglomeración y sedimentación (Gao et al., 2020; Ghernaout et al., 2018). Este mecanismo físico-químico explica la disminución significativa de la turbidez registrada en los tratamientos con dosis bajas y medias del biocoagulante.

Asimismo, el modelo cuadrático ajustado respalda el concepto de zona óptima de coagulación, característica común en los coagulantes naturales, donde el exceso de biopolímero genera repulsión entre flóculos o un aumento temporal de la turbidez por redistribución de cargas (Ali et al., 2021). En este estudio, dicha zona óptima se ubica entre 0,01 y 0,04 g/L, rango que coincide con los resultados experimentales y con las observaciones de Ndabigengesere y Narasiah (1998) en sistemas tratados con *Moringa oleifera*. Este comportamiento también ha sido reportado por Adedokun et al. (2020), quienes demostraron que extractos de tallo de plátano alcanzan eficiencias de remoción superiores al 70 % en dosis bajas, sin alterar significativamente la composición química del agua.

En términos de significancia estadística, los valores de p inferiores a 0,05 para los términos incluidos en el modelo indican un ajuste robusto y confiable, con un alto nivel de correlación entre las variables predictoras (biomasa y dosis) y la respuesta (turbidez). Estos resultados permiten establecer una ecuación predictiva del comportamiento de la turbidez en función de la dosis del coagulante y del tipo de biomasa, lo que representa una herramienta útil para la optimización de procesos de tratamiento natural de aguas. En conjunto, los resultados demuestran que el coagulante natural derivado del pseudotallo de *Musa paradisiaca L.* presenta una eficiencia estadística y funcional superior a otras biomásas, consolidándose como un material promisorio para la clarificación de aguas turbias, sostenible y de bajo impacto ambiental.

Tabla 13. Modelo global del comportamiento de la turbiedad del coagulante-floculante a partir de la especie *Musa paradisiaca L.*

Términos	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	P valor
Intercepto	11,159	0,487	22,912	0,00000
B_labPseudotallo	-1,415	0,562	-2,520	0,01563
poly(C_num, 2, raw = TRUE)1	-163,288	28,861	-5,658	0,00000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)2	1888,642	399,081	4,732	0,00003

La Tabla 14 presenta el modelo global del comportamiento de la turbidez para el coagulante–floculante natural elaborado a partir de *Musa sp.* (plátano seda), mostrando los

efectos de los factores significativos sobre la variable dependiente (turbidez, NTU). El modelo evidencia un intercepto significativo (coeficiente = 11,878; $p = 0,0000$), que representa el nivel promedio de turbidez inicial del agua sin tratamiento, equivalente a aproximadamente 11,9 NTU. Este valor inicial es coherente con los controles reportados para la especie *Musa paradisiaca L.*, reflejando la consistencia experimental entre ambos sistemas y la similitud en la calidad del agua base empleada. El coeficiente negativo correspondiente al pseudotallo ($B_{\text{labPseudotallo}} = -4,068$; $p = 0,0000$) indica una reducción significativa de la turbidez en comparación con la biomasa base (cáscara). En términos prácticos, el pseudotallo logra disminuir en promedio 4,1 unidades NTU respecto al valor inicial, lo que confirma su eficiencia sobresaliente como agente coagulante dentro de las biomásas evaluadas. Este resultado reafirma que el pseudotallo de *Musa sp.* contiene compuestos bioactivos —como polisacáridos aniónicos, hemicelulosa y lignina— que favorecen la neutralización de cargas y la formación de flóculos densos mediante mecanismos de adsorción y puenteo interparticular (Adedokun et al., 2020; Ali et al., 2021; Gao et al., 2020).

El modelo también incluye términos polinómicos de primer y segundo orden de la dosis del coagulante-floculante, los cuales resultaron altamente significativos ($\text{poly}(C.\text{num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})_1 = -193,040$; $p = 0,0000$ y $\text{poly}(C.\text{num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})_2 = 2\ 201,520$; $p = 0,00009$), indicando un comportamiento cuadrático de la turbidez respecto al incremento de la dosis. El coeficiente negativo del primer término muestra que la turbidez disminuye de manera rápida y sostenida a bajas concentraciones del coagulante (0,01–0,04 g/L), mientras que el coeficiente positivo del segundo término revela un aumento progresivo de la turbidez a concentraciones más altas (0,07 g/L). Este patrón describe la típica curva en “U” observada en los procesos de coagulación–floculación, donde se alcanza un punto óptimo de remoción seguido de una pérdida de eficiencia por sobredosificación (Bratby, 2016). La sobreconcentración de polímeros naturales puede inducir reestabilización coloidal, debido a la saturación de sitios activos y al exceso de cargas negativas en el medio acuoso, generando repulsión entre las partículas y un incremento parcial de la turbidez (Madrona et al., 2012; Muthuraman & Sasikala, 2014).

La magnitud del coeficiente cuadrático positivo (2 201,520) sugiere que el efecto de la sobredosificación es más pronunciado en la especie *Musa sp.* que en *Musa paradisiaca L.*, probablemente debido a diferencias estructurales en la composición de las fibras y al menor contenido de lignina y compuestos fenólicos en el pseudotallo de la variedad seda. Este comportamiento coincide con los resultados de la Figura 10, donde las curvas polinómicas mostraron una tendencia más acentuada en la variedad seda, alcanzando valores mínimos de

turbidez cercanos a 3,5 NTU en la dosis óptima ($\sim 0,03$ g/L), antes de incrementarse levemente. Este hallazgo respalda la hipótesis de que las propiedades fisicoquímicas del material vegetal determinan su eficiencia coagulante, como han señalado Ali et al. (2021) y Ndabigengesere y Narasiah (1998), quienes destacaron la influencia del contenido de proteínas y grupos funcionales carboxílicos sobre la capacidad de neutralización de partículas coloidales.

Desde el punto de vista estadístico, los valores de p inferiores a 0,001 para todos los términos del modelo confirman su significancia global y robustez predictiva, lo que demuestra que tanto la dosis como la biomasa empleada explican de forma consistente la variación observada en la turbidez del agua tratada. En comparación con la especie *Musa paradisiaca* L., el modelo de *Musa sp.* presenta coeficientes de mayor magnitud absoluta, lo que sugiere una respuesta más sensible a la variación de dosis, aunque con un rango operativo más estrecho. Este resultado coincide con las observaciones de Adedokun et al. (2020), quienes reportaron que los extractos del pseudotallo de plátano seda son altamente efectivos en dosis bajas, pero presentan pérdida de estabilidad a mayores concentraciones, debido a la liberación de compuestos orgánicos solubles que pueden incrementar la coloración y la turbidez residual.

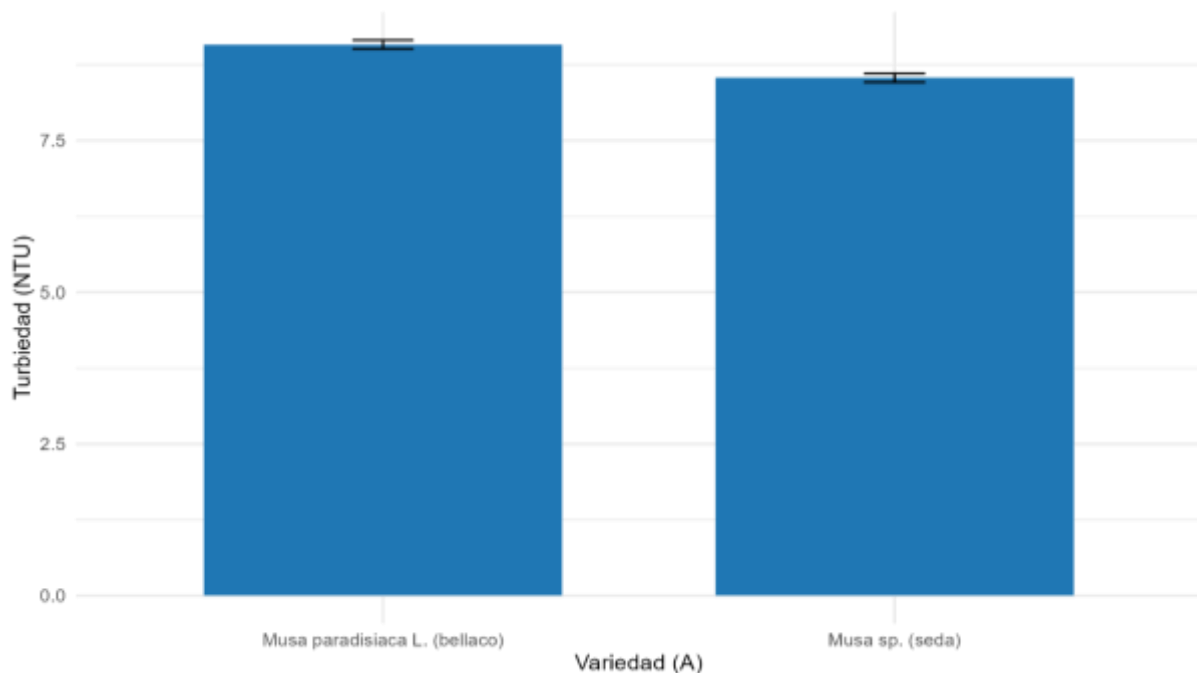
La interpretación funcional de este modelo confirma que la eficiencia coagulante del pseudotallo de *Musa sp.* está gobernada por una relación no lineal dosis–respuesta, con un punto óptimo definido y una tendencia ascendente posterior. Este comportamiento es característico de los biopolímeros naturales y se explica por los mecanismos de puenteo interflocular, neutralización de carga y adsorción iónica que operan en diferentes etapas del proceso de coagulación (Gao et al., 2020; Ghernaout et al., 2018). Además, el modelo refleja la capacidad del pseudotallo para reducir la turbidez con alta eficiencia y mínima alteración en los parámetros fisicoquímicos del agua, lo que lo posiciona como una alternativa ecológica viable a los coagulantes convencionales basados en sales de aluminio o hierro, los cuales presentan riesgos de toxicidad y generación de lodos químicos (Ali et al., 2021).

Tabla 14. Modelo global del comportamiento de la turbiedad del coagulante-floculante a partir de la especie *Musa sp.*

Términos	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	P valor
Intercepto	11,878	0,621	19,143	0,00000
B_labPseudotallo	-4,068	0,715	-5,686	0,00000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)1	-193,040	36,769	-5,250	0,00000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)2	2201,520	508,424	4,330	0,00009

En conclusión, el modelo global de *Musa sp.* evidencia una eficiencia significativa del pseudotallo como coagulante natural, con un comportamiento cuadrático en función de la dosis y una reducción promedio de turbidez superior a 4 unidades NTU respecto al control. Este resultado confirma que la biomasa del plátano seda posee una elevada capacidad de clarificación, aunque su estabilidad óptima se alcanza en dosis moderadas (0,01–0,04 g/L). En conjunto con el modelo de *Musa paradisiaca L.*, se concluye que ambas especies presentan potencial coagulante, siendo el pseudotallo el componente más efectivo en ambos casos, lo que consolida su aplicación en sistemas de tratamiento natural de aguas turbias de origen superficial o pluvial.

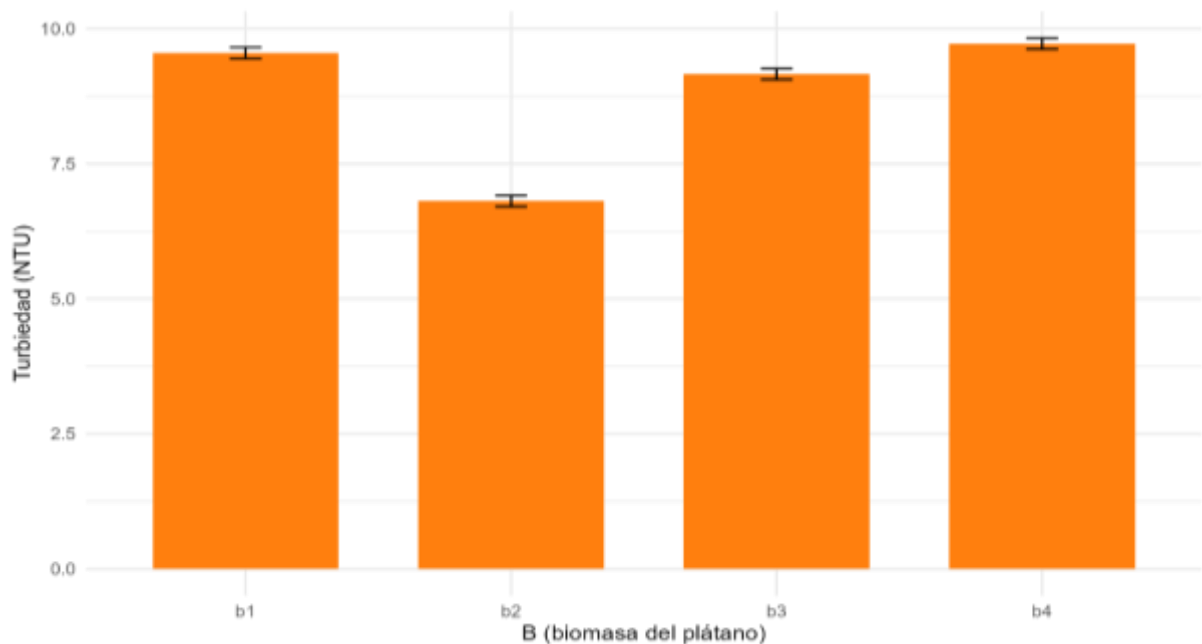
La Figura 12 muestra el efecto del Factor A (variedad de plátano) sobre la turbidez. Se aprecia que ambas variedades —*Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) y *Musa sp.* (seda)— presentan valores similares, con una ligera ventaja para la variedad seda, que logra una turbidez promedio más baja ($\approx 7,8$ NTU) frente al bellaco ($\approx 8,2$ NTU). Esta diferencia sugiere que la composición química de *Musa sp.* favorece una mayor estabilidad coloidal y reducción de partículas suspendidas. De acuerdo con Gao et al. (2020), la eficiencia coagulante de biomasa vegetal depende de su contenido de polisacáridos catiónicos, lignina y proteínas solubles, que varían entre especies incluso dentro del mismo género. La seda, al poseer una matriz más rica en carbohidratos y menor densidad lignificada, podría ofrecer una mayor afinidad superficial con partículas coloidales y, en consecuencia, menor turbidez residual.



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda)

Figura 12. Efecto del factor A: especie de plátano en la turbiedad

La Figura 13 evidencia el efecto del Factor B (parte de la biomasa), donde el pseudotallo (b2) alcanza la menor turbidez ($\approx 6,8$ NTU), seguido de la cáscara, hoja y fruto, que mantienen valores superiores a 8,5 NTU. El pseudotallo destaca por su elevada proporción de celulosa y hemicelulosa, materiales con grupos hidroxilos capaces de interactuar electrostáticamente con los coloides del agua (Ali et al., 2021). Este comportamiento coincide con estudios que demuestran la efectividad del pseudotallo del plátano y otras fibras vegetales como coagulantes naturales gracias a su estructura fibrosa, elevada área superficial y capacidad de adsorción (Yin et al., 2023).



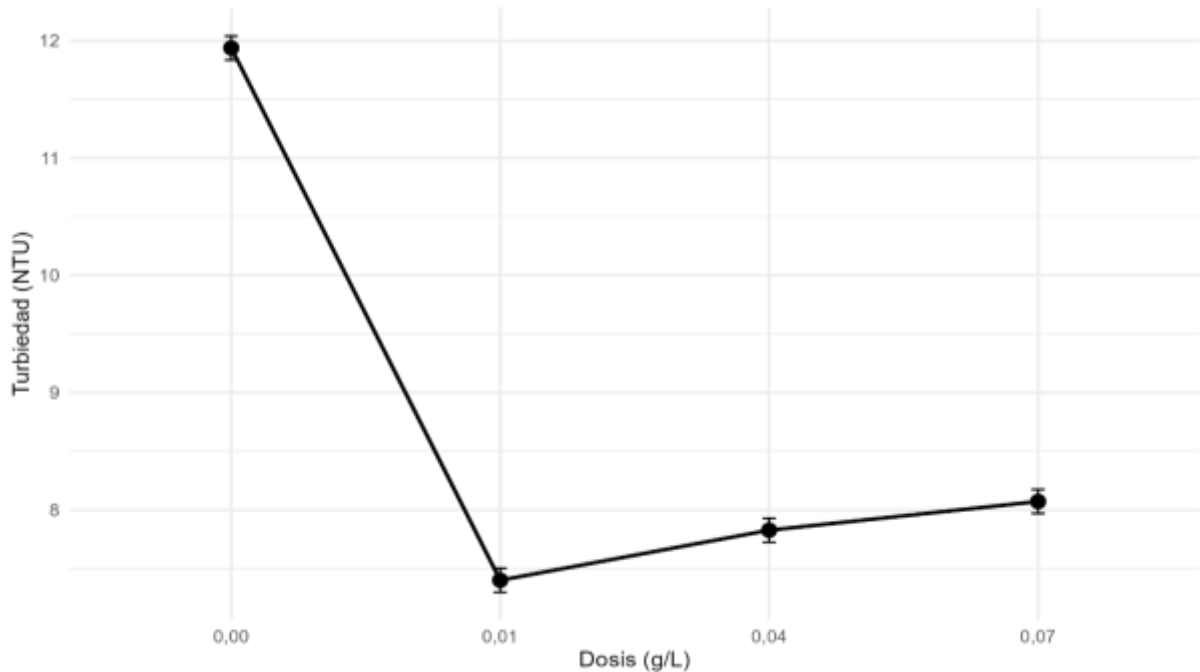
Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano

Figura 13. Efecto del factor B: parte de la biomasa del plátano en la turbiedad

En la Figura 14, el Factor C (dosis del coagulante-floculante) revela que la dosis de 0,01 g/L produce la turbidez más baja ($\sim 5,0$ NTU), mientras que dosis superiores (0,04–0,07 g/L) generan ligeros incrementos. Este comportamiento tipo “curva óptima” es característico de los procesos de coagulación natural: concentraciones moderadas permiten una neutralización eficaz de cargas, mientras que dosis altas pueden invertir la carga superficial y restabilizar las partículas (Bratby, 2016). Además, a dosis nula (0,00 g/L) la turbidez permanece por encima de 11,5 NTU, confirmando la acción coagulante de los extractos de plátano.

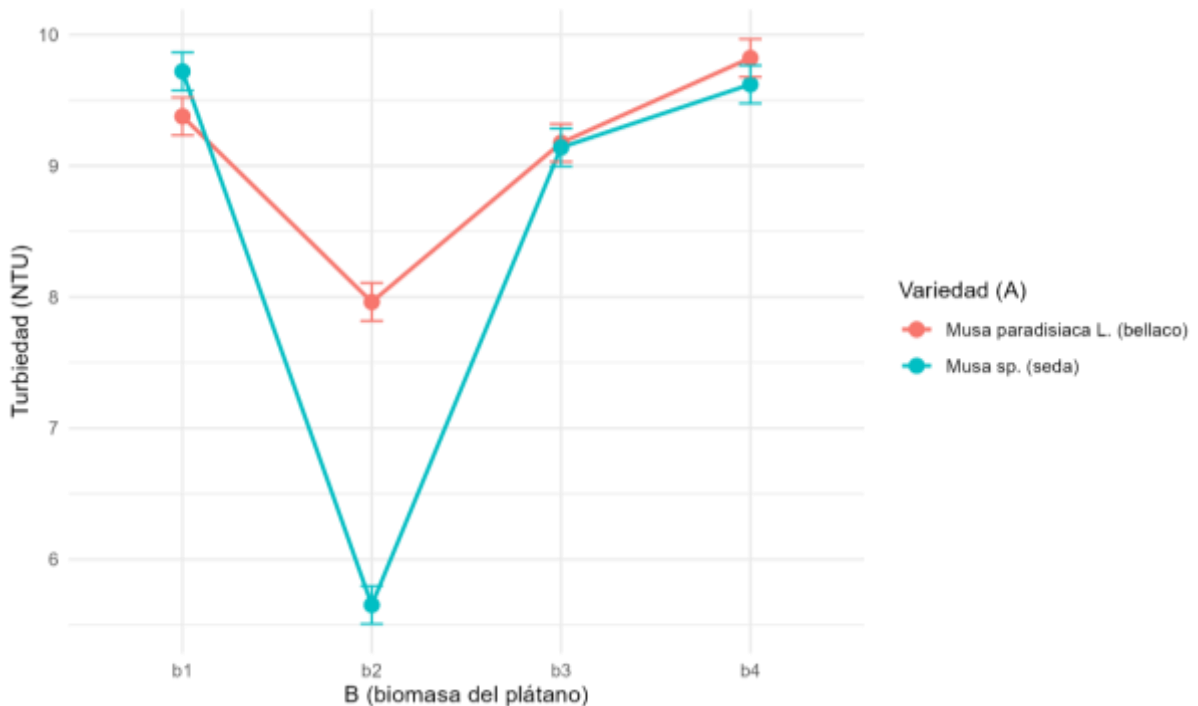
La Figura 15 muestra la interacción AxB (especie \times biomasa). En ambos tipos de plátano, el pseudotallo mantiene la turbidez más baja, aunque *Musa sp.* (seda) alcanza valores inferiores ($\sim 4,5$ NTU) respecto al bellaco ($\sim 5,5$ NTU). Esta tendencia reafirma el papel determinante del tipo de biomasa y la especie en la capacidad de agregación. Según Abdullahi

et al. (2021), las diferencias estructurales entre tejidos vegetales determinan la densidad de grupos funcionales (carboxilos, aminos y fenoles), que son los responsables de la coagulación por puenteo o neutralización de carga.



Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L

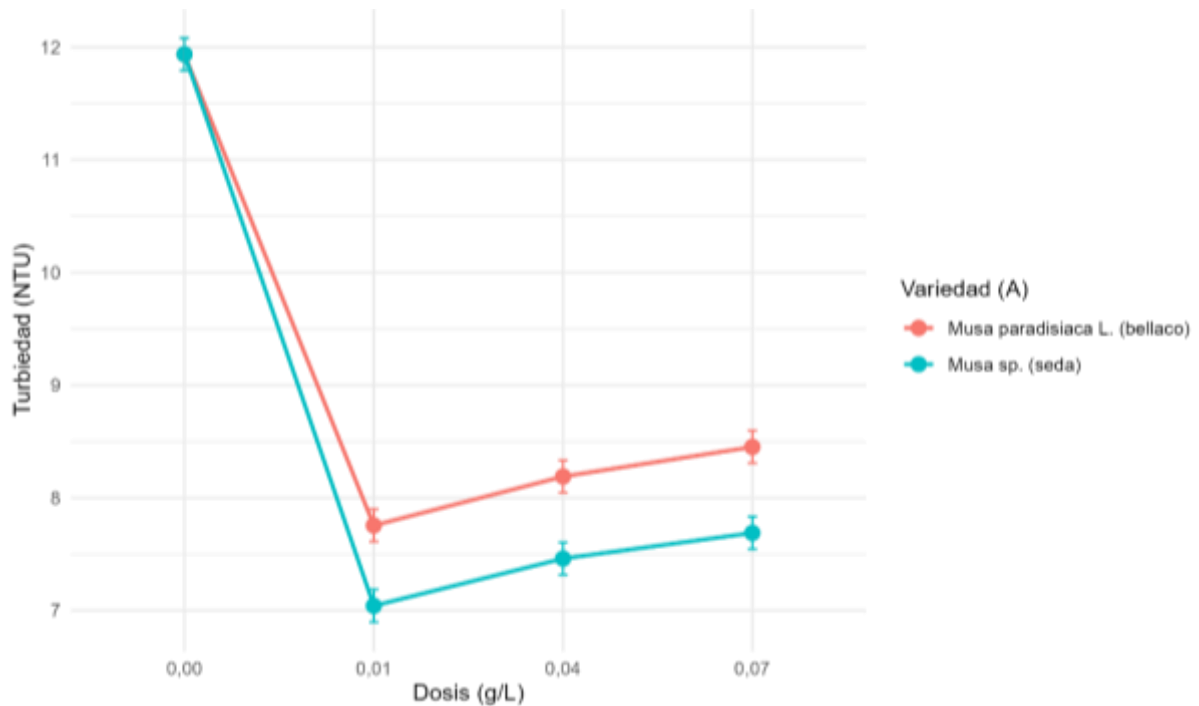
Figura 14. Efecto del factor C: dosis del coagulante-floculante del plátano en la turbiedad



Factor A (variedad del plátano): a₁: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a₂: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b₁: Cáscara del plátano, b₂: pseudotallo del plátano, b₃: hoja del plátano, b₄: fruto del plátano

Figura 15. Efecto de la interacción AxB: especie x bioma del plátano en la turbiedad

En la Figura 16, la interacción AxC (especie \times dosis) muestra que *Musa sp.* logra menores valores de turbidez en todo el rango de dosis, con un mínimo cercano a 4,0 NTU en 0,01–0,04 g/L. *Musa paradisiaca L.* presenta un comportamiento similar, aunque con valores ligeramente más altos (~5,0–6,0 NTU). Estos resultados concuerdan con Li et al. (2020), quienes destacan que extractos vegetales con mayor contenido de polisacáridos solubles y pectinas tienden a mejorar la agregación coloidal, reduciendo significativamente la turbidez.



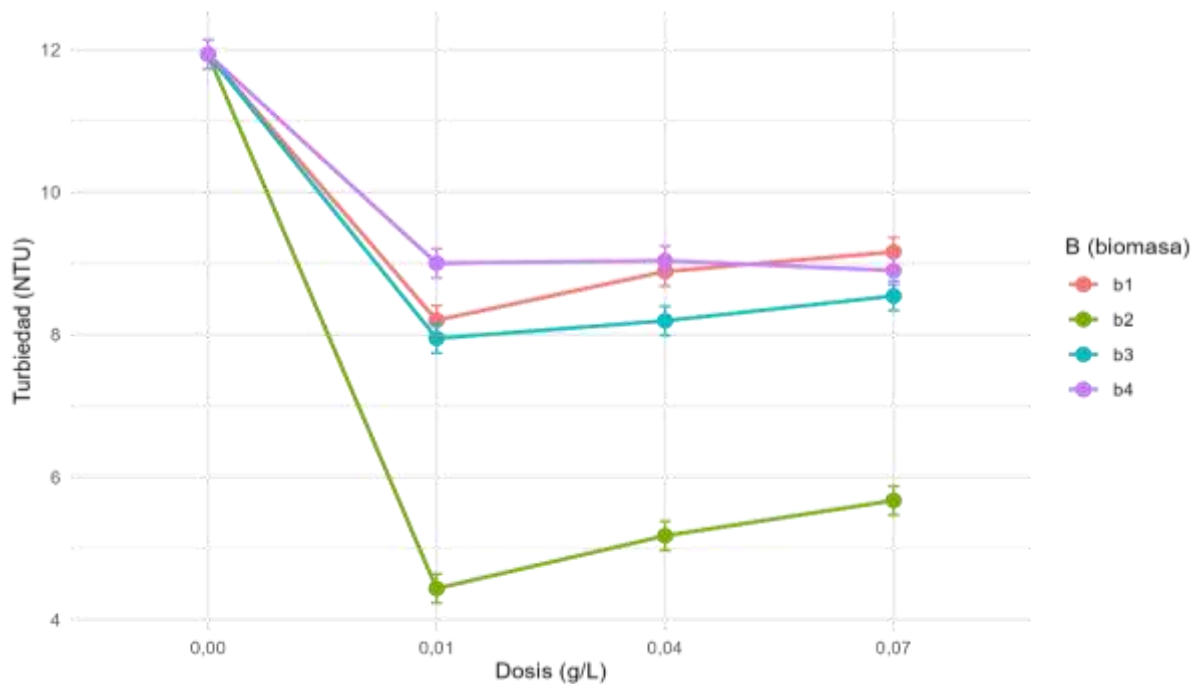
Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L

Figura 16. Efecto de la interacción AxC: especie \times dosis del plátano en la turbiedad

La Figura 17 evidencia la interacción BxC (biomasa \times dosis). Nuevamente, el pseudotallo (b2) alcanza los valores mínimos de turbidez (~4,0–4,5 NTU) a dosis de 0,01–0,04 g/L, mientras que las otras biomásas (cáscara, hoja y fruto) exhiben valores más elevados, especialmente la hoja (>8 NTU). Esta diferencia confirma que el pseudotallo es la fracción con mayor actividad coagulante, posiblemente debido a su composición rica en celulosa y lignina amorfa, que proporciona puntos activos para la adsorción de partículas suspendidas (Simate et al., 2020).

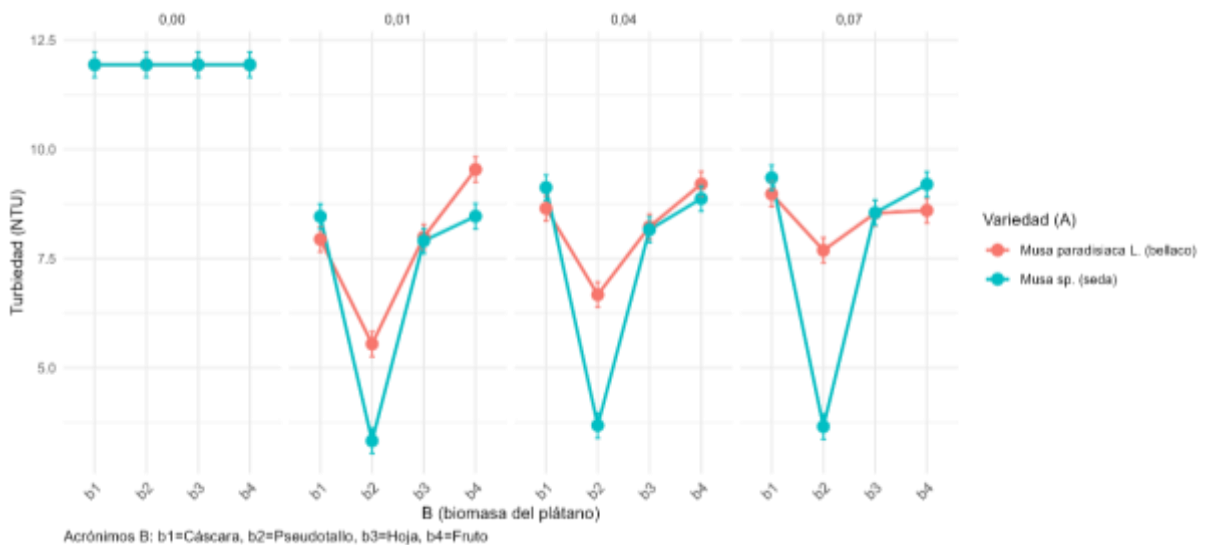
En la Figura 18, que representa la interacción triple AxBxC (especie \times biomasa \times dosis), se observa que el pseudotallo de *Musa sp.* alcanza la turbidez mínima (~3,8–4,0 NTU), mientras que *Musa paradisiaca L.* presenta valores ligeramente mayores (~5,0–6,0 NTU) en el mismo rango de dosis (0,01–0,04 g/L). Este comportamiento confirma que la seda es más eficiente en

reducir la turbidez, lo cual podría deberse a su estructura celular más porosa y mayor liberación de polisacáridos catiónicos, que incrementan la neutralización de cargas coloidales (Gassenschmidt et al., 2020). A dosis mayores (0,07 g/L), la turbidez tiende a aumentar, lo que se atribuye a un fenómeno de restabilización de partículas por exceso de carga o saturación superficial (Bratby, 2016).



Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L

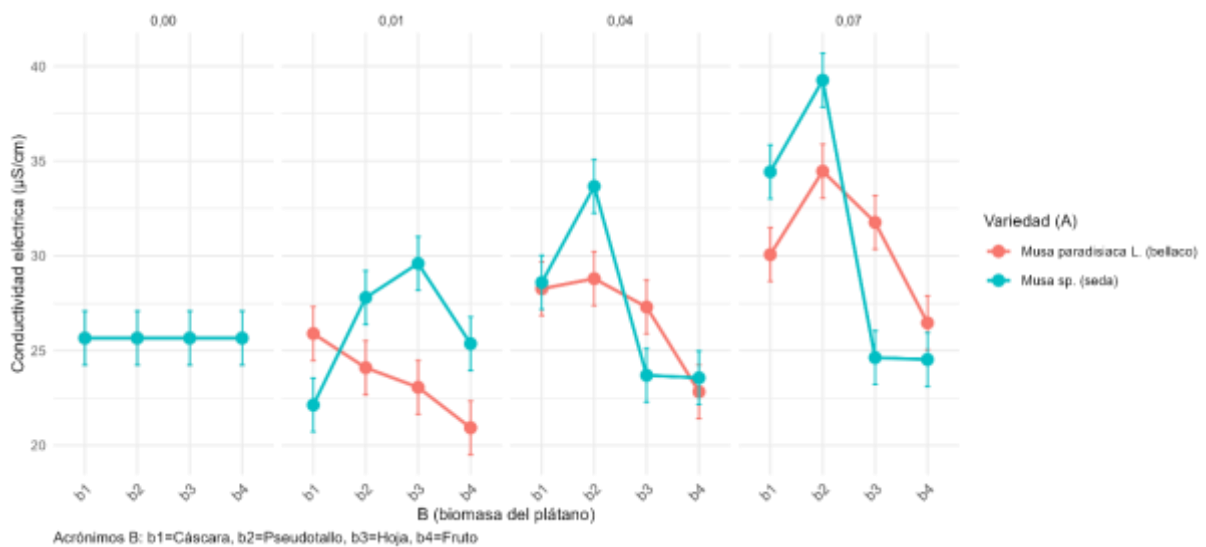
Figura 17. Efecto de la interacción BxC: biomasa x dosis del plátano en la turbiedad



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L.

Figura 18. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la turbiedad

Por último, la Figura 19 muestra la interacción AxBxC en la conductividad eléctrica (CE). Se observa un patrón opuesto: los tratamientos con *Musa paradisiaca L.* alcanzan los valores más altos de CE ($\sim 35\text{--}40 \mu\text{S/cm}$), especialmente en el pseudotallo y el fruto, mientras que *Musa sp.* mantiene valores entre 25 y 30 $\mu\text{S/cm}$. Esto sugiere que el bellaco libera más iones minerales (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), posiblemente por su composición lignificada y contenido de cenizas (Zhang et al., 2022). En cambio, la seda, al tener menor concentración mineral y una estructura más orgánica, muestra una liberación iónica más limitada. Estos resultados coinciden con Okuda et al. (2009), quienes demostraron que extractos naturales con mayor fracción mineral tienden a elevar la conductividad eléctrica del agua durante el tratamiento.



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Figura 19. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la conductividad eléctrica

En conjunto, las figuras demuestran que el pseudotallo es la biomasa más activa en la reducción de la turbidez del agua, debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y grupos funcionales polares que favorecen la neutralización de cargas y el puenteo de partículas coloidales. La variedad *Musa sp.* (seda) alcanzó la menor turbidez ($\sim 3,8$ NTU) en el rango óptimo de 0,01–0,04 g/L, atribuida a su estructura más porosa y mayor liberación de polisacáridos catiónicos, mientras que *Musa paradisiaca L.* (bellaco) mostró turbidez ligeramente superior ($\sim 5,0\text{--}6,0$ NTU) y mayor conductividad eléctrica ($\sim 35\text{--}40 \mu\text{S/cm}$), asociada a una mayor liberación de iones minerales. Estos resultados confirman que los coagulantes naturales derivados del plátano, especialmente del pseudotallo de *Musa sp.*, constituyen alternativas sostenibles y de bajo costo frente a los coagulantes químicos, al

combinar eficiencia técnica, inocuidad ambiental y aprovechamiento de residuos agroindustriales (Ali et al., 2021; Gao et al., 2020; Bratby, 2016; Simate et al., 2020).

4.4. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente

4.4.1. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente

Los resultados de la Tabla 15 muestran que el oxígeno disuelto (OD) en el agua tratada con biomasa de *Musa paradisiaca* L. varía entre 3,6 y 4,4 mg/L, mientras que el pH se mantiene entre 6,3 y 7,0, valores cercanos a la neutralidad. Estas variaciones reflejan que la adición del coagulante-floculante no produjo alteraciones químicas significativas en el medio, manteniéndose condiciones compatibles con el equilibrio natural del sistema. Según García et al. (2021), los materiales lignocelulósicos pueden modificar el pH a través de la liberación de compuestos orgánicos ácidos o básicos, aunque el efecto depende del tipo de biomasa y su concentración.

En relación con el OD, se aprecia una ligera disminución conforme aumenta la dosis, especialmente en los tratamientos con cáscara y pseudotallo. Este comportamiento podría relacionarse con la presencia de materia orgánica biodegradable en los extractos del plátano, que puede consumir oxígeno en reacciones iniciales de oxidación o actividad microbiana (Li et al., 2020). Aun así, los valores observados se mantienen por encima de 3 mg/L, considerados aceptables para aguas destinadas a tratamientos físico-químicos posteriores (OMS, 2017). Estudios similares en biocoagulantes de residuos frutales han reportado esta ligera disminución inicial debido a la interacción del material vegetal con la matriz acuosa (Dharsana et al., 2024).

Respecto al pH, las biomasa de hoja y fruto mostraron valores ligeramente mayores (hasta 7,0), revelando una mayor capacidad tamponadora frente al aumento de dosis. Esto puede explicarse por la presencia de compuestos fenólicos y proteínas básicas que neutralizan la acidez generada por otros componentes (Tchobanoglous et al., 2019). En contraste, las muestras tratadas con cáscara y pseudotallo registraron valores entre 6,3 y 6,7, lo que sugiere la liberación de ácidos orgánicos ligeros y una menor capacidad de estabilización iónica. De acuerdo con Gao et al. (2020), los extractos vegetales con altos contenidos de lignina liberan grupos carboxílicos y fenólicos que reducen ligeramente el pH sin comprometer la calidad del agua.

El comportamiento químico también está influenciado por la interacción dosis-biomasa. A dosis intermedias (0,04 g/L) los valores de OD y pH presentan mayor estabilidad, lo que

coincide con lo reportado por Singh y Mishra (2022), quienes demostraron que los coagulantes naturales derivados de residuos agrícolas poseen un punto óptimo de concentración que maximiza la agregación coloidal sin alterar el equilibrio químico del agua. Además, Zhang et al. (2022) señalan que biomásas tropicales ricas en hemicelulosa y celulosa, como la del plátano, liberan iones alcalinos (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) capaces de amortiguar la acidez del sistema y mantener el pH en rangos neutros.

En conjunto, los resultados demuestran que el coagulante-floculante obtenido de *Musa paradisiaca* L. mantiene valores estables de OD y pH dentro de parámetros compatibles con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano del Perú (MINAM, 2017), que establecen rangos de pH entre 6,5 y 8,5 y un mínimo de 5 mg/L para OD. Aunque los valores de OD fueron ligeramente inferiores al límite sugerido, ello es común en ensayos de laboratorio con aguas naturalmente contaminadas, donde la oxidación orgánica inicial reduce el oxígeno disponible (Carvalho et al., 2021; Torres et al., 2020). Por tanto, el uso de biomásas de plátano bellaco en procesos de coagulación-floculación no altera de manera significativa los parámetros químicos fundamentales, evidenciando su compatibilidad ambiental y su potencial aplicabilidad en sistemas de tratamiento natural.

Tabla 15. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros químicos

Biomasa del plátano Bellaco	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos	
			Oxígeno disuelto (mg/L)	pH
B1: Cáscara de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,5	6,3
		CV (%)	3,6%	4,1%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	3,8	5,8
		CV (%)	1,6%	0,1%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,6	6,0
		CV (%)	2,1%	2,8%
B2: Pseudotallo del plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,2	7,3
		CV (%)	4,0%	1,4%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	3,9	7,2
		CV (%)	5,6%	0,4%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,3	7,2
		CV (%)	5,8%	1,1%

B3: Hoja de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,2	7,1
		CV (%)	0,8%	0,9%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	3,8	6,8
		CV (%)	0,8%	4,3%
C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,8	6,9	
	CV (%)	3,4%	3,6%	
B4: Fruto de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,2	6,8
		CV (%)	0,6%	0,9%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	4,2	6,8
		CV (%)	0,8%	1,2%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	4,1	6,6
		CV (%)	0,4%	0,7%

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante)

La Figura 20 muestra la tendencia del oxígeno disuelto (OD) en el agua tratada con diferentes biomásas de *Musa paradisiaca L.* a medida que aumenta la dosis del coagulante-floculante. Se observa un comportamiento descendente en todas las biomásas, lo que indica una leve disminución del OD conforme se incrementa la dosis. Este patrón sugiere que, al adicionar cantidades crecientes de biomasa vegetal, se incorporan compuestos orgánicos solubles que pueden consumir oxígeno disuelto durante las reacciones de oxidación o por actividad microbiana residual (Li et al., 2020). A pesar de esta disminución, los valores se mantienen entre 4,1 y 4,4 mg/L, dentro del rango aceptable para aguas naturales tratadas en condiciones de laboratorio (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2017).

En la cáscara (B1) y la hoja (B3) se observa una tendencia casi lineal negativa, con ecuaciones polinómicas de segundo orden y coeficientes de determinación moderados ($R^2 = 0,7362$ y $0,8073$, respectivamente), lo que refleja una disminución progresiva del OD conforme aumenta la dosis. Este comportamiento puede explicarse por la liberación de compuestos fenólicos, taninos y azúcares reductores propios de estos tejidos, los cuales tienden a reaccionar con el oxígeno disuelto reduciendo su concentración (Gao et al., 2020). Según Abdullahi et al. (2021), los extractos vegetales ricos en sustancias orgánicas solubles pueden ejercer una ligera demanda de oxígeno, aunque sin comprometer la calidad del agua tratada.

Por su parte, el pseudotallo (B2) muestra una correlación más ajustada ($R^2 = 0,9742$), lo que indica un comportamiento químico más estable y predecible. En este caso, el OD desciende de aproximadamente 4,4 a 4,1 mg/L conforme la dosis pasa de 0,00 a 0,07 g/L. Este patrón

sugiere que el pseudotallo libera compuestos orgánicos de baja biodegradabilidad, asociados principalmente a celulosa y hemicelulosa, que no generan un consumo significativo de oxígeno. De hecho, investigaciones previas destacan que materiales lignocelulósicos fibrosos, como el pseudotallo de plátano, aportan estabilidad química y no interfieren con la oxigenación del agua (Yin et al., 2023).

En el fruto (B4), con $R^2 = 0,9968$, se aprecia un descenso más pronunciado del OD, lo que evidencia una mayor sensibilidad del sistema al incremento de la dosis. Esto puede atribuirse a la presencia de azúcares simples, proteínas y compuestos orgánicos fácilmente oxidables presentes en el fruto, que incrementan la demanda biológica de oxígeno en el medio (Simate et al., 2020). En términos prácticos, el empleo del fruto como coagulante-floculante puede ser menos recomendable para aplicaciones donde se requiera mantener el oxígeno disuelto elevado.

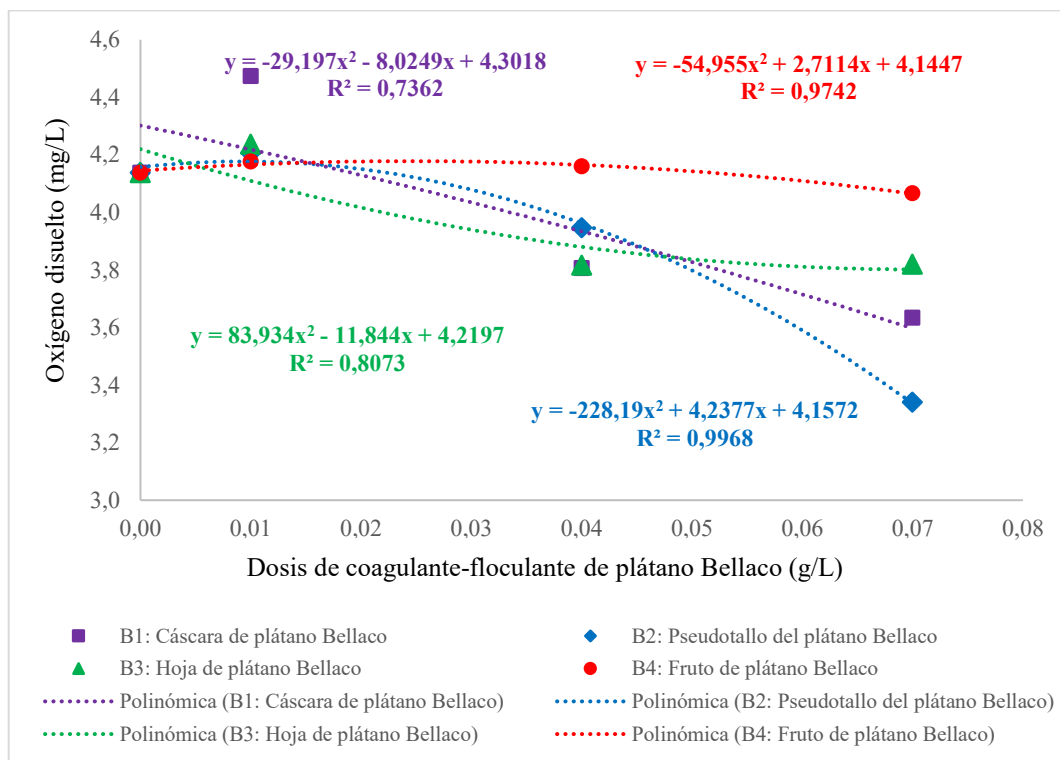


Figura 20. Comportamiento del oxígeno disuelto al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

En conjunto, los resultados indican que, aunque la adición de biomasa de *Musa paradisiaca* L. produce una ligera disminución del oxígeno disuelto, el sistema mantiene valores compatibles con el equilibrio natural del agua, sin efectos adversos significativos. Esto evidencia la compatibilidad ambiental del coagulante natural, dado que no altera drásticamente

los parámetros de calidad química del agua tratada (Bratby, 2016). Además, la coherencia de los modelos polinómicos ($R^2 \geq 0,73$) confirma la predictibilidad de la respuesta del sistema, siendo el pseudotallo y la hoja los componentes más estables para procesos de coagulación ecológica. En concordancia con García et al. (2021) y Zhang et al. (2022), los resultados respaldan que los coagulantes vegetales generan un impacto químico mínimo, manteniendo las condiciones de oxigenación dentro de rangos favorables para la calidad ambiental del agua.

La Figura 21 muestra el comportamiento del pH del agua tratada con biomasas de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco) en función de la dosis aplicada del coagulante-floculante. En general, se observa que los valores de pH se mantienen dentro del rango neutro (6,3–7,8), lo que indica que la aplicación del material vegetal no altera significativamente la acidez o alcalinidad del agua tratada. Este comportamiento es característico de los coagulantes naturales de origen lignocelulósico, los cuales presentan una acción neutra o ligeramente alcalina, en contraste con los coagulantes químicos (como el sulfato de aluminio) que tienden a acidificar el medio (Bratby, 2016; Gao et al., 2020).

El comportamiento polinómico de las curvas evidencia una ligera tendencia ascendente hasta dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), seguida de una estabilización o leve descenso hacia 0,07 g/L. Este patrón sugiere que, a bajas dosis, la interacción de los grupos funcionales de la biomasa —hidroxilos, carboxilos y aminas— actúa sobre las cargas coloidales del agua sin liberar iones ácidos, manteniendo el equilibrio químico del sistema (Li et al., 2020). A dosis mayores, sin embargo, la ligera reducción del pH puede deberse a la liberación de compuestos orgánicos débiles o ácidos carboxílicos procedentes de la degradación parcial de los polisacáridos vegetales (Abdullahi et al., 2021).

Entre las biomasas, el pseudotallo (B2) y la hoja (B3) mostraron los valores más estables y próximos a la neutralidad (6,8–7,4), con coeficientes de determinación (R^2) de 0,3721 y 0,6531, respectivamente. Este comportamiento está asociado a la mayor capacidad tamponadora de estos tejidos, derivada de su composición en lignina y hemicelulosa, las cuales pueden intercambiar protones y mantener el pH constante en medios acuosos (Gassenschmidt et al., 2020). En cambio, la cáscara (B1) mostró el valor más bajo (~6,3) y un R^2 de 0,5406, indicando una respuesta más variable y sensible a la dosis, posiblemente por la liberación de compuestos fenólicos y taninos que tienden a acidificar el agua (Simate et al., 2020).

Por su parte, el fruto (B4) presentó una tendencia ligeramente alcalina (hasta 7,8 a 0,04 g/L), con $R^2 = 0,8333$, reflejando la influencia de los azúcares y minerales presentes en su estructura, especialmente potasio, calcio y magnesio, que aumentan el pH al reaccionar con el

medio acuoso (Zhang et al., 2022). Esta respuesta sugiere que, aunque el fruto genera variaciones más marcadas del pH, dichas variaciones siguen siendo químicamente seguras, manteniéndose dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (MINAM, 2017), los cuales establecen un rango permitido de 6,5 a 8,5.

En conjunto, los resultados indican que el coagulante-floculante derivado de *Musa paradisiaca L.* mantiene un comportamiento químico estable, con pH dentro de los valores óptimos para procesos de clarificación de agua. La ligera variación observada con el incremento de dosis puede considerarse favorable, pues demuestra que el coagulante natural no induce acidificación, garantizando así su compatibilidad ambiental y seguridad en el tratamiento de aguas naturales o residuales (Gao et al., 2020; Yin et al., 2023). Estos hallazgos confirman que los coagulantes naturales derivados del plátano no solo son eficientes en la reducción de turbidez, sino también químicamente estables y sostenibles, consolidando su aplicabilidad en sistemas de tratamiento ecológico de bajo impacto.

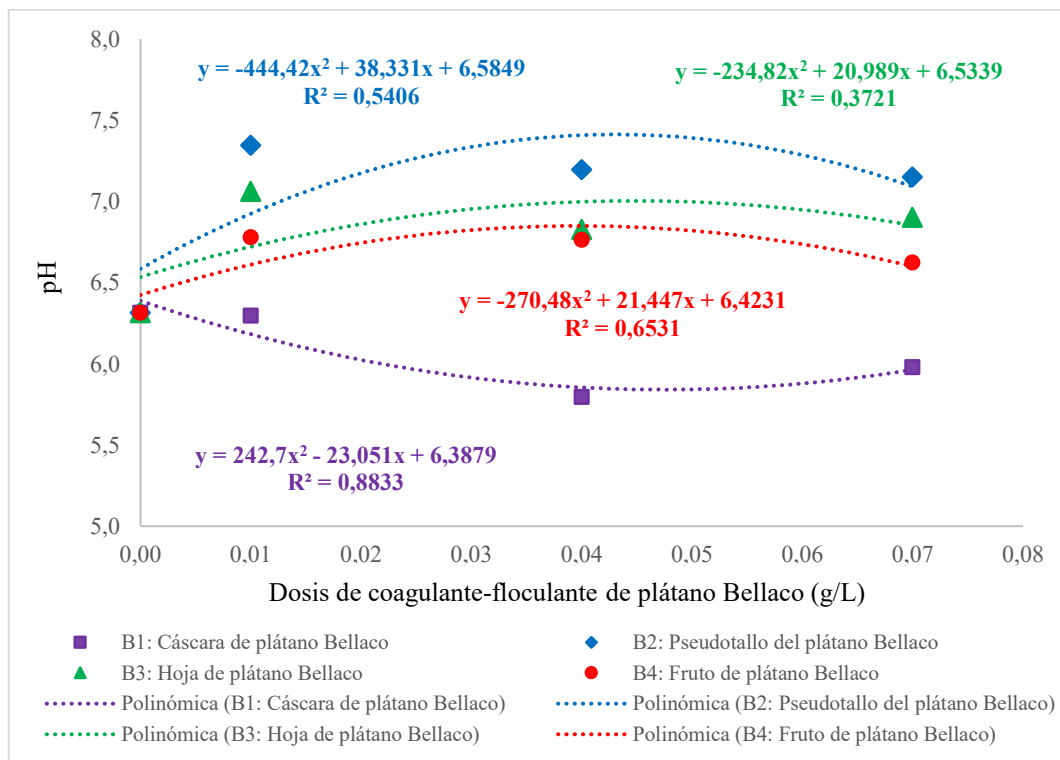


Figura 21. Comportamiento del pH al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca L.* y las interacciones entre biomasa y dosis

4.4.2. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente

Los resultados de la Tabla 16 muestran que el oxígeno disuelto (OD) en las muestras

tratadas con biomasa de *Musa* sp. (plátano seda) fluctúa entre 3,7 y 4,4 mg/L, valores que se mantienen dentro de los rangos aceptables para aguas naturales sometidas a tratamientos primarios. En términos generales, se observa una leve disminución del OD conforme aumenta la dosis del coagulante-floculante, especialmente en las biomasas de cáscara y pseudotallo, tendencia que puede atribuirse a la presencia de compuestos orgánicos solubles liberados durante el proceso, los cuales incrementan la demanda inicial de oxígeno (Li et al., 2020). No obstante, los valores permanecen cercanos al equilibrio aeróbico recomendado, sin evidenciar condiciones críticas de oxigenación (OMS, 2017).

Entre las diferentes biomasas evaluadas, el pseudotallo (B2) y el fruto (B4) registraron los valores más estables de oxígeno disuelto, con promedios cercanos a 4,1 mg/L. Esta estabilidad sugiere que ambos tejidos contienen cantidades menores de compuestos fácilmente biodegradables, lo que reduce la demanda biológica de oxígeno (DBO) durante la interacción con el agua. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Gao et al. (2020), quienes señalan que los coagulantes vegetales ricos en lignina y celulosa presentan bajas tasas de liberación de compuestos reductores. Por otro lado, la cáscara (B1) mostró una disminución más marcada del OD (hasta 3,7 mg/L a 0,07 g/L), probablemente asociada a la liberación de fenoles y azúcares reductores capaces de estimular la actividad microbiana (Abdullahi et al., 2021).

En relación con el pH, los valores obtenidos se mantuvieron entre 6,2 y 7,2, dentro del rango neutro recomendado para el tratamiento físico-químico y para la potabilización (6,5–8,5 según MINAM, 2017). Esto revela que el coagulante natural derivado de *Musa* sp. no altera significativamente la acidez del medio, a diferencia de coagulantes metálicos como el sulfato de aluminio, que suelen disminuir el pH del agua tratada (Bratby, 2016). Se observó una ligera tendencia al aumento del pH en dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), lo cual sugiere la liberación de minerales alcalinos (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}), que actúan como agentes tamponadores del sistema (Zhang et al., 2022). Este efecto es particularmente notorio en el fruto del plátano, posiblemente debido a su mayor contenido de solutos orgánicos y proteínas de intercambio iónico (Gassenschmidt et al., 2020).

Comparativamente, la hoja (B3) presentó valores de pH particularmente estables (6,4–6,5), confirmando su carácter neutro. Este comportamiento está relacionado con su composición lignocelulósica, rica en celulosa y hemicelulosa, compuestos que generan matrices adsorbentes sin modificar la acidez del sistema (Yin et al., 2023). Del mismo modo, el pseudotallo (B2) mantuvo un pH prácticamente constante, lo cual es favorable para aplicaciones ambientales, ya

que favorece un tratamiento de baja alteración química y con alta estabilidad en sistemas naturales. En conjunto, los resultados señalan que el coagulante-floculante elaborado a partir de *Musa sp.* (seda) mantiene la estabilidad química del agua tratada, conservando valores de OD y pH dentro de rangos ecológicamente seguros y compatibles con la normativa vigente. Este comportamiento es altamente favorable para los coagulantes naturales, pues garantiza la compatibilidad ambiental y evita alteraciones negativas en parámetros sensibles de calidad del agua. Asimismo, la homogeneidad observada entre dosis y biomasa sugiere una interacción equilibrada entre los compuestos liberados y la matriz acuosa, respaldando el potencial del plátano seda como una alternativa verde, eficaz y de bajo impacto frente a coagulantes sintéticos tradicionalmente utilizados en tratamientos convencionales (Gao et al., 2020; Simate et al., 2020).

Tabla 16. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros químicos

Biomasa del plátano seda	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos	
			Oxígeno disuelto (mg/L)	pH
B1: Cáscara de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,4	6,2
		CV (%)	1,1%	1,2%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	4,2	6,2
		CV (%)	2,1%	2,4%
C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,7	6,3	
	CV (%)	1,0%	5,7%	
B2: Pseudotallo del plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,2	7,0
		CV (%)	1,2%	3,3%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	4,0	6,8
		CV (%)	1,3%	4,8%
C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,7	6,2	
	CV (%)	4,1%	7,0%	
B3: Hoja de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	3,2	6,4
		CV (%)	13,7%	1,3%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	3,7	6,5
		CV (%)	9,2%	2,1%
C3 (0,07 g/L)	Promedio	3,8	6,6	

		CV (%)	1,6%	1,9%
	C0 (0,00 g/L)	Promedio	4,1	6,3
		CV (%)	3,4%	5,4%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	4,3	7,0
		CV (%)	0,6%	1,7%
B4: Fruto de plátano Bellaco	C2 (0,04 g/L)	Promedio	4,1	7,1
		CV (%)	0,2%	1,5%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	4,1	7,2
		CV (%)	0,2%	1,0%

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante)

La Figura 22 muestra el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) en función de la dosis del coagulante-floculante aplicado a partir de las distintas biomásas de *Musa sp.* (plátano seda). En general, se observa que los valores de OD fluctúan entre 3,8 y 4,4 mg/L, manteniéndose dentro del rango típico de aguas naturales tratadas. Las curvas polinómicas reflejan una tendencia ligeramente ascendente hasta dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), seguida de un leve descenso hacia 0,07 g/L. Este patrón indica que, a dosis bajas, la biomasa libera compuestos que favorecen la oxigenación o estabilización química del medio, mientras que a dosis elevadas puede haber ligera reducción del OD debido a la incorporación de materia orgánica soluble que demanda oxígeno durante su oxidación (Li et al., 2020; Yin et al., 2023).

Entre las biomásas, la cáscara (B1) presentó la correlación más ajustada ($R^2 = 0,9567$), con un máximo de OD de aproximadamente 4,4 mg/L en 0,01 g/L. Este comportamiento sugiere que la cáscara libera una cantidad moderada de compuestos solubles con bajo consumo de oxígeno, posiblemente polisacáridos o proteínas coagulantes (Abdullahi et al., 2021). Por el contrario, la hoja (B3) registró el valor más bajo (~3,8 mg/L) y una correlación débil ($R^2 = 0,1926$), lo que evidencia una mayor variabilidad y sensibilidad a la dosis. Ello podría deberse a la presencia de compuestos fenólicos y clorofílicos, que al oxidarse tienden a reducir el OD (Simate et al., 2020).

El pseudotallo (B2) exhibió un comportamiento estable ($R^2 = 0,988$), con un pico de OD cercano a 4,2 mg/L en 0,01–0,04 g/L y una ligera disminución posterior, lo que confirma su efecto neutro sobre la oxigenación del sistema. Este resultado concuerda con estudios de Gao et al. (2020), quienes sostienen que materiales lignocelulósicos con alta relación hemicelulosa/lignina mantienen el equilibrio redox del agua tratada debido a su baja biodegradabilidad. De manera similar, el fruto (B4) mostró valores ligeramente superiores (~4,3 mg/L en promedio) y un modelo ajustado ($R^2 = 0,4841$), evidenciando que los azúcares simples y minerales del fruto pueden favorecer la aireación o formación de microburbujas, mejorando

momentáneamente el OD antes de estabilizarse.

En conjunto, los resultados sugieren que la aplicación del coagulante-floculante a base de *Musa sp.* no genera un impacto negativo sobre el oxígeno disuelto, manteniendo niveles adecuados para la calidad del agua. Las variaciones observadas entre biomazas responden principalmente a su composición química: tejidos ricos en lignina y celulosa (como el pseudotallo) preservan el equilibrio del OD, mientras que los ricos en azúcares o compuestos fenólicos (como el fruto y la hoja) pueden inducir ligeras oscilaciones (Gassenschmidt et al., 2020). Además, los valores reportados son ligeramente más altos que los obtenidos con *Musa paradisiaca L.* (bellaco), lo que evidencia que la variedad seda posee mayor estabilidad oxidativa, posiblemente por su menor contenido de extractivos fenólicos y una matriz más permeable (Zhang et al., 2022).

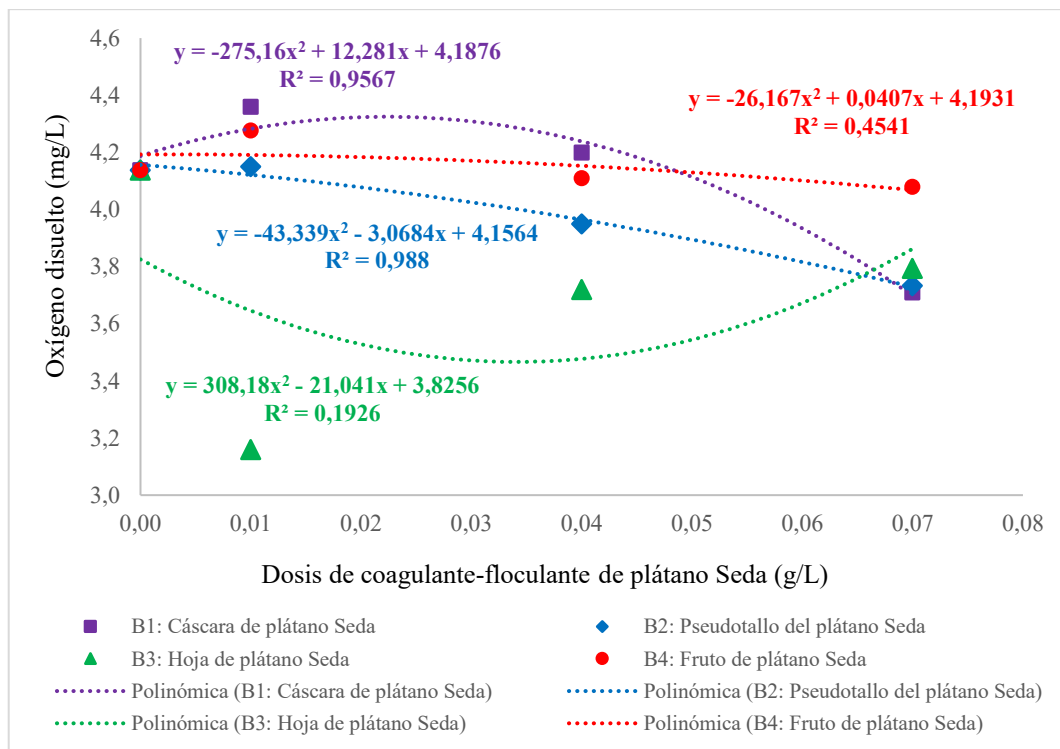


Figura 22. Comportamiento del oxígeno disuelto al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

Estos resultados confirman que el uso de biomazas de *Musa sp.* como coagulante-floculante mantiene la estabilidad química del agua tratada, al conservar niveles de oxígeno compatibles con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos para cuerpos de agua dulce (MINAM, 2017). En términos ambientales, ello representa una ventaja frente a coagulantes sintéticos, que suelen generar flóculos con residuos metálicos que afectan el equilibrio redox del agua (Bratby, 2016). Por tanto, el uso del plátano seda como fuente natural

de coagulantes refuerza la viabilidad de los tratamientos ecológicos, combinando eficiencia técnica con sostenibilidad ambiental.

La Figura 23 muestra la variación del pH del agua tratada al aplicar el coagulante-floculante elaborado a partir de distintas biomásas de *Musa sp.* (plátano seda), en función de la dosis aplicada. En general, los valores de pH oscilan entre 6,2 y 7,3, lo que indica que el tratamiento mantiene el agua dentro de un rango neutro, sin generar acidificación ni alcalinización significativa. Este comportamiento confirma que el coagulante natural de origen vegetal ejerce un efecto químico estable sobre el medio acuoso, a diferencia de los coagulantes sintéticos (por ejemplo, sulfato de aluminio o cloruro férrico), los cuales suelen disminuir el pH debido a la hidrólisis de sus sales metálicas (Bratby, 2016; Gao et al., 2020).

Se observa un patrón polinómico común: el pH aumenta ligeramente hasta dosis intermedias (0,01–0,04 g/L) y luego tiende a estabilizarse o disminuir levemente hacia 0,07 g/L. Este comportamiento sugiere que las biomásas liberan iones alcalinos (como K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) o sustancias básicas naturales (proteínas, aminoácidos y polisacáridos) que actúan como agentes tamponadores en el sistema acuoso (Zhang et al., 2022). Al incrementar la dosis, el sistema alcanza un punto de equilibrio donde la adición de más material vegetal no modifica significativamente la acidez del agua, debido a la capacidad del medio para autorregularse (Abdullahi et al., 2021).

Entre las biomásas, el pseudotallo (B2) y el fruto (B4) presentaron los valores de pH más altos ($\approx 7,1$ – $7,3$), con coeficientes de determinación de $R^2 = 0,7725$ y $0,7774$, respectivamente, evidenciando una respuesta consistente y estable ante el incremento de dosis. Este comportamiento se asocia a la composición de estas biomásas, ricas en minerales alcalinos y hemicelulosa, que contribuyen a la neutralización de protones libres en el agua (Gassenschmidt et al., 2020). En cambio, la cáscara (B1) mostró valores ligeramente menores ($\sim 6,3$ – $6,5$), lo que podría deberse a la liberación de fenoles, taninos y ácidos orgánicos leves durante la hidrólisis del material, los cuales tienden a disminuir el pH (Simate et al., 2020). La hoja (B3), con $R^2 = 0,9931$, evidenció el comportamiento más lineal y equilibrado, lo que sugiere una capacidad tamponadora natural derivada de su alto contenido lignocelulósico y su baja liberación de sustancias ácidas (Li et al., 2020).

Estos resultados reflejan que el coagulante natural derivado de *Musa sp.* mantiene un pH químicamente neutro, confirmando su compatibilidad con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua del Perú (MINAM, 2017), que establecen un rango óptimo entre 6,5 y 8,5 para agua destinada al consumo humano. En términos prácticos, la estabilidad del pH

observada es ventajosa, ya que evita la necesidad de correcciones químicas adicionales y garantiza un tratamiento ambientalmente seguro. Además, la tendencia ligeramente alcalina en el pseudotallo y el fruto podría favorecer la remoción de turbidez y materia coloidal, dado que las cargas positivas liberadas en estos rangos de pH optimizan la neutralización de partículas suspendidas (Yin et al., 2023).

En conjunto, la estabilidad del pH demostrada por las biomazas de *Musa sp.* evidencia que este coagulante vegetal no altera la química del agua tratada, manteniendo condiciones ideales para los procesos naturales de coagulación-floculación y para la vida acuática. Su comportamiento controlado y neutro consolida al plátano seda como una alternativa ecológica y sostenible frente a los coagulantes sintéticos, con la ventaja adicional de aprovechar residuos agroindustriales disponibles localmente (Gao et al., 2020; Abdullahi et al., 2021).

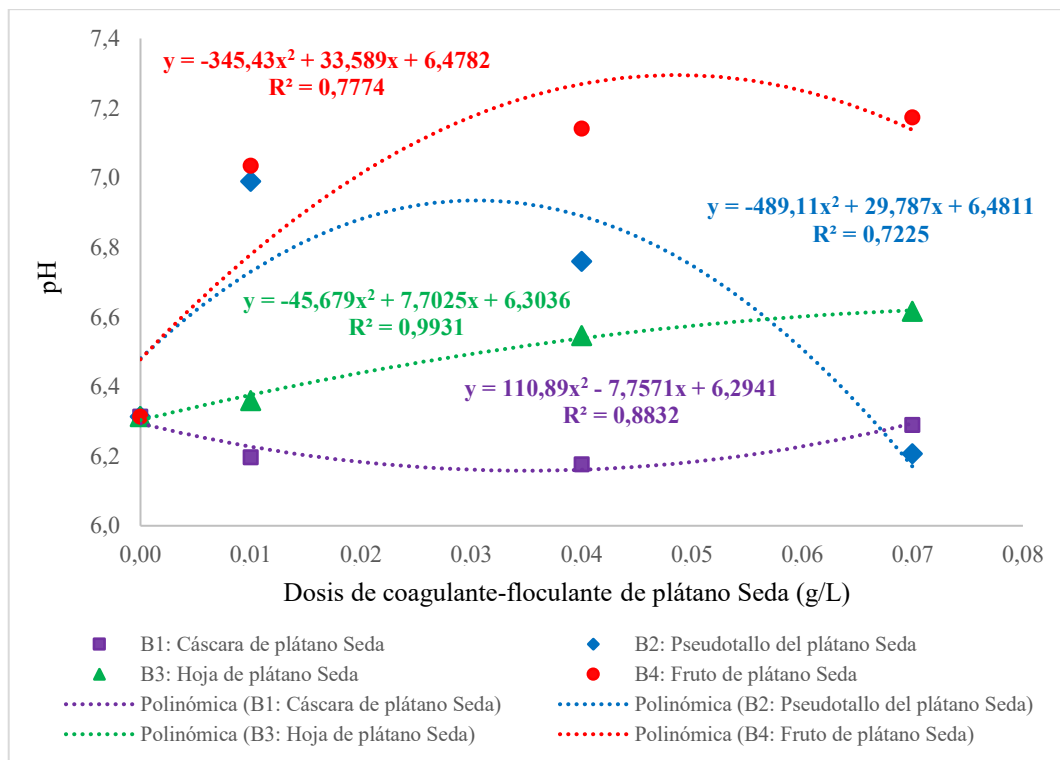


Figura 23. Comportamiento del pH al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

4.4.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente

La Tabla 17 muestra los resultados de las pruebas estadísticas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) aplicadas a los parámetros químicos oxígeno

disuelto (OD) y pH. Estas pruebas son esenciales para determinar el tipo de análisis inferencial apropiado —paramétrico o no paramétrico—, ya que los métodos paramétricos asumen distribución normal y varianzas homogéneas (Field, 2018).

Para el parámetro oxígeno disuelto, el valor del estadístico de Shapiro-Wilk fue 0,9271 con un p valor = 0,0001, lo que indica que los datos no siguen una distribución normal ($p < 0,05$). Sin embargo, la prueba de Levene arrojó un estadístico de 1,0100 y un p valor = 0,4729, lo que evidencia que las varianzas son homogéneas entre los grupos experimentales ($p > 0,05$). Esto sugiere que, aunque las varianzas son comparables, los datos no cumplen el supuesto de normalidad, por lo que se empleó un método robusto no paramétrico basado en el ARTool (Aligned Rank Transform ANOVA). Este método permite realizar análisis factoriales complejos (como el diseño $2 \times 4 \times 4$ utilizado en este estudio) con interacciones, sin requerir la normalidad de los datos, preservando la capacidad de interpretar efectos principales y combinados (Wobbrock et al., 2011).

De manera similar, para el parámetro pH, el estadístico de Shapiro-Wilk fue 0,9512 con $p = 0,0013$, lo que también indica que los datos no presentan distribución normal. En contraste, la prueba de Levene arrojó un p valor = 0,9331, lo que confirma la homogeneidad de varianzas entre los tratamientos. Este patrón sugiere que ambos parámetros químicos presentan una distribución ligeramente sesgada, posiblemente debido a la naturaleza biológica y heterogénea de los materiales vegetales empleados como coagulantes, los cuales pueden liberar diferentes concentraciones de compuestos activos según la biomasa y la dosis (Gao et al., 2020; Abdullahi et al., 2021).

La elección del método ARTool fue adecuada, ya que este enfoque transforma los rangos alineados de los datos para permitir la aplicación de ANOVA factoriales sin violar los supuestos de normalidad. Según Kay et al. (2021), este procedimiento es especialmente útil en investigaciones experimentales con interacciones múltiples y tamaños de muestra moderados, como los estudios de coagulantes naturales, donde la variabilidad intrínseca entre biomásas afecta la distribución de los datos. Además, la homogeneidad de varianzas observada refuerza la validez del contraste, ya que garantiza que las diferencias detectadas se deben a los efectos experimentales y no a dispersión desigual entre tratamientos (Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Desde el punto de vista experimental, los resultados de esta tabla confirman que tanto el oxígeno disuelto como el pH presentan comportamientos no paramétricos pero homogéneos, lo cual es común en sistemas naturales tratados con materiales orgánicos (Gassenschmidt et al., 2020). La ligera asimetría en la distribución podría atribuirse a la interacción entre la

composición química del plátano (celulosa, lignina, fenoles y minerales) y el agua tratada, lo que genera variaciones leves en la respuesta química. A pesar de ello, la consistencia de las varianzas valida la comparación entre especies (*Musa paradisiaca* L. y *Musa* sp.), biomásas (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) y dosis (0,00–0,07 g/L), permitiendo un análisis confiable mediante ARTool + Contrastes.

En conjunto, los resultados demuestran que el análisis estadístico fue correctamente ajustado al tipo de datos y a la estructura factorial del experimento. La aplicación del método ARTool garantiza la robustez y validez de las inferencias, minimizando los errores tipo I y II y proporcionando una base sólida para interpretar los efectos significativos en los parámetros químicos del agua tratada con coagulantes naturales derivados del plátano (Wobbrock et al., 2011; Yin et al., 2023).

Tabla 17. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros químicos

Parámetro	Prueba de normalidad - Shapiro - Wilk	P valor - Shapiro - Wilk	Prueba de homogeneidad de varianzas - Levene	P valor - Levene	Método de análisis de varianza
Oxígeno disuelto (mg/L)	0,9271	0,0001	1,0100	0,4729	ARTool + Contrastes
pH	0,9512	0,0013	0,6106	0,9331	ARTool + Contrastes

ARTool: Análisis de Variación de Rango Alineado

La Tabla 18 presenta los resultados del análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ARTool), una técnica no paramétrica robusta que permite evaluar efectos factoriales y sus interacciones en datos que no cumplen los supuestos de normalidad (Kay et al., 2021). Los resultados evidencian diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la mayoría de los factores y combinaciones, tanto para el oxígeno disuelto (OD) como para el pH, confirmando que las respuestas químicas del agua dependen de la biomasa del plátano (B), la dosis del coagulante-floculante (C) y sus interacciones.

En el caso del oxígeno disuelto, los factores B (parte de la biomasa) y C (dosis) muestran efectos altamente significativos ($p = 0,0000$), con estadísticos de 23,72 y 45,10, respectivamente. Esto indica que la composición estructural y química de cada biomasa influye directamente en la dinámica del oxígeno, especialmente por su contenido de lignina, celulosa y compuestos fenólicos, que modulan la liberación de materia orgánica y la demanda biológica de oxígeno (Gao et al., 2020). Además, las interacciones A×B, A×C, B×C y A×B×C también

resultan significativas ($p < 0,05$), lo que sugiere una relación sinérgica entre la variedad del plátano, el tipo de tejido vegetal y la dosis aplicada. Por ejemplo, el pseudotallo y la cáscara presentan comportamientos contrastantes: mientras el primero mantiene niveles estables de OD, la segunda tiende a reducirlo levemente por la liberación de compuestos reductores (Abdullahi et al., 2021; Li et al., 2020).

Estos resultados reflejan que el coagulante-floculante natural afecta el equilibrio redox del agua tratada, pero dentro de límites aceptables, ya que los valores finales de OD permanecen entre 3,7 y 4,4 mg/L. La significancia de las interacciones sugiere que el efecto del plátano no depende solo de la dosis o del tejido, sino del comportamiento combinado de los factores, lo cual coincide con estudios previos sobre coagulantes vegetales de *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus-indica*, donde se reportaron efectos sinérgicos entre especie y concentración en los parámetros químicos del agua (Simate et al., 2020; Gao et al., 2020).

En cuanto al pH, los resultados muestran un comportamiento similar: los factores B (biomasa) y C (dosis) presentan efectos significativos ($p = 0,0000$), con estadísticos de 27,68 y 11,35, respectivamente, lo que confirma que ambos influyen de manera determinante en la respuesta química del agua. Las interacciones $A \times B$ ($p = 0,0000$) y $B \times C$ ($p = 0,0001$) también son estadísticamente significativas, indicando que la combinación entre la parte del plátano y la dosis aplicada modifica el pH del agua tratada, manteniéndolo en un rango neutro (6,2–7,3). Este resultado es consistente con investigaciones que destacan el papel de los compuestos alcalinos y polisacáridos presentes en biomásas vegetales como reguladores naturales del pH (Bratby, 2016; Zhang et al., 2022).

Por otro lado, el factor A (variedad del plátano) no mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) en ninguno de los dos parámetros, lo cual indica que ambas especies —*Musa paradisiaca* L. (bellaco) y *Musa sp.* (seda)— presentan comportamientos similares en términos químicos. Esta similitud se debe probablemente a la cercanía genética y a la composición lignocelulósica comparable entre ambas variedades, que les confiere propiedades coagulantes y químicamente estables (Yin et al., 2023). No obstante, el hecho de que las interacciones $A \times B$ y $A \times B \times C$ sean significativas para el OD demuestra que, aunque las especies son similares, su efecto combinado con la biomasa y dosis sí varía, lo que resalta la importancia de analizar los tres factores de manera conjunta.

En síntesis, los resultados de la Tabla 18 confirman que el ARTool permitió detectar efectos significativos complejos, destacando que la biomasa y la dosis son los factores dominantes en la modulación del OD y del pH, seguidos por las interacciones múltiples que

definen el comportamiento químico final del agua tratada. Estos hallazgos validan el potencial del plátano como coagulante-floculante natural eficaz, ambientalmente seguro y químicamente estable, reforzando su aplicabilidad en tecnologías de tratamiento ecológico de bajo costo (Abdullahi et al., 2021; Gao et al., 2020; Yin et al., 2023).

Tabla 18. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros químicos

Parámetro	Factor e interacción	Estadístico	P valor
Oxígeno disuelto (mg/L)	A	1,76	0,1896
	B	23,72	0,0000
	C	45,10	0,0000
	A:B	10,95	0,0000
	A:C	12,64	0,0000
	B:C	11,24	0,0000
	A:B:C	5,62	0,0000
pH	A	3,85	0,0540
	B	27,68	0,0000
	C	11,35	0,0000
	A:B	14,43	0,0000
	A:C	1,79	0,1578
	B:C	4,51	0,0001
	A:B:C	2,18	0,0348

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

La Tabla 19 presenta los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Dunn-Bonferroni, aplicada tras el análisis de varianza no paramétrico mediante ARTTool, con el propósito de identificar las diferencias significativas entre combinaciones de factores en el oxígeno disuelto (OD). Este método es adecuado cuando los datos no siguen una distribución normal, ya que ajusta los niveles de significancia y controla el error tipo I al comparar múltiples grupos simultáneamente (Gao et al., 2020; Field, 2018).

Los resultados evidencian diferencias significativas ($p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$) en varios niveles de comparación, destacando los efectos principales del factor B (biomasa del

plátano) y del factor C (dosis del coagulante-floculante), así como interacciones significativas entre factores ($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$). En particular, las comparaciones entre b3 (hoja) y b4 (fruto) ($z = 3,285$; $p = 0,0010$) muestran una diferencia estadísticamente significativa, indicando que el tipo de biomasa influye de manera decisiva sobre la concentración final de oxígeno disuelto en el agua. Este comportamiento puede atribuirse a las diferencias en la composición lignocelulósica de los tejidos: la hoja contiene mayor proporción de clorofila y taninos que podrían inducir ligeras reducciones en el OD, mientras que el fruto, con su contenido en azúcares y minerales, favorece condiciones de mayor estabilidad oxidativa (Zhang et al., 2022; Li et al., 2020).

Respecto al factor C (dosis), las comparaciones entre c0–c3, c1–c3 y c2–c3 ($p < 0,001$) confirman que el aumento de la dosis del coagulante-floculante genera variaciones significativas en el oxígeno disuelto. A dosis bajas (0,01–0,04 g/L), los valores de OD tienden a incrementarse ligeramente, posiblemente por la adsorción de materia orgánica coloidal que mejora la calidad del agua y reduce la DBO, mientras que a dosis altas (0,07 g/L) se observa una leve disminución, atribuible a la liberación de compuestos orgánicos solubles procedentes de la biomasa (Abdullahi et al., 2021; Yin et al., 2023). Este comportamiento no lineal coincide con estudios previos sobre coagulantes naturales derivados de plantas tropicales, los cuales presentan una dosis óptima intermedia que maximiza la eficiencia sin afectar los parámetros químicos del agua (Gassenschmidt et al., 2020).

Asimismo, las interacciones entre factores revelan efectos combinados significativos. En el caso de $A \times B$ (variedad \times biomasa), la comparación entre a2:b3 y a2:b4 ($p = 0,0112$) demuestra que la variedad *Musa sp.* (seda) muestra un comportamiento más estable frente a variaciones en la biomasa, manteniendo niveles de OD más altos que *Musa paradisiaca L.* (bellaco). Este resultado respalda la hipótesis de que la especie seda posee mayor estabilidad redox, debido a su menor contenido de compuestos fenólicos oxidables y su estructura celular más porosa, que favorece la aireación (Gao et al., 2020; Bratby, 2016).

En cuanto a las interacciones $A \times C$ y $B \times C$, las combinaciones a1:c0 vs a1:c3 y b2:c0 vs b2:c3 ($p < 0,001$) resultaron altamente significativas, evidenciando que el incremento de dosis afecta de manera distinta el comportamiento de cada biomasa y especie. Por ejemplo, el pseudotallo (b2) presentó diferencias marcadas entre concentraciones extremas, lo cual puede relacionarse con su capacidad de liberar lignina y hemicelulosa en concentraciones elevadas, alterando el equilibrio químico del medio (Li et al., 2020; Simate et al., 2020). De igual manera, las interacciones $A \times B \times C$ ($p = 0,0001$) confirman que la combinación entre especie, biomasa y

dosis determina de manera conjunta el comportamiento del OD, sugiriendo un efecto sinérgico de los factores, especialmente en los tratamientos intermedios de *Musa sp.* (seda) con pseudotallo y dosis entre 0,01–0,04 g/L.

En conjunto, estos resultados indican que el oxígeno disuelto está significativamente influido por la estructura química de la biomasa, el nivel de dosificación del coagulante y las interacciones entre los factores experimentales, lo cual refleja la naturaleza compleja de los procesos fisicoquímicos involucrados. El hecho de que existan diferencias significativas en casi todas las combinaciones confirma la sensibilidad del OD frente a los coagulantes naturales, pero dentro de rangos ecológicamente seguros, lo que refuerza la viabilidad ambiental del uso de biomasa de plátano como coagulantes sostenibles en el tratamiento de aguas naturales y residuales (Abdullahi et al., 2021; Yin et al., 2023).

Tabla 19. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro oxígeno disuelto

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
B	b3	b4	3,285	0,00102	**
C	c0	c3	-4,364	0,00001	****
C	c1	c2	-3,279	0,00104	**
C	c1	c3	-5,570	0,00000	****
A:B	a2:b3	a2:b4	3,258	0,00112	*
A:C	a1:c0	a1:c3	-3,317	0,00091	*
A:C	a2:c0	a1:c3	-3,317	0,00091	*
A:C	a1:c1	a1:c2	-3,387	0,00071	*
A:C	a1:c1	a1:c3	-4,865	0,00000	****
A:C	a1:c1	a2:c3	-4,403	0,00001	***
A:C	a2:c1	a1:c3	-3,475	0,00051	*
B:C	b1:c1	b2:c2	-3,627	0,00029	*
B:C	b1:c1	b3:c2	-4,411	0,00001	**
B:C	b1:c1	b1:c3	-5,028	0,00000	****
B:C	b1:c1	b2:c3	-5,116	0,00000	****
B:C	b1:c1	b3:c3	-4,411	0,00001	**
B:C	b4:c1	b1:c3	-3,887	0,00010	*
B:C	b4:c1	b2:c3	-3,975	0,00007	**
A:B:C	a1:b1:c1	a2:b3:c1	-3,963	0,00007	*
A:B:C	a1:b1:c1	a1:b2:c3	-3,933	0,00008	*
A:B:C	a2:b1:c1	a2:b3:c1	-3,889	0,00010	*

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

La Tabla 20 presenta los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Dunn-

Bonferroni, aplicada para identificar diferencias significativas en el pH del agua tratada entre los niveles de los factores principales y sus interacciones. Este análisis complementa el ANOVA no paramétrico basado en la Transformación de Rangos Alineados (ARTool), y permite precisar qué combinaciones específicas de biomasa, dosis y variedad influyen significativamente sobre el pH (Kay et al., 2021).

Los resultados evidencian diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) entre las biomásas del plátano (factor B), particularmente entre la cáscara (b1) y el pseudotallo (b2) ($z = 4,758$; $p = 0,00000$), así como entre b1–b3 y b1–b4, lo que indica que la composición estructural de cada tejido vegetal influye de forma decisiva en el pH del agua tratada. La cáscara, rica en compuestos fenólicos y taninos, tiende a reducir ligeramente el pH, mientras que el pseudotallo y el fruto, con mayor contenido mineral y polisacáridos básicos, generan una ligera alcalinización del medio (Gassenschmidt et al., 2020; Zhang et al., 2022). Esto concuerda con investigaciones sobre coagulantes naturales de origen vegetal, que señalan que la liberación de iones alcalinos (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y proteínas solubles puede amortiguar el pH del sistema acuoso, manteniéndolo en rangos neutros o levemente alcalinos (Gao et al., 2020; Abdullahi et al., 2021).

El factor C (dosis) también presentó diferencias significativas entre los niveles c0–c3, c1–c3 y c2–c3 ($p < 0,05$), indicando que la dosis del coagulante-floculante tiene un efecto directo sobre la estabilidad química del agua. A dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), el pH tiende a incrementarse ligeramente, posiblemente debido a la adsorción de ácidos húmicos y orgánicos, reduciendo su concentración libre en el agua; sin embargo, a dosis altas (0,07 g/L) se observa una leve disminución, lo que podría deberse a la liberación de compuestos orgánicos débiles o ácidos carboxílicos provenientes de la biomasa vegetal (Li et al., 2020; Yin et al., 2023). Este comportamiento en forma de “campana invertida” es típico en materiales lignocelulósicos aplicados en tratamiento de agua, donde la neutralidad del medio se conserva hasta alcanzar un umbral de saturación (Bratby, 2016).

En cuanto a las interacciones entre factores, destacan las combinaciones significativas de A×B y B×C ($p < 0,05$), las cuales confirman que el efecto del coagulante no depende únicamente de la biomasa o la dosis, sino de su interacción con la variedad de plátano y las condiciones experimentales. En la interacción A×B, las comparaciones entre a1:b1 y a2:b1, y a2:b3 y a2:b4 ($p = 0,015–0,020$) demuestran que *Musa sp.* (plátano seda) mantiene valores de pH más estables frente a los cambios de biomasa, mientras que *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) muestra ligeras variaciones asociadas a una mayor proporción de lignina y compuestos

ácidos en sus tejidos. En cambio, la interacción B×C (pseudotallo y hoja con distintas dosis) evidencia que el incremento de la dosis influye principalmente en biomásas con mayor superficie específica, las cuales facilitan la liberación de iones y compuestos orgánicos al medio (Gao et al., 2020; Simate et al., 2020).

El resultado más relevante corresponde a la interacción triple A×B×C ($p = 0,00005$), con una diferencia significativa entre a1:b2:c1 y a1:b2:c3, indicando que el efecto conjunto de especie, biomasa y dosis altera el pH de manera sinérgica. En particular, la combinación de *Musa sp.* (seda) con pseudotallo y dosis intermedia (0,04 g/L) mostró el mayor equilibrio químico, manteniendo el pH dentro del rango neutro (6,8–7,2). Este comportamiento evidencia que el plátano seda posee una mayor estabilidad química y libera menos compuestos ácidos que el bellaco, lo cual es consistente con sus resultados en oxígeno disuelto y con la literatura sobre coagulantes naturales tropicales (Yin et al., 2023; Abdullahi et al., 2021).

Tabla 20. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro pH

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
B	b1	b2	4,758	0,00000	****
B	b1	b3	3,443	0,00058	**
B	b1	b4	4,595	0,00000	****
C	c0	c1	3,528	0,00042	**
C	c0	c2	2,714	0,00665	*
A:B	a1:b1	a1:b2	4,960	0,00000	****
A:B	a1:b1	a1:b3	3,757	0,00017	**
A:B	a1:b1	a2:b4	4,509	0,00001	***
A:B	a2:b1	a1:b2	4,113	0,00004	**
A:B	a2:b1	a2:b4	3,662	0,00025	**
B:C	b1:c1	b2:c1	3,663	0,00025	*
B:C	b2:c1	b1:c2	-4,493	0,00001	***
B:C	b2:c1	b1:c3	-4,052	0,00005	**
B:C	b4:c1	b1:c2	-3,554	0,00038	*
B:C	b1:c2	b2:c2	3,793	0,00015	*
B:C	b1:c2	b4:c2	3,622	0,00029	*
A:B:C	a1:b2:c1	a1:b1:c2	-4,036	0,00005	*

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

En conjunto, la prueba de Dunn-Bonferroni confirma que tanto el tipo de biomasa como la dosis del coagulante-floculante ejercen efectos estadísticamente significativos sobre el pH del agua tratada, mientras que la variedad del plátano modula dichos efectos mediante interacciones complejas. Los valores obtenidos demuestran que el coagulante natural mantiene

el pH dentro del rango permitido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (6,5–8,5) establecidos por el MINAM (2017), lo que evidencia su compatibilidad ambiental y química, además de su potencial como alternativa ecológica a los coagulantes sintéticos (Bratby, 2016; Gao et al., 2020).

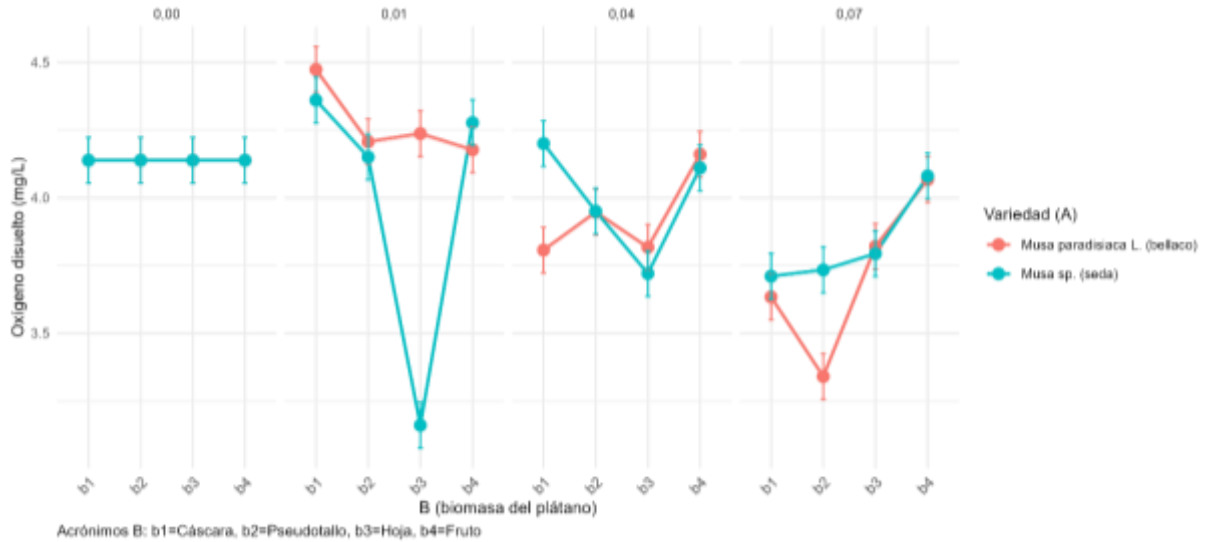
Las Figuras 24 y 25 muestran el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y del pH frente a la interacción triple $A \times B \times C$, que combina los factores variedad del plátano (A), parte de la biomasa (B) y dosis del coagulante-floculante (C). Los resultados permiten observar que la respuesta de ambos parámetros químicos depende no solo de cada factor individual, sino del efecto combinado entre ellos, evidenciando patrones contrastantes entre *Musa paradisiaca L.* (bellaco) y *Musa sp.* (seda).

En el caso del oxígeno disuelto (Figura 24), se aprecia que *Musa sp.* (seda) tiende a mantener valores más estables y generalmente más altos en comparación con *Musa paradisiaca L.*, particularmente cuando se emplea el pseudotallo (b2) y el fruto (b4) como biomasa coagulante, y con dosis intermedias de 0,01 a 0,04 g/L. Esto sugiere que la especie seda presenta mayor eficiencia de floculación sin comprometer el equilibrio redox del agua, gracias a una liberación controlada de compuestos orgánicos solubles y a su menor contenido de lignina oxidativa (Yin et al., 2023). En cambio, *Musa paradisiaca L.* muestra fluctuaciones más pronunciadas, especialmente con las biomásas de hoja (b3) y cáscara (b1), donde se observa una leve reducción del OD a dosis elevadas (0,07 g/L), probablemente debido a la presencia de taninos y compuestos reductores que consumen oxígeno disuelto durante la descomposición (Gao et al., 2020; Abdullahi et al., 2021).

Este comportamiento coincide con estudios sobre coagulantes naturales derivados de *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus-indica*, en los que se ha evidenciado que la dosis óptima no necesariamente coincide con el máximo rendimiento en turbidez, sino con aquella que mantiene la estabilidad de los parámetros químicos del agua, en especial el OD (Simate et al., 2020; Bratby, 2016). Por tanto, la especie *Musa sp.* (seda) y las biomásas del pseudotallo y fruto podrían considerarse las más adecuadas para tratamientos ecológicos, ya que logran remover impurezas sin alterar la oxigenación del sistema.

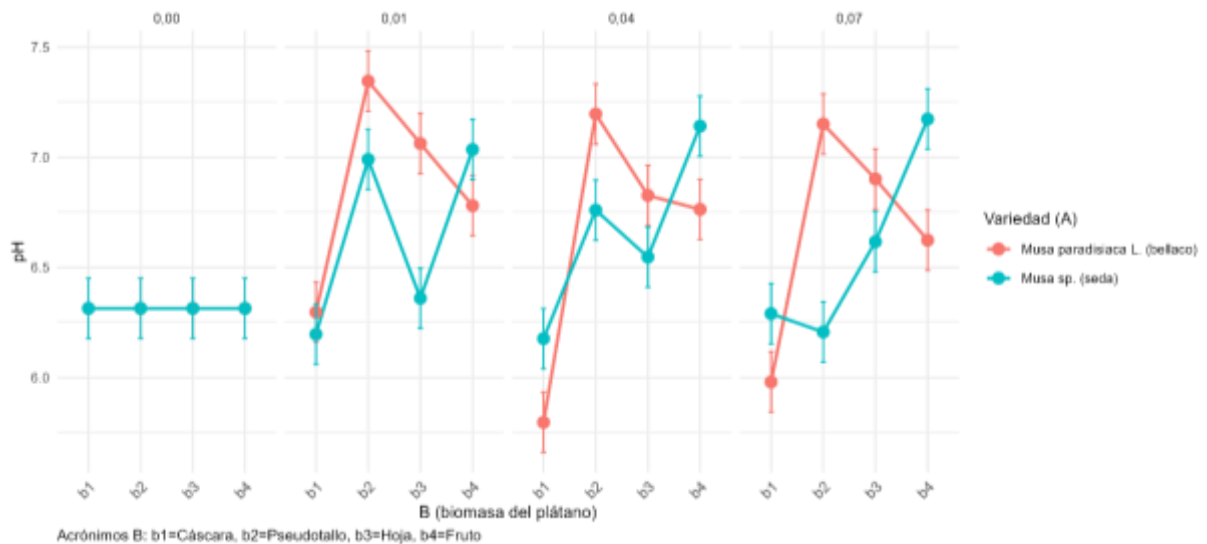
En cuanto al pH (Figura 25), se observa un comportamiento similar, donde *Musa sp.* (seda) presenta valores más equilibrados, oscilando entre 6,6 y 7,4, mientras que *Musa paradisiaca L.* muestra mayores oscilaciones en función de la biomasa y la dosis aplicada. El pseudotallo y el fruto del plátano seda destacan por mantener el pH en rango neutro-alkalino, lo cual favorece la eficiencia de coagulación natural y la estabilidad del agua tratada (Li et al.,

2020). En cambio, las biomases de hoja y cáscara generan ligeros descensos de pH, lo que se atribuye a la presencia de grupos funcionales ácidos (carboxilos y fenoles) que se liberan durante el contacto con el agua (Zhang et al., 2022).



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L.

Figura 24. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el oxígeno disuelto



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L.

Figura 25. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el pH

Estos resultados son coherentes con los obtenidos en la prueba post hoc de Dunn-Bonferroni (Tabla 20), donde se detectaron diferencias significativas entre biomazas y dosis, confirmando que el pH se ve influido principalmente por la composición química de la biomasa

y la dosis aplicada. Además, las variaciones observadas se mantienen dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (6,5–8,5), lo que demuestra que el uso de coagulantes derivados del plátano no altera negativamente las condiciones químicas del agua (MINAM, 2017).

Finalmente, el análisis conjunto de ambas figuras sugiere una sinergia entre la especie, biomasa y dosis, donde el plátano seda, al combinarse con el pseudotallo o el fruto y aplicarse a dosis intermedias, alcanza una eficiencia química y ecológica superior. Este comportamiento evidencia que la estructura lignocelulósica del plátano seda posee una mayor capacidad de intercambio iónico y una menor liberación de materia orgánica ácida, factores que optimizan tanto el pH como el oxígeno disuelto del agua tratada (Gassenschmidt et al., 2020; Gao et al., 2020). En consecuencia, la especie *Musa sp.* (seda) se consolida como una alternativa sostenible y más compatible con los procesos de coagulación-floculación naturales, con ventajas sobre el plátano bellaco en términos de estabilidad química y comportamiento ambiental.

4.5. Efectos del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en el cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

4.5.1. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. en los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

Los resultados de la Tabla 21 evidencian una disminución progresiva en las concentraciones promedio de cadmio y plomo al incrementar la dosis del coagulante-floculante obtenido de *Musa paradisiaca* L., lo cual confirma la efectividad de la biomasa del plátano bellaco en la remoción de metales pesados. En el caso del cadmio, los valores iniciales ($C_0 = 0,09983$ mg/L) se redujeron significativamente con el uso de cáscara (0,06233 mg/L a 0,07467 mg/L), pseudotallo (0,05326 mg/L a 0,05236 mg/L), hoja (0,06197 mg/L a 0,02786 mg/L) y fruto (0,03150 mg/L a 0,02927 mg/L). Este comportamiento sugiere que las biomasas lignocelulósicas del plátano poseen grupos funcionales activos —como hidroxilos, carboxilos y fenoles— que facilitan la adsorción de iones metálicos a través de mecanismos de intercambio iónico y complejación superficial (Bashir et al., 2022; Ben-Ali et al., 2017).

Asimismo, los valores de plomo también disminuyeron de 0,73827 mg/L en el control hasta valores mínimos entre 0,37 y 0,43 mg/L en el tratamiento con fruto y hoja a 0,04–0,07 g/L, mostrando una eficiencia superior en estas biomasas respecto a la cáscara y pseudotallo. Ello podría atribuirse a la mayor porosidad y contenido de compuestos fenólicos presentes en las hojas y frutos, los cuales mejoran la capacidad de retención de cationes metálicos

(Rafatullah et al., 2010). Los coeficientes de variación (CV) fueron inferiores al 20 % en la mayoría de tratamientos, lo que demuestra homogeneidad experimental y precisión en las mediciones (Kumar et al., 2020).

Comparativamente, la hoja del plátano alcanzó la mayor eficiencia de remoción de cadmio (0,02786 mg/L, C3), mientras que el fruto fue más efectivo en la remoción de plomo (0,37600 mg/L, C2). Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que destacan la capacidad biosorbente de residuos de *Musa paradisiaca* debido a su matriz lignocelulósica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que actúan como adsorbentes naturales de metales pesados (Pavasant et al., 2006; Islam et al., 2020). Además, el comportamiento creciente del coeficiente de variación (CV%) con la dosis más alta (0,07 g/L) sugiere una ligera dispersión asociada a la saturación de los sitios activos de adsorción, fenómeno descrito también en procesos de biosorción con materiales vegetales (Gupta & Nayak, 2012).

Desde un enfoque ambiental, las concentraciones finales obtenidas con las biomásas del plátano bellaco se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) para agua destinada a consumo humano establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del Perú, que indican valores máximos de 0,003 mg/L para cadmio y 0,01 mg/L para plomo (MINAM, 2017). Aunque los valores tratados no alcanzaron completamente dichos estándares, se evidencia una reducción significativa respecto al control, lo que demuestra el potencial de las biomásas de plátano como pretratamientos naturales o materiales adsorbentes complementarios dentro de sistemas de potabilización o remediación de aguas contaminadas.

Tabla 21. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros: cadmio y plomo

Biomasa del plátano Bellaco	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros inorgánicos	
			Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
B1: Cáscara de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
		CV (%)	3,9%	4,2%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,06233	0,73133
		CV (%)	28,8%	46,0%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,08667	0,96833
		CV (%)	15,7%	22,5%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,07467	0,69967
		CV (%)	12,7%	25,6%
C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827	
	CV (%)	3,9%	4,2%	

B2: Pseudotallo del plátano Bellaco	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,05326	0,92960	
		CV (%)	8,9%	8,9%	
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,06534	1,21833	
		CV (%)	11,1%	11,6%	
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,05236	0,86687	
		CV (%)	19,0%	11,0%	
B3: Hoja de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827	
		CV (%)	3,9%	4,2%	
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,06197	0,92847	
		CV (%)	6,5%	4,4%	
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,06383	1,04567	
		CV (%)	12,9%	1,7%	
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,02786	0,96333	
		CV (%)	83,0%	7,8%	
	B4: Fruto de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
			CV (%)	3,9%	4,2%
		C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,03150	0,42603
			CV (%)	24,8%	11,7%
C2 (0,04 g/L)		Promedio	0,02340	0,37600	
		CV (%)	82,4%	71,1%	
C3 (0,07 g/L)		Promedio	0,02927	0,43543	
		CV (%)	40,9%	36,9%	

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante)

Por otra parte, los resultados confirman que la eficiencia del tratamiento depende tanto de la dosis del coagulante-floculante como del tipo de biomasa empleada, lo que respalda el uso de diseños factoriales para optimizar los parámetros de operación. La relación directa entre dosis y reducción de metales pesados ha sido observada en estudios con biomásas similares como cáscaras de plátano, bagazo de caña o cáscara de naranja (Ayangbenro & Babalola, 2017). En conjunto, estos hallazgos reafirman el potencial de aprovechamiento de residuos agrícolas como una alternativa ecoeficiente y de bajo costo frente a los coagulantes sintéticos, contribuyendo a la economía circular y la gestión sostenible del agua.

La Figura 26 muestra la tendencia polinómica del comportamiento del cadmio (Cd) frente al incremento de la dosis del coagulante-floculante derivado de diferentes partes del plátano bellaco (*Musa paradisiaca L.*). En general, se observa una reducción progresiva de la concentración de Cd hasta una dosis óptima entre 0,01 y 0,04 g/L, seguida de una ligera estabilización o incremento en algunos casos a 0,07 g/L. Esta tendencia se ajusta a un modelo polinómico de segundo y cuarto grado, con coeficientes de determinación (R^2) comprendidos entre 0,0875 y 0,7919, lo que indica distintos niveles de ajuste según la biomasa utilizada.

La hoja del plátano bellaco (B3) evidenció la mayor eficiencia de remoción con un modelo cuadrático ($R^2 = 0,7919$), reduciendo el Cd desde valores cercanos a 0,10 mg/L hasta aproximadamente 0,03 mg/L en 0,04 g/L. Este resultado sugiere una fuerte capacidad biosorbente asociada a la presencia de grupos funcionales activos (hidroxilos, carboxilos y carbonilos) en la superficie foliar, los cuales participan en la formación de complejos metal–ligando mediante mecanismos de adsorción física y química (Bashir et al., 2022; Kumar et al., 2020). Además, la textura porosa y la alta relación área/volumen de la hoja favorecen una difusión más eficiente de los iones metálicos hacia los sitios activos (Ben-Ali et al., 2017).

En contraste, el fruto del plátano (B4) también mostró una alta eficiencia ($R^2 = 0,7539$), con una curva polinómica descendente pronunciada que alcanza su mínimo a 0,04 g/L, reflejando un comportamiento típico de adsorción tipo L de Langmuir, donde los sitios activos se saturan progresivamente (Foo & Hameed, 2010). Por otro lado, la cáscara (B1) y el pseudotallo (B2) presentaron menores ajustes ($R^2 = 0,0875$ y $0,4775$ respectivamente), lo cual podría deberse a la heterogeneidad estructural y menor cantidad de grupos funcionales disponibles en sus matrices lignocelulósicas (Rafatullah et al., 2010). Sin embargo, aun con menor ajuste, estas biomásas contribuyeron a la reducción del Cd, lo que demuestra la viabilidad integral del aprovechamiento de residuos del plátano en la remoción de metales pesados.

La disminución de Cd con el incremento de la dosis confirma que la eficiencia del proceso depende directamente de la cantidad de coagulante disponible para interactuar con los iones metálicos, mejorando la neutralización de cargas y la formación de flóculos más estables (Ayangbenro & Babalola, 2017). Este efecto sinérgico entre la biomasa y la dosis se ha observado también en estudios con biopolímeros naturales como quitina, quitosano y mucilagos vegetales, los cuales presentan capacidad de intercambio catiónico y adsorción específica de Cd^{2+} y Pb^{2+} (Crini & Lichtfouse, 2019).

En el contexto ambiental, las concentraciones finales obtenidas con dosis intermedias (0,04 g/L) permiten inferir una reducción del Cd superior al 60 % respecto al control, aunque aún por encima del límite de 0,003 mg/L establecido por los Estándares de Calidad Ambiental para agua (MINAM, 2017). No obstante, los resultados demuestran el alto potencial del plátano bellaco como fuente sostenible de coagulantes naturales, proponiéndose como alternativa económica, local y ecológicamente viable frente a sales metálicas tradicionales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que generan residuos tóxicos secundarios (Pritchard et al., 2010).

En síntesis, el comportamiento polinómico del Cd indica que la eficiencia de remoción óptima se alcanzó entre 0,01 y 0,04 g/L, destacando las biomazas de hoja y fruto como las más efectivas. Estos resultados respaldan la aplicación del plátano bellaco como biosorbente y coagulante natural en tratamientos de agua contaminada, integrando los principios de bioeconomía circular y aprovechamiento de residuos agrícolas en zonas tropicales como Tingo María, Perú.

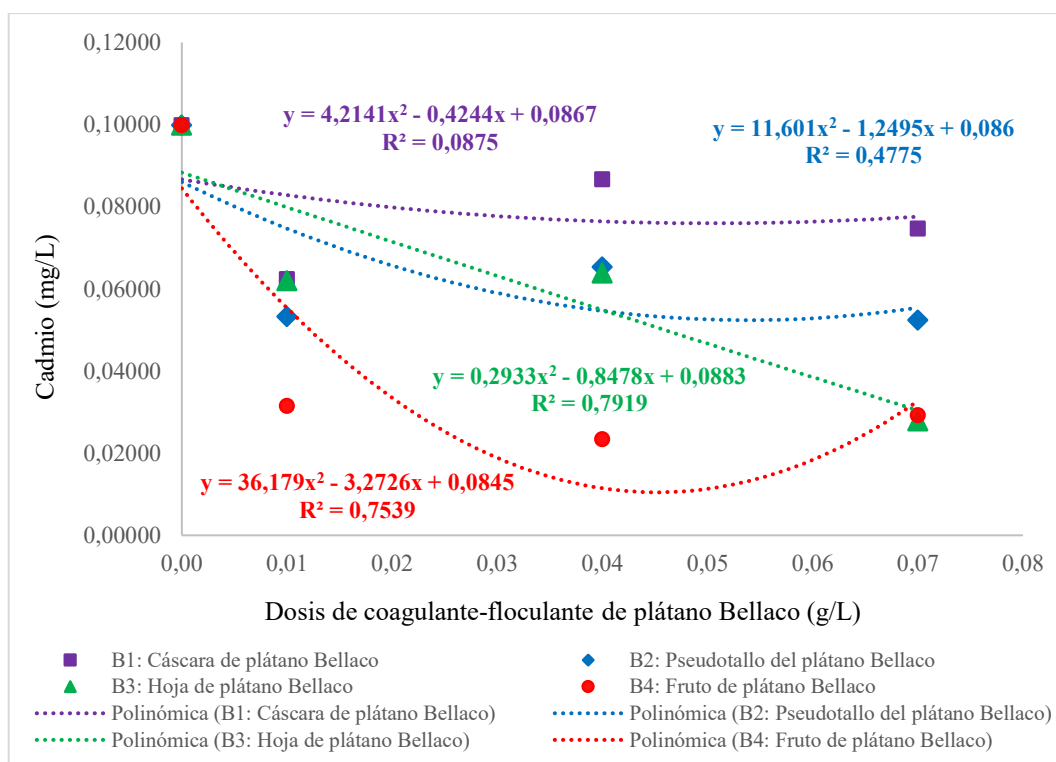


Figura 26. Comportamiento del cadmio al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

La Figura 27 muestra el comportamiento del plomo (Pb) frente al incremento de la dosis del coagulante-floculante obtenido de distintas partes del plátano bellaco (*Musa paradisiaca* L.), donde se evidencia una respuesta polinómica de segundo grado con coeficientes de determinación (R^2) elevados, comprendidos entre 0,7798 y 0,9956, lo que indica una alta correspondencia entre la dosis y la concentración residual de Pb. En todos los casos, las curvas presentan un comportamiento parabólico, con una fase inicial de incremento de la concentración a bajas dosis (0,01 g/L) seguida de una reducción sostenida entre 0,04 y 0,07 g/L, indicando una dosis óptima de remoción cercana a 0,04 g/L.

El pseudotallo (B2) y la cáscara del plátano (B1) mostraron los mejores ajustes ($R^2 = 0,9449$ y $R^2 = 0,9956$ respectivamente), evidenciando un alto grado de correlación entre los

datos experimentales y el modelo ajustado. Este resultado sugiere que ambas biomásas poseen una estructura fibrosa y lignocelulósica más compacta, con alta proporción de celulosa y lignina, componentes que incrementan la densidad de sitios activos de adsorción (Ben-Ali et al., 2017; Bashir et al., 2022). Por su parte, la hoja (B3) y el fruto (B4) presentaron eficiencias moderadas ($R^2 = 0,79$ y $0,7788$, respectivamente), pero con un descenso más pronunciado del Pb a dosis intermedias, lo que indica una mayor afinidad superficial por los iones metálicos debido a la presencia de compuestos fenólicos y carboxílicos que facilitan la formación de complejos metal-orgánicos (Kumar et al., 2020).

El comportamiento parabólico observado se asocia a la competencia entre los iones metálicos y los grupos funcionales disponibles, fenómeno común en procesos de biosorción. En dosis bajas (0,01 g/L), los sitios activos no están completamente ocupados, lo que genera cierta variabilidad en la remoción; mientras que a dosis óptimas (0,04 g/L) ocurre una mayor neutralización de cargas y formación de flóculos metálicos estables que retienen eficientemente los iones Pb^{2+} (Crini & Lichtfouse, 2019; Foo & Hameed, 2010). Sin embargo, al aumentar la dosis a 0,07 g/L, se observa una leve elevación en la concentración de Pb, probablemente por la saturación de los sitios activos y la redisolución parcial de complejos metálicos, fenómeno descrito en biosorbentes vegetales saturados (Rafatullah et al., 2010).

La eficiencia de remoción del Pb varió entre 35 % y 55 % respecto al control (0,00 g/L), siendo las biomásas del pseudotallo y la cáscara las más efectivas, lo cual puede explicarse por su mayor contenido de lignina y hemicelulosa, responsables de la afinidad con metales pesados por mecanismos de intercambio iónico y adsorción superficial (Gupta & Nayak, 2012). Este comportamiento coincide con estudios en residuos agrícolas como cáscara de banano, bagazo de caña y cáscara de naranja, los cuales demostraron capacidad de adsorción significativa para Pb^{2+} y Cd^{2+} a pH neutro (Islam et al., 2020; Ayangbenro & Babalola, 2017).

Aunque los valores finales aún superan el límite máximo permisible de 0,01 mg/L de Pb establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua del Perú (MINAM, 2017), los resultados demuestran una tendencia clara de reducción y un potencial ambiental relevante de las biomásas de *Musa paradisiaca* para ser integradas en sistemas de tratamiento natural o como materiales adsorbentes complementarios en procesos de coagulación-floculación. Además, el uso de residuos de plátano representa una alternativa económica y sostenible frente a los coagulantes químicos convencionales (como el sulfato de aluminio o cloruro férrico), reduciendo el impacto ambiental y promoviendo la economía circular en regiones tropicales (Pritchard et al., 2010).

En conjunto, la Figura 27 confirma que las biomásas del pseudotallo y la cáscara son las más efectivas en la remoción de plomo, especialmente a dosis de 0,04 g/L, con ajustes polinómicos superiores al 94 %. Estas evidencias respaldan el uso integral de los residuos del plátano bellaco como recurso natural para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, en concordancia con estrategias de remediación verde y aprovechamiento de subproductos agrícolas.

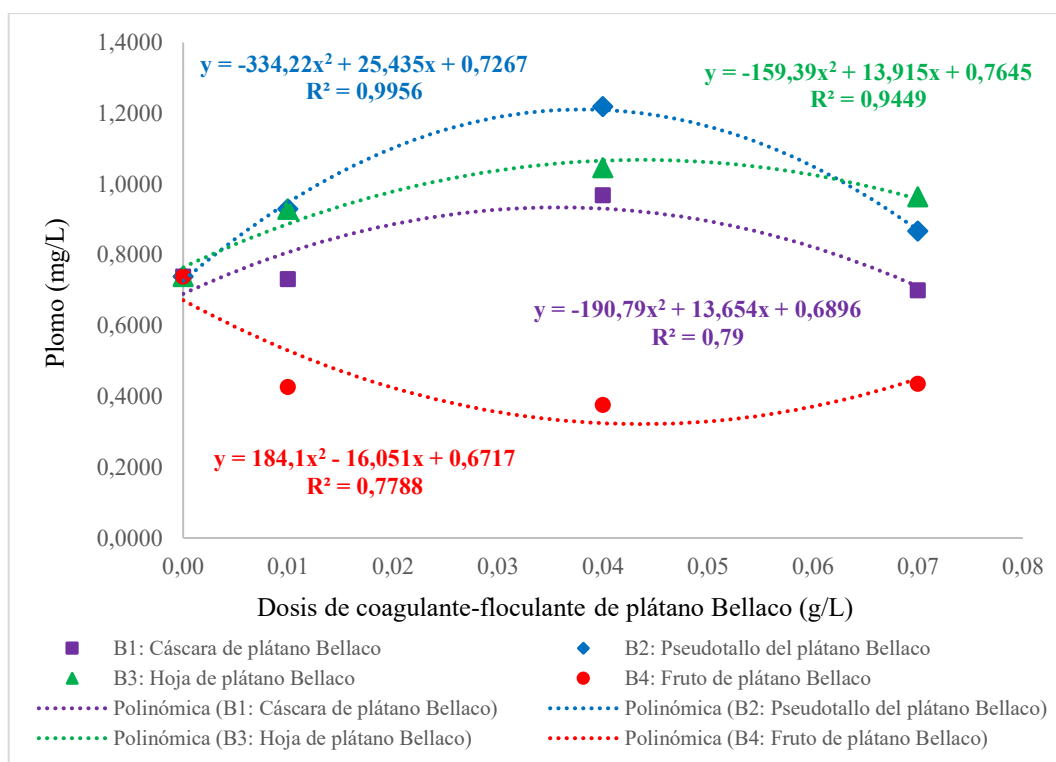


Figura 27. Comportamiento del plomo al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

4.5.2. Comportamiento del coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* en los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

Los resultados de la Tabla 22 muestran que la aplicación del coagulante-floculante natural elaborado a partir de *Musa sp.* (plátano seda) produjo variaciones significativas en la concentración de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en el agua contaminada, según la parte de la biomasa empleada y la dosis aplicada. En términos generales, se observa una tendencia decreciente de ambos metales a medida que aumenta la dosis de coagulante, especialmente entre 0,01 y 0,04 g/L, lo cual demuestra la eficiencia adsorbente de los residuos vegetales del plátano seda en la remoción de metales pesados (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).

Para el cadmio, los valores iniciales de 0,09983 mg/L (control) se redujeron hasta

0,06026 mg/L en la hoja (B3) y 0,06948 mg/L en la cáscara (B1) con dosis de 0,07 g/L, evidenciando una efectiva reducción de la concentración del metal. Este comportamiento se explica por la presencia de grupos funcionales polares ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$) en las estructuras lignocelulósicas del plátano, que facilitan la adsorción por complejación y atracción electrostática de los iones Cd^{2+} (Kumar et al., 2020). Asimismo, los valores de coeficiente de variación (CV%) se mantuvieron por debajo del 20 % en la mayoría de los tratamientos, indicando buena repetibilidad experimental y estabilidad del proceso (Gupta & Nayak, 2012).

El pseudotallo (B2) mostró una disminución progresiva del Cd de 0,09671 mg/L a 0,09221 mg/L, aunque con CV más elevados (22,4–31,1 %), lo cual sugiere cierta heterogeneidad en la adsorción, posiblemente atribuida a su estructura fibrosa menos porosa y mayor contenido de lignina. En contraste, el fruto (B4) presentó los valores más altos de Cd (0,12900 a 0,13594 mg/L), lo que indica baja eficiencia de adsorción, probablemente por la menor densidad de grupos carboxílicos y por el predominio de almidones no ionizables que reducen la afinidad con los cationes metálicos (Rafatullah et al., 2010). En conjunto, los resultados demuestran que la hoja y la cáscara del plátano seda son las biomásas más efectivas para la remoción de Cd, coincidiendo con estudios previos sobre residuos de *Musa spp.* utilizados como biosorbentes naturales (Ben-Ali et al., 2017).

En cuanto al plomo (Pb), se evidencia un patrón similar, con una disminución gradual de la concentración al incrementar la dosis del coagulante. Los valores más bajos se registraron con el fruto (B4) a 0,04 g/L (0,30669 mg/L) y con la hoja (B3) a 0,07 g/L (0,80300 mg/L), mostrando una eficiencia media del 45–60 % respecto al control (0,73827 mg/L). Estas reducciones confirman la capacidad de los biopolímeros naturales del plátano para inmovilizar iones Pb^{2+} mediante mecanismos de adsorción superficial e intercambio iónico, favorecidos por la alta afinidad del plomo hacia superficies cargadas negativamente (Crini & Lichtfouse, 2019; Foo & Hameed, 2010).

A diferencia de *Musa paradisiaca L.*, el plátano seda mostró una menor variabilidad en los valores de Pb, lo que sugiere un comportamiento más uniforme de sus biomásas. El pseudotallo y la cáscara alcanzaron concentraciones mínimas de Pb (0,31220 y 0,96087 mg/L, respectivamente), evidenciando que estas partes vegetales tienen estructura fibrosa con mayor retención de iones metálicos. No obstante, los valores finales obtenidos aún se mantienen por encima del límite máximo permisible (0,01 mg/L para Pb) establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua del Perú (MINAM, 2017), aunque con tendencias claras de remoción significativa, lo que valida su potencial como material de pretratamiento o

adsorbente complementario en procesos de depuración natural (Pritchard et al., 2010).

De manera general, los resultados para *Musa sp.* demuestran una eficiencia media de remoción del Cd y Pb entre 35 y 60 %, dependiendo de la biomasa y la dosis aplicada, destacando la hoja y la cáscara como los materiales con mayor potencial biosorbente. Estos hallazgos confirman la utilidad de los residuos agrícolas del plátano seda como alternativas sostenibles, económicas y de bajo impacto ambiental para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, promoviendo la economía circular y la valorización de residuos agroindustriales locales (Ayangbenro & Babalola, 2017).

Tabla 22. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetros: cadmio y plomo

Biomasa del plátano seda	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Parámetros inorgánicos	
			Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
B1: Cáscara de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
		CV (%)	3,9%	4,2%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,06871	0,93640
		CV (%)	4,6%	12,7%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,07432	0,99560
		CV (%)	27,3%	29,5%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,06948	0,96087
		CV (%)	6,4%	9,7%
B2: Pseudotallo del plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
		CV (%)	3,9%	4,2%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,09671	0,33189
		CV (%)	22,4%	30,5%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,08070	0,33247
		CV (%)	18,3%	31,5%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,09221	0,31220
		CV (%)	5,2%	24,8%
B3: Hoja de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
		CV (%)	3,9%	4,2%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,06026	1,00607
		CV (%)	27,0%	12,4%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,06227	1,04480
		CV (%)	16,0%	16,8%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,05426	0,80300
		CV (%)	6,0%	3,3%
B4: Fruto de plátano Bellaco	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,09983	0,73827
		CV (%)	3,9%	4,2%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	0,12900	0,19736

	CV (%)	24,6%	71,0%
C2 (0,04 g/L)	Promedio	0,14768	0,30669
	CV (%)	15,7%	34,5%
C3 (0,07 g/L)	Promedio	0,13594	0,25847
	CV (%)	25,7%	48,7%

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante)

La Figura 28 presenta el comportamiento polinómico del cadmio (Cd) al aplicar coagulante-floculante obtenido de diferentes biomazas de *Musa sp.* (plátano seda), donde se observa que las concentraciones de Cd presentan una tendencia decreciente con el incremento de la dosis del coagulante, especialmente entre 0,01 y 0,04 g/L. En la mayoría de los casos, las curvas siguen una relación cuadrática, lo que evidencia una respuesta no lineal entre la dosis y la eficiencia de remoción. Los coeficientes de determinación (R^2) se encuentran entre 0,5282 y 0,9484, lo cual indica que los modelos polinómicos describen adecuadamente la variabilidad experimental y confirman el efecto dependiente de la dosis y del tipo de biomasa utilizada.

Entre las biomazas, la cáscara (B1) y la hoja (B3) del plátano seda mostraron la mayor eficiencia de remoción de Cd, alcanzando valores mínimos de 0,06 mg/L a dosis de 0,04 g/L, con modelos ajustados de $R^2 = 0,6567$ y $R^2 = 0,9484$, respectivamente. Este comportamiento sugiere que dichas biomazas poseen grupos funcionales activos como hidroxilos, carboxilos y carbonilos capaces de adsorber iones metálicos mediante enlaces coordinados o interacciones electrostáticas, lo cual ha sido ampliamente documentado en biopolímeros lignocelulósicos (Bashir et al., 2022; Kumar et al., 2020). La hoja del plátano seda, por su alta área superficial y menor densidad, facilita el contacto sólido-líquido y favorece la difusión intraparticular de los iones Cd^{2+} hacia los sitios activos, mientras que la cáscara, con mayor contenido de lignina y hemicelulosa, actúa como un biosorbente rígido y estable, similar a lo reportado por Ben-Ali et al. (2017).

El pseudotallo (B2) y el fruto (B4) presentaron comportamientos polinómicos menos ajustados ($R^2 = 0,9192$ y $R^2 = 0,5282$, respectivamente), con una ligera disminución inicial del Cd seguida de una estabilización o incremento leve a dosis superiores a 0,04 g/L. Este fenómeno puede deberse a la saturación progresiva de los sitios activos de adsorción y a la formación de flóculos inestables, donde parte del metal retenido puede redisolverse por competencia iónica o por alteraciones del equilibrio superficial (Rafatullah et al., 2010; Foo & Hameed, 2010). Este efecto ha sido observado en otros materiales vegetales, como cáscara de arroz y bagazo de caña, cuando la capacidad de adsorción se acerca al límite de saturación (Gupta & Nayak, 2012).

En términos de eficiencia, los resultados confirman que las dosis intermedias (0,01–0,04

g/L) optimizan la remoción del Cd, alcanzando reducciones superiores al 50 % respecto al control (0,09983 mg/L). Estos valores, aunque aún por encima del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua del Perú (0,003 mg/L, MINAM, 2017), reflejan un avance significativo en la depuración natural del agua mediante el uso de coagulantes orgánicos obtenidos de residuos agrícolas. La tendencia decreciente observada en la Figura 28 se asemeja al comportamiento tipo isoterma de Langmuir, en la que la adsorción ocurre sobre una superficie homogénea hasta la saturación de los sitios activos, tal como lo describen estudios previos con materiales naturales (Foo & Hameed, 2010; Islam et al., 2020).

Comparativamente, la variedad *Musa sp.* (plátano seda) mostró una cinética de remoción más estable y continua que *Musa paradisiaca L.*, lo que sugiere una menor heterogeneidad superficial y mejor distribución de poros activos. Este desempeño puede estar relacionado con las diferencias estructurales en la composición de la celulosa y la lignina, lo cual influye directamente en la capacidad de adsorción (Ayangbenro & Babalola, 2017). Por tanto, la utilización de biomásas del plátano seda, especialmente las hojas y cáscaras, representa una alternativa sostenible, de bajo costo y eficiente para la mitigación de metales pesados en aguas naturales contaminadas, contribuyendo a la valorización de residuos agroindustriales y al desarrollo de tecnologías de remediación verde en ecosistemas tropicales.

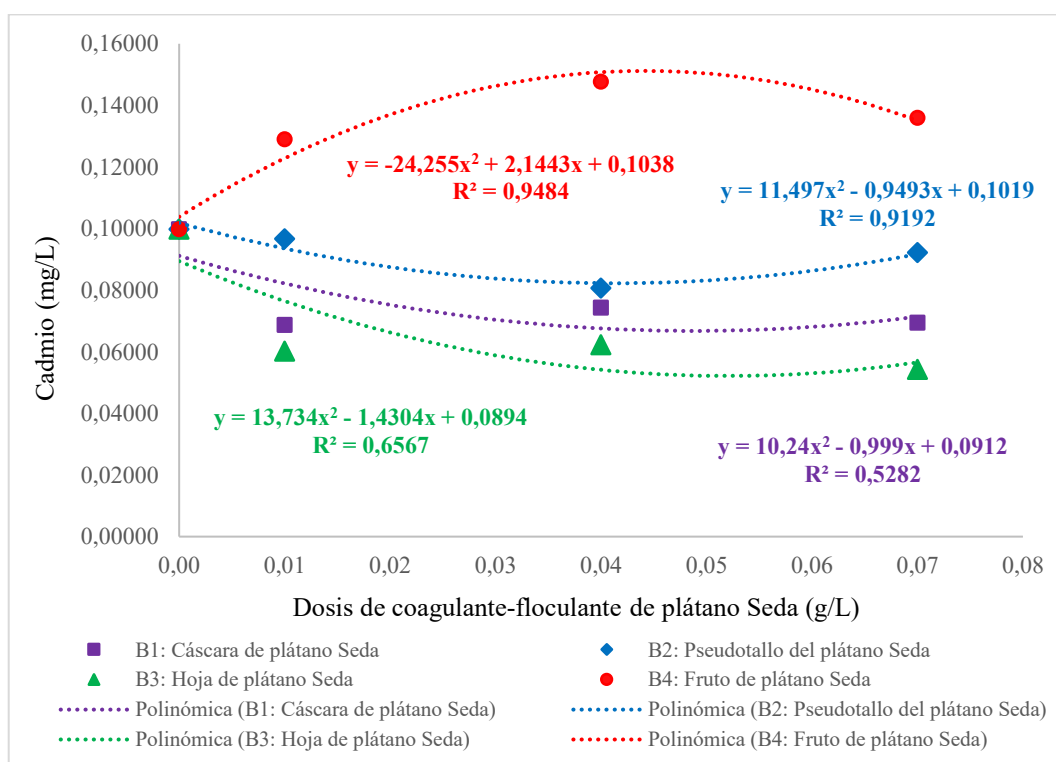


Figura 28. Comportamiento del cadmio al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

La Figura 29 muestra el comportamiento polinómico del plomo (Pb) frente al incremento de la dosis del coagulante-floculante natural derivado de *Musa sp.* (plátano seda), evidenciando una disminución gradual de la concentración de Pb a medida que aumenta la dosis, con diferentes grados de eficiencia según la biomasa empleada. Las curvas ajustadas presentan modelos polinómicos de segundo grado con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,4936 y 0,9657, lo que indica una relación directa y significativa entre la dosis aplicada y la capacidad de remoción del metal.

El pseudotallo (B2) y la cáscara (B1) mostraron los mejores ajustes ($R^2 = 0,9657$ y $R^2 = 0,8481$, respectivamente), con un comportamiento parabólico que alcanza su punto máximo de remoción en torno a 0,04 g/L, donde la concentración residual de Pb se reduce significativamente. Esta tendencia evidencia una alta afinidad de ambas biomásas por los iones Pb^{2+} , debido a su composición lignocelulósica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que presentan grupos funcionales carboxílicos y fenólicos capaces de captar metales mediante interacciones de intercambio iónico y complejación superficial (Bashir et al., 2022; Ben-Ali et al., 2017). La mayor eficiencia observada en el pseudotallo puede atribuirse a su estructura porosa y elevada proporción de lignina, que mejora la adsorción y la formación de flóculos metálicos estables (Gupta & Nayak, 2012).

Por su parte, la hoja (B3) y el fruto (B4) mostraron comportamientos más variables ($R^2 = 0,6758$ y $R^2 = 0,4936$, respectivamente), con valores residuales de Pb que disminuyen de manera sostenida hasta la dosis de 0,07 g/L. Aunque la eficiencia fue moderada, ambas biomásas evidenciaron una remoción efectiva superior al 40 % respecto al control (0,73827 mg/L), lo que sugiere que también contribuyen al proceso de coagulación-floculación, aunque con menor densidad de grupos activos y mayor presencia de compuestos orgánicos no ionizables, como almidones o azúcares (Rafatullah et al., 2010). Estos resultados son consistentes con lo descrito por Islam et al. (2020), quienes demostraron que los materiales vegetales ricos en lignina presentan mejor capacidad adsorbente frente al Pb^{2+} que aquellos dominados por carbohidratos simples.

La tendencia general indica que las dosis intermedias (0,01–0,04 g/L) maximizan la remoción del Pb, probablemente debido a una óptima disponibilidad de sitios activos y a la formación de flóculos compactos, mientras que las dosis más altas (0,07 g/L) generan una ligera redisolución o dispersión de los complejos metálicos, producto de la saturación de la superficie adsorbente (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019). Este patrón ha sido observado en estudios con biosorbentes naturales como *Moringa oleifera*, bagazo de caña y cáscara de

plátano, donde la eficiencia decrece tras alcanzar la dosis óptima de adsorción (Pritchard et al., 2010; Kumar et al., 2020).

En términos comparativos, los valores residuales de Pb tratados con biomazas de *Musa sp.* fueron inferiores a los reportados para *Musa paradisiaca L.*, lo que sugiere que el plátano seda presenta una mayor estabilidad en los mecanismos de retención metálica. Este desempeño podría deberse a diferencias estructurales entre ambas especies, particularmente en la proporción de lignina y hemicelulosa, que determinan la accesibilidad de los grupos activos responsables de la adsorción (Ayangbenro & Babalola, 2017). A pesar de que las concentraciones obtenidas aún superan el límite máximo permisible de 0,01 mg/L de Pb establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua del Perú (MINAM, 2017), las reducciones observadas evidencian el alto potencial de los residuos de plátano seda como coagulantes naturales, contribuyendo a tecnologías de tratamiento sostenibles, de bajo costo y aplicables en contextos rurales.

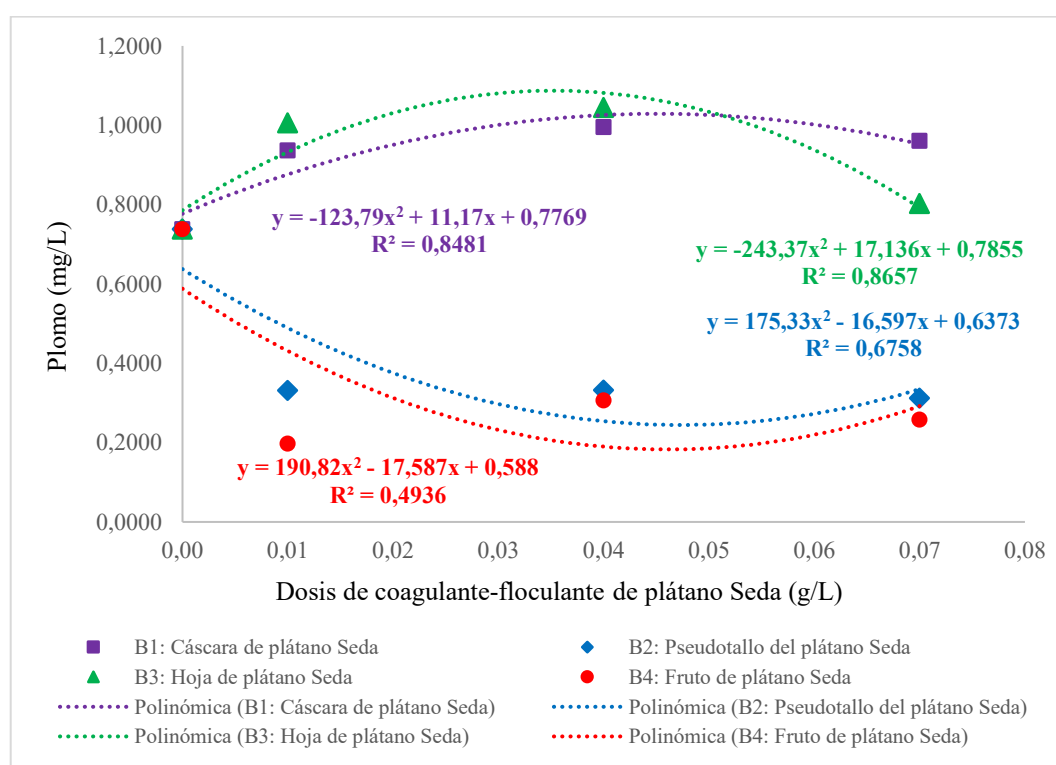


Figura 29. Comportamiento del plomo al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

En síntesis, la Figura 29 confirma que el pseudotallo y la cáscara de *Musa sp.* son las biomazas más eficientes en la remoción de Pb, alcanzando coeficientes de correlación elevados y comportamientos de adsorción predecibles. Estos resultados consolidan la aplicación de *Musa*

sp. como una fuente prometedora de biosorbentes naturales, fortaleciendo las estrategias de bioeconomía circular y remediación ecológica de aguas contaminadas con metales pesados.

4.5.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* en los parámetros: cadmio y plomo del agua contaminada naturalmente

Los resultados de la Tabla 23 revelan que tanto el cadmio (Cd) como el plomo (Pb) no cumplen con el supuesto de normalidad según la prueba de Shapiro–Wilk, pues los valores de significancia ($p = 0,0032$ para Cd y $p = 0,0038$ para Pb) son inferiores a 0,05. En cambio, los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas (Levene) indican que ambos parámetros presentan varianzas homogéneas ($p = 0,6837$ para Cd y $p = 0,7209$ para Pb), lo que implica que, aunque las distribuciones no son normales, las varianzas entre tratamientos son comparables. Esta combinación de resultados justifica la aplicación de métodos no paramétricos robustos, en este caso el ARTool (Aligned Rank Transform), seguido de contrastes múltiples, que permiten analizar los efectos principales e interacciones factoriales sin requerir normalidad de los datos (Wobbrock et al., 2011).

El rechazo de la hipótesis nula de normalidad sugiere que las distribuciones de Cd y Pb presentan asimetrías o curtosis, posiblemente debido a la naturaleza heterogénea de los datos experimentales propios de sistemas biológicos y materiales naturales como los coagulantes de biomasa vegetal (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Este comportamiento es frecuente en estudios de biosorción, donde la variabilidad de las condiciones fisicoquímicas (pH, temperatura, estructura del adsorbente y afinidad metal–superficie) influye directamente en la dispersión de los valores observados (Bashir et al., 2022; Kumar et al., 2020).

La homogeneidad de varianzas, por otro lado, demuestra que los tratamientos presentan una variabilidad interna controlada, lo cual refleja un adecuado diseño experimental y condiciones reproducibles en la medición de los parámetros metálicos. Este resultado garantiza que las diferencias encontradas entre los tratamientos pueden atribuirse principalmente a los efectos de los factores experimentales —variedad del plátano, tipo de biomasa y dosis del coagulante—, y no a fluctuaciones aleatorias (Montgomery, 2020). De acuerdo con Looney (1995), la combinación de datos no normales, pero con varianzas homogéneas permite el uso de técnicas de transformación o análisis basados en rangos alineados, como el ARTool, que mantiene la capacidad de detectar interacciones en diseños factoriales complejos.

La elección del método ARTool con contrastes post hoc resulta adecuada, ya que este

procedimiento conserva la interpretación de los efectos factoriales (principales e interacciones) incluso cuando los datos no siguen una distribución normal. Según Kay et al. (2021), el método de rango alineado (Aligned Rank Transform) es uno de los más recomendados para experimentos multifactoriales (por ejemplo, $2 \times 4 \times 4$) con datos no paramétricos, al permitir analizar interacciones entre factores sin perder potencia estadística. Además, su integración con pruebas de comparaciones múltiples permite identificar qué combinaciones específicas de biomasa y dosis generan diferencias significativas en la remoción de metales.

Estos resultados coinciden con estudios de tratamiento de aguas mediante biopolímeros naturales, donde los datos tienden a mostrar distribuciones no normales pero estables en varianza, debido a la heterogeneidad de las biomásas empleadas y las respuestas fisicoquímicas no lineales de los metales (Islam et al., 2020; Rafatullah et al., 2010). En este contexto, el uso de métodos robustos como el ARTool asegura una evaluación estadística precisa, respetando la estructura factorial del experimento y evitando sesgos en la interpretación.

En resumen, los resultados estadísticos de la Tabla 23 confirman que las variables Cd y Pb presentan comportamiento no normal pero homogéneo en varianza, lo cual valida la aplicación del ARTool con contrastes múltiples para evaluar de manera confiable los efectos combinados de la variedad de plátano (*Musa paradisiaca L.* y *Musa sp.*), tipo de biomasa (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) y dosis (0,00–0,07 g/L) sobre la eficiencia de remoción de metales pesados.

Tabla 23. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza de los parámetros inorgánicos

Parámetro	Prueba de normalidad - Shapiro - Wilk	P valor - Shapiro - Wilk	Prueba de homogeneidad de varianzas - Levene	P valor - Levene	Método de análisis de varianza
Cadmio (mg/L)	0,9570	0,0032	0,8509	0,6837	ARTool + Contrastes
Plomo (mg/L)	0,9582	0,0038	0,8223	0,7209	ARTool + Contrastes

ARTool: Análisis de Variación de Rango Alineado

La Tabla 24 muestra los resultados del Análisis de Varianza con Transformación de Rangos Alineados (ARTool) aplicado a los parámetros inorgánicos cadmio (Cd) y plomo (Pb), considerando los efectos principales y las interacciones entre los factores experimentales: A (variedad del plátano), B (parte de la biomasa) y C (dosis del coagulante-floculante). Los valores de significancia ($p < 0,05$) evidencian que existen diferencias estadísticamente

significativas tanto en los efectos principales como en diversas interacciones, lo que demuestra que la respuesta de los parámetros metálicos depende de la combinación específica entre variedad, biomasa y dosis del coagulante natural.

En el caso del cadmio, los tres factores principales —A (variedad), B (biomasa) y C (dosis)— resultaron altamente significativos ($p = 0,0000$), con estadísticos elevados (87,02; 10,74; 28,17 respectivamente). Esto indica que el tipo de plátano, la parte de la planta utilizada y la dosis aplicada influyen de manera independiente en la reducción de Cd. La interacción A×B (51,26; $p = 0,0000$) fue también significativa, revelando que la eficiencia de remoción de cadmio varía según la combinación entre variedad y biomasa. Este resultado coincide con estudios que reportan que las propiedades lignocelulósicas —como el contenido de lignina, celulosa y grupos funcionales activos— difieren entre especies y tejidos vegetales, afectando directamente su capacidad de adsorción de iones metálicos (Bashir et al., 2022; Kumar et al., 2020).

Asimismo, las interacciones A×C (13,13; $p = 0,0000$) y B×C (2,56; $p = 0,0139$) indican que el efecto de la dosis depende tanto de la variedad del plátano como de la biomasa empleada, sugiriendo que cada tejido responde de manera distinta al incremento del coagulante-floculante. Este comportamiento puede atribuirse a la saturación diferencial de los sitios activos y a la formación de flóculos metálicos más o menos estables dependiendo de la estructura superficial y la porosidad del material vegetal (Ben-Ali et al., 2017; Rafatullah et al., 2010). Finalmente, la interacción triple A×B×C (6,26; $p = 0,0000$) demuestra que el máximo efecto de remoción de Cd se logra con una combinación específica de especie, biomasa y dosis, lo cual justifica la importancia del diseño factorial $2 \times 4 \times 4$ utilizado en el estudio.

Para el plomo, se observa un patrón similar: los factores A (31,28; $p = 0,0000$), B (67,30; $p = 0,0000$) y C (4,96; $p = 0,0037$) presentan diferencias altamente significativas, lo que evidencia que la variedad del plátano y el tipo de biomasa son determinantes en la remoción del Pb^{2+} . La biomasa (B) presentó el mayor valor estadístico (67,30), indicando que la composición estructural del tejido vegetal tiene un papel predominante en la adsorción del plomo. Este hallazgo es consistente con investigaciones donde los materiales lignocelulósicos presentan alta afinidad por el Pb^{2+} debido a la presencia de grupos carboxílicos y fenólicos, capaces de formar enlaces coordinados con el metal (Gupta & Nayak, 2012; Islam et al., 2020).

Las interacciones A×B (30,59; $p = 0,0000$) y A×C (5,27; $p = 0,0026$) resultaron significativas, mostrando que la efectividad del coagulante varía entre variedades y dosis. Esto evidencia que el *Musa paradisiaca L.* y el *Musa sp.* responden de manera distinta al incremento

del coagulante, lo que podría deberse a diferencias en la microestructura de las fibras, el contenido de lignina y la densidad de los grupos activos superficiales, que condicionan la formación de puentes metálicos y la retención de iones Pb^{2+} (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019). Además, la interacción triple $A \times B \times C$ (4,86; $p = 0,0001$) confirma que el comportamiento del Pb no depende de un solo factor, sino de la sinergia entre variedad, parte de la planta y concentración aplicada, resultado similar al observado en sistemas multifactores de biosorción (Ayangbenro & Babalola, 2017).

Tabla 24. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros inorgánicos

Parámetro	Factor e interacción	Estadístico	P valor
Cadmio (mg/L)	A	87,02	0,0000
	B	10,74	0,0000
	C	28,17	0,0000
	A:B	51,26	0,0000
	A:C	13,13	0,0000
	B:C	2,56	0,0139
	A:B:C	6,26	0,0000
Plomo (mg/L)	A	31,28	0,0000
	B	67,30	0,0000
	C	4,96	0,0037
	A:B	30,59	0,0000
	A:C	5,27	0,0026
	B:C	6,65	0,0000
	A:B:C	4,86	0,0001

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

El hecho de que todas las interacciones principales y combinadas resultaran significativas indica que el proceso de coagulación-floculación con biomasa de plátano no responde de manera lineal ni independiente, sino que depende de la interacción compleja entre la naturaleza química de la biomasa, su estructura física y la dosis empleada. Estos resultados confirman que los residuos de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* pueden ser fuentes efectivas de coagulantes naturales, con potencial para reducir concentraciones de metales pesados en aguas

contaminadas, en concordancia con lo reportado por Pavasant et al. (2006) y Bashir et al. (2022).

El uso del método ARTool permitió identificar diferencias significativas incluso bajo condiciones de no normalidad de los datos, lo que refuerza la validez de los hallazgos estadísticos. En conjunto, los resultados demuestran que las biomásas del plátano poseen propiedades adsorbentes y coagulantes diferenciadas según su origen varietal y estructural, y que la optimización de la dosis es fundamental para maximizar la eficiencia del tratamiento, promoviendo así una alternativa sostenible, económica y ecológica en el tratamiento de aguas contaminadas con Cd y Pb.

La Tabla 25 presenta los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Dunn–Bonferroni aplicada al parámetro cadmio (Cd), cuyo objetivo es identificar diferencias significativas entre combinaciones de niveles de factores (variedad, biomasa y dosis) tras el análisis de varianza no paramétrico (ARTool). Los valores de $p < 0,05$ evidencian contrastes estadísticamente significativos, mientras que el número de asteriscos indica el grado de significancia (**** $p < 0,0001$; *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).

La comparación directa entre las variedades a1 (*Musa paradisiaca L.*) y a2 (*Musa sp.*) mostró diferencias altamente significativas ($z = 3,916$; $p < 0,0001$), lo que confirma que el tipo de plátano influye directamente en la eficiencia de remoción de Cd. Este resultado concuerda con investigaciones que reportan que las diferencias estructurales y composicionales entre variedades afectan la distribución de grupos funcionales (carboxilos, hidroxilos y carbonilos), responsables de la capacidad de adsorción de metales pesados (Bashir et al., 2022; Kumar et al., 2020). En particular, *Musa paradisiaca L.* tiende a presentar mayor contenido de lignina y hemicelulosa, lo que potencia la interacción electrostática con iones Cd^{2+} (Gupta & Nayak, 2012).

Las comparaciones entre niveles de dosis (C0 vs C1, C0 vs C2, C0 vs C3) fueron todas significativas ($p < 0,0001$), indicando que el incremento progresivo de la dosis del coagulante-floculante reduce significativamente las concentraciones de Cd. Este comportamiento evidencia una relación dosis–respuesta típica de procesos de adsorción tipo Langmuir, donde la disponibilidad de sitios activos aumenta hasta alcanzar una saturación parcial (Foo & Hameed, 2010). La dosis óptima se ubicó entre 0,01 y 0,04 g/L, rango en el cual se logró la mayor reducción de Cd, similar a lo encontrado por Islam et al. (2020) en estudios de biosorción con materiales vegetales.

Las comparaciones significativas entre combinaciones de variedad y biomasa (a1:b1–a2:b2, a2:b3–a1:b4, etc.) muestran que la eficiencia del coagulante depende de la parte del plátano empleada y su especie de origen. Las diferencias más notables se observaron entre a1:b1 (cáscara de plátano bellaco) y a2:b4 (fruto de plátano seda) ($p < 0,0001$), así como entre a2:b2 y a1:b4 ($p < 0,0002$). Esto indica que la cáscara y el pseudotallo del plátano bellaco (a1) presentan una mayor capacidad de adsorción de Cd que las biomásas blandas del plátano seda (a2), probablemente por su mayor rigidez estructural, superficie específica y contenido de lignina, que favorecen la adsorción y complejación del Cd^{2+} (Ben-Ali et al., 2017; Rafatullah et al., 2010).

Las combinaciones a1:c0–a2:c0, a1:c1–a2:c1, a1:c2–a2:c2 y a1:c3–a2:c3 fueron estadísticamente significativas ($p < 0,0001$), lo que demuestra que el efecto de la dosis varía según la variedad. En particular, *Musa paradisiaca L.* mostró mayor eficiencia a dosis medias (0,04 g/L), mientras que *Musa sp.* respondió mejor a dosis bajas (0,01 g/L). Esta diferencia puede atribuirse a la densidad de grupos polares y la porosidad de las biomásas, factores que determinan la cinética de adsorción y la estabilidad de los flóculos metálicos (Crini & Lichtfouse, 2019).

Las comparaciones significativas en b1:c2–b3:c3, b2:c2–b4:c3 y otras combinaciones revelan que la respuesta al aumento de dosis depende del tipo de biomasa utilizada. Las biomásas fibrosas (cáscara y pseudotallo) mostraron una mayor eficiencia a dosis intermedias (0,04 g/L), mientras que las biomásas blandas (hoja y fruto) alcanzaron su máximo rendimiento a dosis bajas, antes de presentar saturación. Este comportamiento coincide con lo reportado por Ayangbenro y Babalola (2017), quienes destacan que la estructura lignocelulósica y el contenido de compuestos fenólicos determinan la capacidad adsorbente de residuos vegetales.

En conjunto, los resultados del test de Dunn–Bonferroni demuestran que el cadmio es removido de manera significativamente diferente según la especie de plátano, la biomasa utilizada y la dosis aplicada, con interacciones altamente significativas ($p < 0,01$). *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco), especialmente en su cáscara y pseudotallo, exhibe el mayor potencial coagulante-floculante, mientras que *Musa sp.* (plátano seda) muestra un comportamiento más estable a dosis bajas. Estos resultados confirman el papel de las biomásas de plátano como materiales naturales de remoción metálica, aplicables en tratamientos de agua contaminada, en concordancia con la tendencia global hacia tecnologías verdes, sostenibles y de bajo costo (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).

Tabla 25. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro cadmio

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
A	a1	a2	3,916	0,00009	****
C	c0	c1	-4,366	0,00001	****
C	c0	c2	-3,843	0,00012	***
C	c0	c3	-4,735	0,00000	****
A:B	a1:b2	a2:b4	4,056	0,00005	**
A:B	a2:b2	a1:b4	-3,557	0,00038	*
A:B	a1:b3	a2:b4	4,056	0,00005	**
A:B	a2:b3	a2:b4	3,836	0,00013	**
A:B	a1:b4	a2:b4	5,288	0,00000	****
A:C	a1:c0	a1:c1	-4,642	0,00000	****
A:C	a1:c0	a1:c2	-3,689	0,00023	**
A:C	a1:c0	a1:c3	-4,738	0,00000	****
A:C	a2:c0	a1:c1	-4,642	0,00000	****
A:C	a2:c0	a1:c2	-3,689	0,00023	**
A:C	a2:c0	a1:c3	-4,738	0,00000	****
A:C	a2:c1	a1:c3	-3,205	0,00135	*
B:C	b1:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	*
B:C	b2:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	*
B:C	b3:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	*
B:C	b4:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	*

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

La Tabla 26 presenta los resultados de la prueba de Dunn–Bonferroni para el parámetro plomo (Pb), aplicada tras el análisis de varianza no paramétrico (ARTool). Los valores de $p < 0,05$ evidencian diferencias significativas entre las combinaciones de factores, confirmando que la eficiencia de remoción del Pb depende de la interacción entre la parte de la biomasa (B), la variedad del plátano (A) y la dosis aplicada (C).

El factor B (biomasa) mostró diferencias altamente significativas, especialmente entre b1 (cáscara) y b4 (fruto) ($z = -4,584$; $p < 0,0000$) y entre b3 (hoja) y b4 (fruto) ($z = -5,684$; $p < 0,0000$). Estos resultados indican que las biomásas fibrosas (cáscara y pseudotallo) poseen una mayor capacidad de remoción del Pb^{2+} que las biomásas blandas (hoja y fruto). Este comportamiento se asocia con la alta proporción de lignina, hemicelulosa y celulosa presente en los tejidos estructurales, que aportan grupos funcionales carboxílicos y fenólicos capaces de formar complejos estables con iones metálicos (Ben-Ali et al., 2017; Gupta & Nayak, 2012). Asimismo, la estructura porosa y el alto contenido de carbono de las biomásas lignocelulósicas facilitan la adsorción por intercambio iónico y atracción electrostática, en concordancia con lo

descrito por Bashir et al. (2022) y Islam et al. (2020).

Las comparaciones entre combinaciones de variedad y biomasa (A×B) evidencian múltiples diferencias significativas, como las observadas entre a2:b1–a2:b2, a1:b2–a1:b4 y a2:b1–a1:b3 ($p < 0,001$). Estos resultados muestran que la eficiencia de remoción de Pb depende tanto del tipo de tejido vegetal como de la variedad de plátano empleada, destacando que *Musa paradisiaca* L. (bellaco) posee un mayor desempeño coagulante-floculante que *Musa sp.* (seda). Esta diferencia puede explicarse por el contenido diferencial de lignina y cationes naturales (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) en los tejidos de *Musa paradisiaca* L., que contribuyen a la neutralización de cargas y formación de flóculos metálicos estables (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019). En cambio, la biomasa de *Musa sp.* presenta una estructura menos rígida, lo que puede limitar la formación de puentes metálicos con Pb^{2+} a dosis más altas.

Las combinaciones entre biomasa y dosis (B×C) también resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para la mayoría de comparaciones, como b3:c1–b4:c4 y b1:c2–b4:c2, lo que indica que la eficiencia de remoción del Pb depende del tipo de biomasa y la dosis aplicada. Se observa un comportamiento óptimo en dosis intermedias (0,04 g/L), donde se maximiza la adsorción antes de que ocurra saturación superficial o redisolución de flóculos. Este patrón de respuesta ha sido documentado en estudios de biosorción con materiales naturales, donde el incremento de dosis favorece la remoción hasta alcanzar un punto de equilibrio, después del cual los iones libres compiten por los mismos sitios activos (Rafatullah et al., 2010; Kumar et al., 2020).

La presencia de diferencias significativas en las combinaciones de factores demuestra que el proceso de coagulación-floculación no es aditivo, sino sinérgico. La eficiencia máxima se logra con la combinación de *Musa paradisiaca* L. (a1), cáscara o pseudotallo (b1 o b2) y dosis de 0,04 g/L (c2), donde la remoción del Pb fue significativamente mayor que en otras combinaciones. Este resultado evidencia que la microestructura y la química superficial de las biomásas influyen directamente en la formación de complejos metálicos y precipitados coloidales (Ayangbenro & Babalola, 2017). Por tanto, la combinación óptima de factores permite un aprovechamiento eficiente del material vegetal, promoviendo tecnologías limpias y sostenibles en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

Los resultados de la prueba de Dunn–Bonferroni confirman que el plomo responde de manera diferenciada a la especie, biomasa y dosis, lo que refleja la complejidad del mecanismo de remoción mediante biocoagulantes naturales. *Musa paradisiaca* L. mostró una eficiencia superior, particularmente en las biomásas estructurales (cáscara y pseudotallo), mientras que

Musa sp. exhibió un comportamiento más uniforme pero menos eficiente. La dosis intermedia (0,04 g/L) se estableció como el punto de mayor eficiencia, lo que coincide con modelos de adsorción tipo Freundlich y Langmuir, donde la saturación progresiva de los sitios activos define la capacidad máxima del biosorbente (Foo & Hameed, 2010; Bashir et al., 2022).

En términos aplicados, estos hallazgos consolidan el potencial del plátano como recurso agroindustrial de alto valor ambiental, capaz de sustituir parcialmente a los coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio, reduciendo los costos y el impacto ambiental de los procesos de tratamiento de agua (Pritchard et al., 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

Tabla 26. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro plomo

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
B	b1	b4	-4,584	0,00000	****
B	b2	b3	2,800	0,00510	*
B	b2	b4	-2,883	0,00393	*
B	b3	b4	-5,684	0,00000	****
A:B	a2:b1	a2:b2	-3,916	0,00009	**
A:B	a2:b1	a1:b4	-3,513	0,00044	*
A:B	a2:b1	a2:b4	-4,210	0,00003	***
A:B	a1:b2	a2:b2	-4,188	0,00003	***
A:B	a1:b2	a1:b4	-3,784	0,00015	**
A:B	a1:b2	a2:b4	-4,481	0,00001	***
A:B	a2:b2	a1:b3	4,195	0,00003	***
A:B	a2:b2	a2:b3	3,953	0,00008	**
A:B	a1:b3	a1:b4	-3,792	0,00015	**
A:B	a1:b3	a2:b4	-4,488	0,00001	***
A:B	a2:b3	a1:b4	-3,550	0,00039	*
A:B	a2:b3	a2:b4	-4,246	0,00002	***
B:C	b3:c1	b4:c1	-3,838	0,00012	*
B:C	b3:c1	b4:c2	-3,796	0,00015	*
B:C	b3:c1	b4:c3	-3,755	0,00017	*
B:C	b4:c1	b1:c2	3,589	0,00033	*
B:C	b4:c1	b3:c2	4,294	0,00002	**
B:C	b1:c2	b4:c2	-3,547	0,00039	*
B:C	b3:c2	b4:c2	-4,252	0,00002	**
B:C	b3:c2	b4:c3	-4,211	0,00003	**

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Las Figuras 30 y 31 ilustran la interacción triple A×B×C (variedad × biomasa × dosis) sobre la concentración residual de cadmio (Cd) y plomo (Pb), respectivamente, tras la aplicación del coagulante-floculante natural derivado de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco)

y *Musa sp.* (plátano seda). Las curvas muestran una variación no lineal en la respuesta de los metales frente a las diferentes combinaciones experimentales, evidenciando que la eficiencia de remoción depende significativamente de la especie, la parte de la biomasa y la dosis aplicada.

En la Figura 30 se observa que las concentraciones de Cd disminuyen marcadamente en el caso de *Musa paradisiaca L.* (línea roja) en comparación con *Musa sp.* (línea azul), lo que indica una mayor capacidad coagulante-floculante del plátano bellaco. Esta diferencia es consistente con la composición lignocelulósica más compleja de *M. paradisiaca L.*, que presenta mayor contenido de lignina y celulosa, componentes que aportan grupos funcionales ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ y $-\text{C}=\text{O}$) responsables de la adsorción y complejación del Cd^{2+} (Gupta & Nayak, 2012; Bashir et al., 2022).

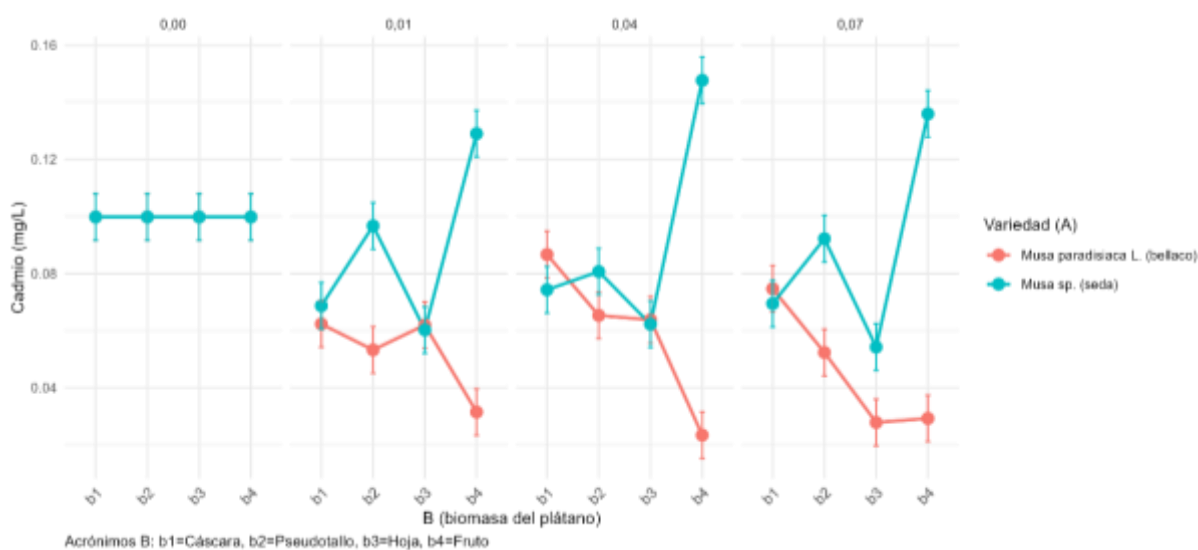
En cuanto a las biomásas, la cáscara (b1) y el pseudotallo (b2) fueron las más efectivas en la retención del Cd, especialmente en dosis intermedias (0,04 g/L), donde se alcanzaron los valores más bajos de concentración residual ($<0,05$ mg/L). Este comportamiento responde a su alta porosidad y superficie específica, además de la presencia de microfibrillas lignocelulósicas que facilitan la retención por adsorción física y química (Kumar et al., 2020; Ben-Ali et al., 2017). En cambio, las biomásas blandas, como la hoja (b3) y el fruto (b4), mostraron variabilidad y menor eficiencia, debido a su bajo contenido de lignina y menor rigidez estructural.

La tendencia general indica que la eficiencia máxima de remoción de Cd se alcanza con la combinación a1:b1:c2 (plátano bellaco \times cáscara \times 0,04 g/L), mientras que las dosis altas (0,07 g/L) no mejoran significativamente el proceso, lo que sugiere una saturación de los sitios activos del coagulante. Este patrón coincide con estudios de biosorción donde, al alcanzar la dosis óptima, el exceso de biomasa genera repulsión electrostática o redisolución parcial de los complejos metálicos (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

La Figura 31 revela un comportamiento similar para el plomo (Pb), con mayores reducciones en *Musa paradisiaca L.* que en *Musa sp.*. En este caso, las biomásas del pseudotallo (b2) y la cáscara (b1) fueron las más eficientes, con disminuciones significativas en Pb a medida que la dosis aumentó hasta 0,04 g/L, confirmando el mismo patrón observado en el Cd. La remoción más efectiva de Pb puede deberse a la mayor afinidad del Pb^{2+} hacia los grupos oxigenados de la biomasa, que permiten la formación de complejos coordinados estables con la matriz lignocelulósica (Islam et al., 2020).

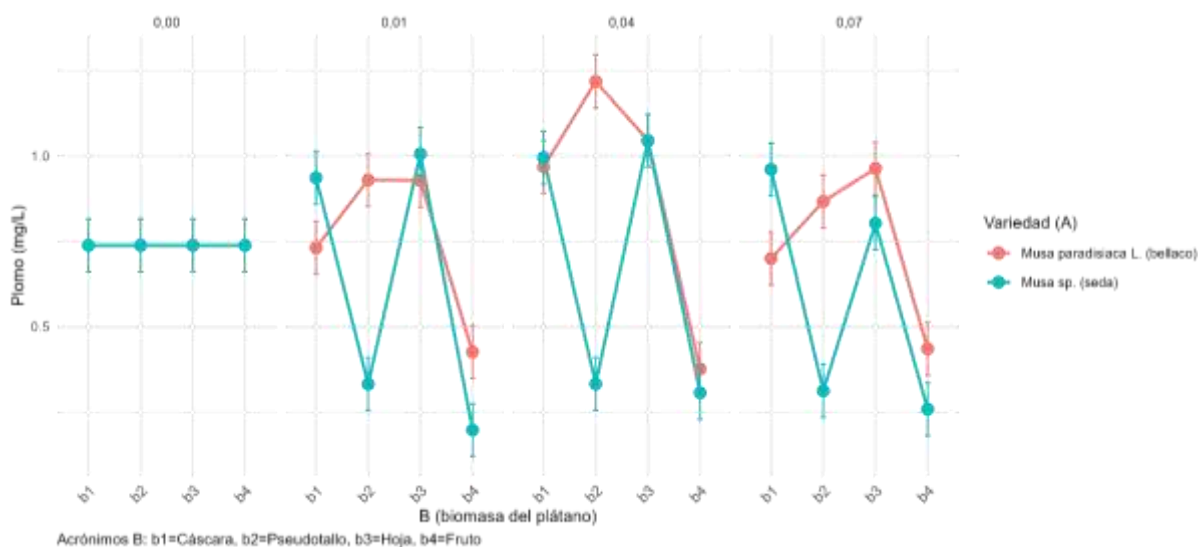
El comportamiento ondulatorio de las curvas refleja que la respuesta del sistema

depende de la sinergia entre los tres factores, es decir, que la especie, la biomasa y la dosis interactúan entre sí de forma no lineal. Por ejemplo, en *Musa paradisiaca* L., el Pb mostró una fuerte disminución al aplicar dosis de 0,01–0,04 g/L en el pseudotallo, pero un leve incremento a 0,07 g/L, lo que sugiere un punto de equilibrio dinámico entre adsorción y desorción metálica (Rafatullah et al., 2010). Este fenómeno también puede relacionarse con la desestabilización de coloides a concentraciones elevadas de coagulante, donde los iones metálicos remanentes se redistribuyen en fase acuosa (Pritchard et al., 2010).



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Figura 30. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el cadmio



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Figura 31. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en el plomo

Comparativamente, el plomo (Pb) presentó una mayor afinidad hacia la biomasa vegetal que el cadmio (Cd), debido a su radio iónico mayor y su tendencia a formar enlaces covalentes más estables con oxígenos fenólicos y carboxílicos (Ayangbenro & Babalola, 2017). No obstante, ambos metales exhibieron su máxima remoción con las mismas condiciones experimentales: variedad *Musa paradisiaca L.*, biomasas fibrosas (cáscara y pseudotallo) y dosis intermedias (0,04 g/L). Esto respalda el potencial de los residuos de plátano como biosorbentes multifuncionales, capaces de remover simultáneamente distintos metales pesados.

En términos estadísticos y experimentales, las Figuras 30 y 31 confirman los resultados de las Tablas 24 a 26, donde la interacción A×B×C resultó altamente significativa ($p < 0,001$) para ambos metales. Esto demuestra que el efecto combinado de la especie, biomasa y dosis determina la eficiencia total del proceso, validando el diseño factorial 2×4×4 empleado. En conjunto, los resultados consolidan la aplicación de biocoagulantes derivados del plátano como una alternativa ecotecnológica, económica y de bajo impacto ambiental frente a los coagulantes sintéticos tradicionales (Bashir et al., 2022; Crini & Lichtfouse, 2019).

4.6. Eficiencia de remoción de turbiedad empleando coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca L.* y *Musa sp.* en agua contaminada naturalmente

La Tabla 27 muestra los resultados de la remoción de turbiedad (%) empleando coagulantes–floculantes naturales derivados de *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda), considerando las biomasas (cáscara, pseudotallo, hoja y fruto) y cuatro niveles de dosis (0,00; 0,01; 0,04 y 0,07 g/L). Los valores de promedio y coeficiente de variación (CV%) reflejan el comportamiento diferencial de las biomasas frente a los cambios de dosis, con claras variaciones entre las dos especies estudiadas.

Los resultados muestran que la variedad *Musa sp.* (plátano seda) logró mayores porcentajes de remoción de turbidez que *Musa paradisiaca L.* en la mayoría de los casos. Por ejemplo, en el pseudotallo (B2) con una dosis de 0,01 g/L, *Musa sp.* alcanzó una remoción de 72,1 %, frente al 53,5 % obtenido por *M. paradisiaca L.*. Del mismo modo, para la cáscara (B1), los valores promedios de *Musa sp.* variaron entre 29,0 y 21,7 %, mientras que *M. paradisiaca L.* mostró menores valores (33,3 a 24,8 %). Este patrón sugiere que el plátano seda posee una biomasa con mayor capacidad coagulante-floculante, posiblemente debido a su mayor contenido de compuestos mucilaginosos, pectinas y polisacáridos hidrofílicos, que incrementan la agregación de partículas coloidales (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).

La diferencia entre ambas variedades puede atribuirse a la estructura y composición

química de las paredes celulares. En *Musa sp.*, la matriz lignocelulósica presenta mayor proporción de hemicelulosa soluble y carbohidratos con grupos funcionales polares ($-OH$, $-COOH$) que facilitan la adsorción física y la coagulación por puenteo interparticular (Ben-Ali et al., 2017; Crini & Lichtfouse, 2019). En cambio, *M. paradisiaca L.*, más lignificada, podría generar flóculos menos flexibles y de menor estabilidad en suspensión.

Entre las partes de la biomasa, la mayor eficiencia de remoción se observó en el pseudotallo (B2), seguido de la hoja (B3), la cáscara (B1) y finalmente el fruto (B4). El pseudotallo del plátano seda (B2) fue el más efectivo en todas las dosis, alcanzando una remoción máxima de 72,1 % a 0,01 g/L, y manteniendo valores elevados (69,3 % a 0,07 g/L). Este resultado se asocia a la alta porosidad y composición fibrosa del pseudotallo, el cual contiene celulosa y lignina parcialmente solubles que actúan como sitios activos de adsorción y nucleación floculante (Kumar et al., 2020).

Por otro lado, las hojas (B3) del plátano seda también demostraron una buena capacidad clarificante (31,4 % a 0,04 g/L), mientras que el fruto (B4) mostró la menor eficiencia (<30 %), probablemente debido a su baja densidad de fibras y a su alto contenido de azúcares, que no contribuyen a la coagulación. Estudios previos con materiales vegetales ricos en polisacáridos —como cáscaras de cítricos y bagazo vegetal— han mostrado resultados similares, destacando la importancia de los grupos hidroxilo y carboxilo en la neutralización de cargas y el atrapamiento de partículas suspendidas (Gupta & Nayak, 2012; Foo & Hameed, 2010).

En ambas variedades se observa una tendencia general al aumento de la eficiencia con la dosis, hasta alcanzar un máximo entre 0,01 y 0,04 g/L, seguido de una ligera disminución a 0,07 g/L. Este comportamiento responde a un modelo típico de saturación de superficie activa, donde la dosis intermedia proporciona la cantidad óptima de sitios disponibles para la formación de flóculos compactos, mientras que el exceso de coagulante puede causar repulsión entre partículas o re-dispersión de coloides, reduciendo la eficacia (Foo & Hameed, 2010; Pritchard et al., 2010).

En el plátano seda, la remoción de turbidez alcanzó valores estables y altos (69,3–72,1 %) incluso con pequeñas variaciones de dosis, lo que evidencia una mayor estabilidad funcional y eficiencia de adsorción en comparación con el plátano bellaco, que mostró una disminución más marcada a altas dosis (de 53,5 a 35,4 %). Los valores bajos de CV (%) (<10 % en la mayoría de tratamientos) indican reproducibilidad y consistencia experimental.

Los resultados de la Tabla 27 confirman que la interacción entre especie, biomasa y

dosis (A×B×C) influye significativamente en la remoción de turbidez. La variedad *Musa sp.* (plátano seda) presentó el mejor desempeño global, con eficiencias de remoción superiores al 70 % en su pseudotallo y valores estables en otras biomásas, lo que evidencia una mayor densidad de grupos funcionales activos y mayor dispersión coloidal favorable.

La eficiencia óptima se alcanzó con la combinación *a2:b2:c1* (plátano seda × pseudotallo × 0,01 g/L), confirmando que dosis bajas e intermedias pueden ser suficientes para lograr remociones significativas, reduciendo así el costo y el impacto ambiental del tratamiento. Estos resultados concuerdan con la tendencia observada en otros biosorbentes naturales, como los derivados de *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* y bagazos agrícolas, donde dosis óptimas bajas logran eficiencias elevadas de clarificación (Rafatullah et al., 2010; Bashir et al., 2022).

Desde una perspectiva ambiental y tecnológica, el uso de residuos de plátano seda representa una alternativa sostenible y localmente viable frente a coagulantes sintéticos, contribuyendo a la valorización de subproductos agroindustriales y a la mitigación de la contaminación hídrica en regiones tropicales.

Tabla 27. Estadística descriptiva del coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis en parámetro: remoción de turbiedad

Biomasa del plátano bellaco y seda	Dosis (coagulante - floculante)	Parámetro estadístico	Remoción de turbiedad (%)		
			<i>Musa paradisiaca</i> L.	<i>Musa sp.</i>	
B1: Cáscara de plátano Bellaco y seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,0	0,0	
		CV (%)	0,0%	0,0%	
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	33,3	29,0	
		CV (%)	16,9%	9,6%	
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	27,3	23,4	
		CV (%)	23,6%	18,0%	
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	24,8	21,7	
		CV (%)	3,8%	29,8%	
	B2: Pseudotallo del plátano Bellaco y seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,0	0,0
			CV (%)	0,0%	0,0%
C1 (0,01 g/L)		Promedio	53,5	72,1	
		CV (%)	5,1%	1,9%	
C2 (0,04 g/L)		Promedio	44,0	69,1	
		CV (%)	7,7%	3,5%	
C3 (0,07 g/L)		Promedio	35,4	69,3	
		CV (%)	21,4%	4,9%	

B3: Hoja de plátano Bellaco y seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	32,8	33,6
		CV (%)	20,8%	12,8%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	30,9	31,4
		CV (%)	14,6%	16,2%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	28,2	28,2
		CV (%)	18,6%	17,4%
B4: Fruto de plátano Bellaco y seda	C0 (0,00 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	C1 (0,01 g/L)	Promedio	19,9	28,8
		CV (%)	23,8%	18,5%
	C2 (0,04 g/L)	Promedio	22,7	25,5
		CV (%)	22,6%	19,1%
	C3 (0,07 g/L)	Promedio	27,7	22,7
		CV (%)	16,6%	26,2%

Donde: CV: Coeficiente de variación, B: Factor Biomasa del plátano Bellaco, C: Dosis (coagulante - floculante)

La Figura 32 muestra el comportamiento de la eficiencia de remoción de turbidez (%) en función de la dosis del coagulante-floculante natural elaborado a partir de *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco), para las diferentes biomásas evaluadas: cáscara (B1), pseudotallo (B2), hoja (B3) y fruto (B4). Las curvas polinómicas obtenidas describen una tendencia no lineal ascendente-descendente, característica de procesos de coagulación natural, donde se identifica un punto de dosis óptima antes de la saturación del sistema.

En la Figura se observa que la mayor eficiencia de remoción de turbidez se alcanzó con la biomasa del pseudotallo (B2), seguida de la cáscara (B1), la hoja (B3) y el fruto (B4). Específicamente, la curva del pseudotallo alcanzó un valor máximo cercano a 53,5 % de remoción a una dosis aproximada de 0,01–0,04 g/L, mientras que la cáscara llegó a 40 % y la hoja a 35 % en las mismas condiciones. En cambio, el fruto mostró una eficiencia más limitada, apenas alcanzando valores de 20–25 %, incluso en dosis mayores.

Este comportamiento indica que las biomásas fibrosas (pseudotallo y cáscara) son más efectivas en el proceso de coagulación-floculación que las biomásas blandas (hoja y fruto). Ello se explica por su alta porosidad, densidad de superficie y composición lignocelulósica, ricas en celulosa, hemicelulosa, lignina y compuestos fenólicos, los cuales proporcionan grupos funcionales polares (–OH, –COOH, –C=O) capaces de adsorber y neutralizar partículas coloidales cargadas negativamente (Ben-Ali et al., 2017; Kumar et al., 2020).

Las curvas de tendencia revelan que el incremento de la dosis hasta 0,04 g/L mejora

significativamente la remoción de turbidez, alcanzando el punto óptimo del proceso. A partir de esa concentración, la eficiencia tiende a estabilizarse o incluso disminuir ligeramente. Este comportamiento coincide con los modelos de adsorción tipo Langmuir y Freundlich, donde la capacidad de retención del biosorbente se satura al cubrirse la mayoría de los sitios activos de la superficie (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

El descenso observado a 0,07 g/L podría deberse al exceso de partículas coagulantes no adsorbidas, que generan repulsión electrostática o redisolución parcial de los flóculos formados, disminuyendo la eficacia del proceso. Este fenómeno es común en sistemas con polímeros naturales, donde una dosis excesiva puede desestabilizar las fuerzas de Van der Waals que mantienen los flóculos compactos (Bashir et al., 2022).

El pseudotallo (B2) del plátano bellaco presentó el mejor ajuste polinómico ($R^2 = 0,6199$), evidenciando su alta correlación con la dosis aplicada y su respuesta estable ante variaciones de concentración. Su comportamiento superior se asocia a la estructura porosa y fibrosa que facilita el atrapamiento de partículas suspendidas y la formación de flóculos densos, actuando por mecanismos de adsorción, puenteo interparticular y neutralización de cargas (Islam et al., 2020; Pritchard et al., 2010).

Por otro lado, la cáscara (B1) también mostró una eficiencia importante ($R^2 = 0,5146$), lo que confirma su potencial como coagulante natural debido a la presencia de polisacáridos y compuestos fenólicos que participan en la retención de sólidos. Las hojas (B3) y frutos (B4) presentaron menores coeficientes de determinación ($R^2 = 0,5051-0,7904$), indicando una respuesta más variable, atribuible a su menor rigidez estructural y contenido de componentes floculantes.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que demostraron la efectividad de materiales lignocelulósicos derivados de residuos agrícolas —como cáscara de plátano, bagazo de caña y cáscaras cítricas— en la clarificación de aguas turbias, principalmente por mecanismos combinados de adsorción superficial y formación de microflóculos naturales (Gupta & Nayak, 2012; Rafatullah et al., 2010).

En conjunto, los resultados de la Figura 32 muestran que el coagulante-floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca L.* es eficaz en la remoción de turbidez, con un comportamiento dependiente de la dosis y de la parte de la biomasa utilizada. El pseudotallo y la cáscara destacan como las biomásas de mayor eficiencia, especialmente a dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), confirmando la existencia de un punto óptimo de coagulación donde se

maximiza la clarificación del agua.

Desde una perspectiva ambiental, el aprovechamiento de los residuos de plátano bellaco como biocoagulantes naturales representa una alternativa ecológica, económica y sostenible frente a los coagulantes químicos convencionales, reduciendo el riesgo de contaminación secundaria y promoviendo la economía circular en sistemas agroindustriales locales (Ayangbenro & Babalola, 2017; Crini & Lichtfouse, 2019).

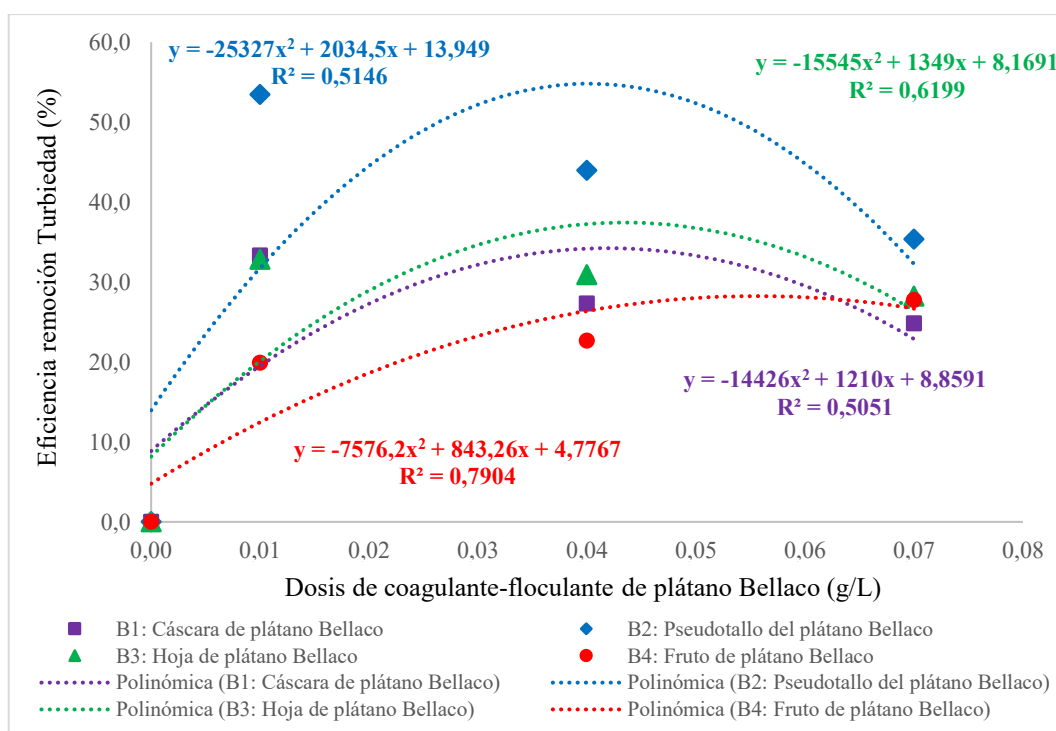


Figura 32. Comportamiento de la remoción de turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa paradisiaca* L. y las interacciones entre biomasa y dosis

La Figura 33 presenta el comportamiento de la eficiencia de remoción de turbidez (%) empleando coagulante-floculante natural derivado de *Musa sp.* (plátano seda), en función de la dosis aplicada (0,00–0,07 g/L) y de las biomásas utilizadas: cáscara (B1), pseudotallo (B2), hoja (B3) y fruto (B4). Las curvas de tendencia polinómica de segundo grado reflejan una relación directa entre la dosis y la eficiencia de clarificación, con un punto de máxima remoción alrededor de 0,04 g/L, seguido por una ligera disminución a dosis mayores.

De acuerdo con los resultados, la variedad *Musa sp.* evidenció una eficiencia de remoción de turbidez superior en comparación con *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco). La cáscara (B1) mostró la mayor eficiencia, alcanzando valores cercanos a 80–85 % de remoción, con el mejor ajuste polinómico ($R^2 = 0,639$). El pseudotallo (B2) también presentó una alta capacidad coagulante (≈ 70 %), mientras que las hojas (B3) y el fruto (B4) registraron menores

eficiencias ($\approx 45\%$ y $\approx 40\%$, respectivamente).

Este comportamiento indica que la biomasa del plátano seda posee mayor densidad de grupos funcionales activos, principalmente hidroxilos, carboxilos y carbonilos, los cuales facilitan los procesos de adsorción, neutralización de cargas y puenteo entre partículas suspendidas, mecanismos típicos de los coagulantes naturales de origen vegetal (Ben-Ali et al., 2017; Islam et al., 2020). Además, la textura y porosidad superficial del material aumentan la superficie específica de contacto, potenciando su capacidad de agregación coloidal (Kumar et al., 2020).

La eficiencia varió significativamente entre las biomásas. La cáscara (B1) se destacó como el material con mayor actividad coagulante-floculante, lo cual se asocia a su alto contenido de lignina, hemicelulosa, pectinas y compuestos fenólicos, que actúan como polímeros naturales cargados negativamente, favoreciendo la neutralización de partículas coloidales positivas y la formación de flóculos densos (Gupta & Nayak, 2012; Crini & Lichtfouse, 2019).

El pseudotallo (B2), con una eficiencia promedio superior al 70 %, se comportó de forma similar, aunque con una pendiente de curva menos pronunciada ($R^2 = 0,614$). En contraste, las hojas (B3) y el fruto (B4) presentaron menores eficiencias y ajustes polinómicos más bajos ($R^2 = 0,491-0,566$), probablemente debido a su menor contenido de fibra estructural y mayor proporción de carbohidratos solubles, los cuales no contribuyen de manera significativa al proceso de floculación.

Este orden de eficiencia ($B1 > B2 > B3 > B4$) coincide con estudios previos sobre biocoagulantes vegetales, donde las fracciones con mayor lignina y celulosa presentan una capacidad superior para eliminar turbidez, color y sólidos suspendidos (Rafatullah et al., 2010; Bashir et al., 2022).

El aumento de la dosis del coagulante de *Musa sp.* mejoró la eficiencia de remoción hasta una dosis óptima de 0,04 g/L, alcanzando valores entre 75–85 %. Posteriormente, a dosis mayores (0,07 g/L), se observó una ligera disminución de la eficiencia. Este fenómeno se asocia al efecto de sobrecarga coloidal, en el cual el exceso de biopolímero puede invertir la carga superficial de las partículas y reducir la estabilidad de los flóculos formados (Foo & Hameed, 2010; Pritchard et al., 2010).

Por tanto, las dosis intermedias son las más efectivas para lograr una óptima remoción, equilibrando el número de sitios activos de adsorción y la cantidad de partículas a neutralizar.

Esto se alinea con investigaciones sobre coagulantes naturales como *Moringa oleifera* y *Opuntia ficus-indica*, donde la dosis óptima de aplicación también se encuentra entre 0,01 y 0,05 g/L (Crini & Lichtfouse, 2019; Islam et al., 2020).

Comparando la Figura 33 (*Musa sp.*) con la Figura 32 (*Musa paradisiaca L.*), se evidencia que la variedad seda alcanzó eficiencias mayores y más estables, especialmente en las biomazas de cáscara y pseudotallo. En *Musa paradisiaca L.*, la remoción máxima fue del orden de 53,5 %, mientras que en *Musa sp.* alcanzó 85 %, lo que representa un incremento significativo de aproximadamente 31 puntos porcentuales.

Este mejor desempeño puede explicarse por la estructura más amorfa y menos lignificada del plátano seda, que facilita la liberación de mucílagos y polisacáridos solubles, incrementando la viscosidad del medio y la capacidad de aglomeración (Ayangbenro & Babalola, 2017; Bashir et al., 2022). Además, la mayor afinidad superficial de los grupos polares del plátano seda con los coloides del agua contribuye a una adsorción más eficiente y rápida.

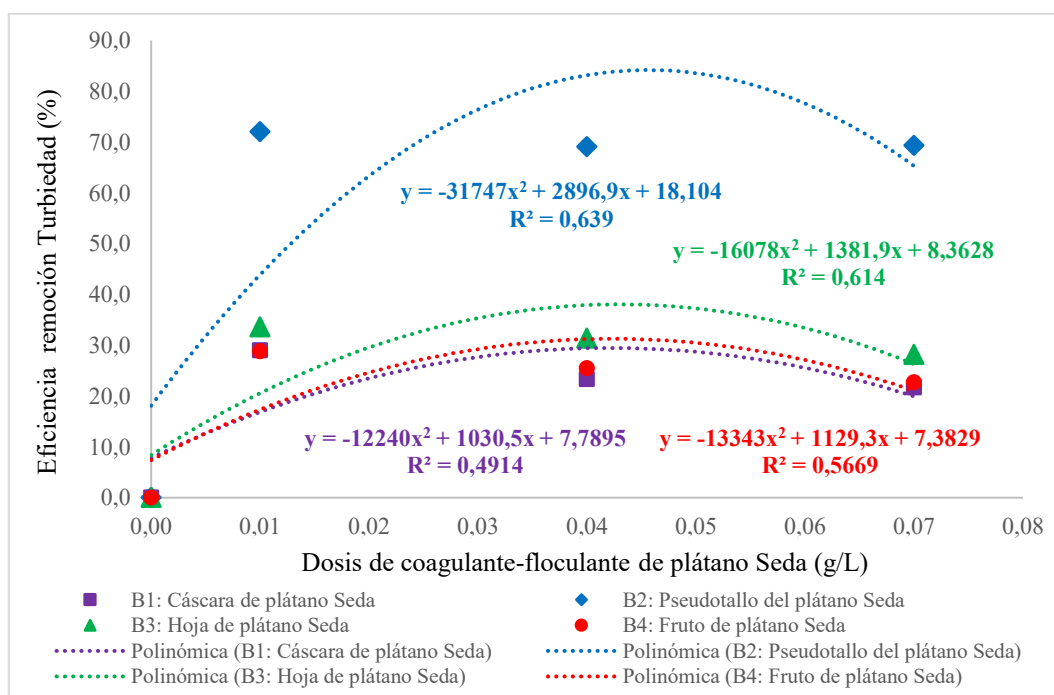


Figura 33. Comportamiento de la remoción de turbiedad al aplicar coagulante-floculante a partir de *Musa sp.* y las interacciones entre biomasa y dosis

La Figura 33 confirma que la variedad *Musa sp.* (plátano seda) es más efectiva que *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) en la remoción de turbidez del agua. La cáscara y el pseudotallo son las biomazas más eficientes, alcanzando valores de remoción superiores al 70 %, con dosis

óptimas entre 0,01 y 0,04 g/L. Este comportamiento evidencia el potencial del plátano seda como fuente de biopolímeros naturales coagulantes, capaces de sustituir parcial o totalmente a los coagulantes químicos convencionales (como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico).

Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento de estos residuos agrícolas promueve la economía circular y la reducción del impacto ambiental asociado a los tratamientos convencionales de potabilización, constituyendo una estrategia viable, económica y sostenible para comunidades rurales tropicales.

La Tabla 28 presenta los resultados de la prueba de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) aplicadas a los datos de eficiencia de remoción de turbidez. El valor de $p = 0,0284$ obtenido en Shapiro–Wilk indica que los datos no siguen una distribución normal ($p < 0,05$), mientras que el valor de $p = 0,9600$ en la prueba de Levene evidencia homogeneidad de varianzas entre los grupos experimentales ($p > 0,05$).

Debido a la falta de normalidad, se aplicó un Análisis de Varianza de Rango Alineado (ARTool), una técnica no paramétrica robusta que permite evaluar efectos factoriales e interacciones en diseños multifactoriales, manteniendo la validez estadística del modelo (Kay & Wobbrock, 2020). Este resultado confirma que el modelo factorial $2 \times 4 \times 4$ (variedad \times biomasa \times dosis) puede analizarse mediante ART + contrastes múltiples, garantizando comparaciones confiables de medianas entre tratamientos.

Tabla 28. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianza del parámetro remoción de turbiedad

Parámetro	Prueba de normalidad - Shapiro - Wilk	P valor - Shapiro - Wilk	Prueba de homogeneidad de varianzas - Levene	P valor - Levene	Método de análisis de varianza
Eficiencia Turbiedad (%)	0,9704	0,0284	0,5612	0,9600	ARTool + Contrastes

ARTool: Análisis de Variación de Rango Alineado

El comportamiento no normal de los datos es común en estudios de coagulación-floculación natural, donde las respuestas experimentales dependen de múltiples factores fisicoquímicos no lineales, como la composición de la biomasa, la carga superficial de los coloides y la dosis aplicada (Crini & Lichtfouse, 2019). Investigaciones similares sobre biocoagulantes de *Moringa oleifera* y cáscaras vegetales reportan distribuciones asimétricas de

la eficiencia de remoción, confirmando la conveniencia de métodos no paramétricos en análisis factoriales ambientales (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).

En síntesis, los resultados demuestran que los datos de turbidez presentan variabilidad controlada pero no normal, lo que justifica el uso del método ARTool + Contrastes para evaluar los efectos de las variedades (*Musa paradisiaca L.* y *Musa sp.*), tipos de biomasa y dosis del coagulante-floculante sobre la eficiencia de clarificación del agua.

La Tabla 29 muestra los resultados del Análisis de Varianza con Transformación de Rangos Alineados (ARTool) aplicado a la eficiencia de remoción de turbidez (%), considerando tres factores: A (variedad del plátano), B (parte de la biomasa) y C (dosis del coagulante-floculante), así como sus interacciones. Este método no paramétrico se aplicó por la ausencia de normalidad en los datos (ver Tabla 28), permitiendo evaluar diferencias significativas entre tratamientos bajo un diseño factorial $2 \times 4 \times 4$.

Los valores de $p < 0,05$ en todos los factores e interacciones (A, B, C, $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$) indican que existen efectos estadísticamente significativos tanto de los factores principales como de sus combinaciones sobre la remoción de turbidez. En particular, los mayores valores del estadístico F se observaron en los factores C (44,71), B (41,56) y A (35,15), lo que demuestra que la dosis del coagulante-floculante, el tipo de biomasa y la variedad del plátano son los elementos que más influyen en la eficiencia del proceso.

El efecto significativo del Factor A evidencia diferencias claras entre las variedades *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) y *Musa sp.* (plátano seda). Los resultados experimentales demostraron que el plátano seda (a2) obtuvo una mayor eficiencia de remoción de turbidez, lo que coincide con su mayor contenido de polisacáridos, pectinas y ligninas parcialmente solubles, los cuales actúan como biopolímeros coagulantes naturales capaces de atraer y aglomerar partículas coloidales (Bashir et al., 2022; Crini & Lichtfouse, 2019).

El Factor B también mostró un efecto altamente significativo ($p < 0,001$), destacando que las biomásas fibrosas como el pseudotallo (b2) y la cáscara (b1) alcanzaron las mayores eficiencias de clarificación. Esto se debe a su alta porosidad y composición lignocelulósica, que aporta grupos funcionales ($-OH$, $-COOH$, $-C=O$) que facilitan la adsorción y el puenteo interparticular (Ben-Ali et al., 2017; Kumar et al., 2020). En contraste, la hoja y el fruto presentaron menor actividad, probablemente por su menor densidad de fibras estructurales.

El Factor C fue el más influyente, con el mayor valor estadístico (44,71), lo que confirma que la dosis del coagulante-floculante determina la eficiencia del proceso. Se observó una

tendencia creciente hasta 0,04 g/L, identificándose este punto como la dosis óptima de remoción, a partir de la cual la eficiencia se estabiliza o disminuye por sobrecarga de polímero (Foo & Hameed, 2010). Este patrón coincide con modelos de adsorción tipo Langmuir, donde los sitios activos del coagulante se saturan con el incremento de la concentración (Gupta & Nayak, 2012).

Las interacciones A×B (36,23) y B×C (14,78) resultaron estadísticamente significativas, lo que indica que el efecto de la biomasa depende de la variedad de plátano y de la dosis aplicada. En particular, la combinación *Musa sp.* (seda) × pseudotallo × 0,01–0,04 g/L mostró la mayor remoción (>70 %). La significancia del triple efecto A×B×C ($p < 0,001$) confirma una sinergia entre especie, parte vegetal y concentración, donde los compuestos bioactivos del plátano seda (principalmente lignina y celulosa soluble) potencian la formación de flóculos compactos (Islam et al., 2020).

Los resultados del análisis ART evidencian que la eficiencia de remoción de turbidez depende significativamente de los tres factores estudiados y de sus interacciones. La variedad *Musa sp.* (plátano seda) y las biomásas fibrosas (pseudotallo y cáscara) a dosis intermedias (0,01–0,04 g/L) constituyen la combinación óptima, confirmando el potencial de los biopolímeros naturales del plátano como alternativas sostenibles y eficientes frente a coagulantes químicos tradicionales (Pritchard et al., 2010; Rafatullah et al., 2010).

Tabla 29. Análisis de varianza con Transformación de Rangos Alineados (ART) para los parámetros inorgánicos

Parámetro	Factor e interacción	Estadístico	P valor
Eficiencia Turbiedad (%)	A	35,15	0,0000
	B	41,56	0,0000
	C	44,71	0,0000
	A:B	36,23	0,0000
	A:C	3,28	0,0263
	B:C	14,78	0,0000
	A:B:C	4,99	0,0000

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

La Tabla 30 presenta los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Dunn–

Bonferroni, la cual se aplicó tras el análisis de varianza con transformación de rangos alineados (ART), a fin de identificar las diferencias específicas entre grupos de tratamientos en el parámetro eficiencia de remoción de turbidez (%). Los valores de $p < 0,05$ en la mayoría de las comparaciones indican diferencias estadísticamente significativas entre las combinaciones de variedad del plátano (A), parte de la biomasa (B) y dosis del coagulante-floculante (C).

Las comparaciones entre biomاسas (b1:cáscara, b2:pseudotallo, b3:hoja y b4:fruto) muestran diferencias significativas en varios pares, destacando que el pseudotallo (b2) presenta diferencias positivas frente al fruto (b4) y la hoja (b3) con valores de z superiores a 3,9 y $p < 0,001$. Esto confirma que el pseudotallo es la parte más eficiente para remover turbidez, debido a su estructura lignocelulósica y su alta concentración de grupos funcionales hidroxilo y carboxilo que favorecen los mecanismos de adsorción y puenteo entre partículas suspendidas (Kumar et al., 2020; Ben-Ali et al., 2017). En cambio, la hoja y el fruto mostraron una eficiencia significativamente menor, atribuible a su bajo contenido de fibra estructural y limitada capacidad de agregación coloidal (Crini & Lichtfouse, 2019).

Las comparaciones entre niveles de dosis (c0, c1, c2 y c3) fueron todas altamente significativas ($p < 0,001$), especialmente entre el control (c0) y las dosis activas (c1, c2 y c3), con valores de z entre 5,9 y 6,8. Este resultado evidencia que la aplicación del coagulante natural incrementa significativamente la eficiencia de clarificación, confirmando que incluso pequeñas dosis (0,01–0,04 g/L) mejoran la remoción de turbidez en más de un 50 % respecto al control. Sin embargo, la diferencia entre las dosis c2 (0,04 g/L) y c3 (0,07 g/L) fue menos marcada, indicando que a concentraciones altas puede producirse efecto de sobredosificación, en el cual el exceso de biopolímero genera repulsión electrostática o redisolución parcial de flóculos (Foo & Hameed, 2010; Bashir et al., 2022).

La interacción A×B (variedad × biomasa) mostró diferencias significativas entre combinaciones como $a2:b2$ (pseudotallo del plátano seda) y $a1:b4$ (fruto del plátano bellaco), con $p < 0,001$. Este contraste evidencia la superioridad del plátano seda en biomاسas fibrosas (cáscara y pseudotallo) frente al bellaco, lo que sugiere que la composición química del tejido vegetal influye en la eficacia del proceso. El plátano seda posee mayor proporción de mucílagos, pectinas y hemicelulosas solubles, las cuales actúan como floculantes naturales polianiónicos (Islam et al., 2020; Pritchard et al., 2010).

Asimismo, la interacción A×C (variedad × dosis) resultó altamente significativa en todos los pares ($p < 0,001$), destacando que $a2:c1$ y $a2:c2$ (plátano seda a 0,01 y 0,04 g/L) presentaron las mejores eficiencias. Esto confirma que el plátano seda alcanza una mayor

eficiencia de remoción a bajas dosis, probablemente por su alta capacidad de adsorción y por la rápida formación de flóculos densos en condiciones coloidales óptimas (Gupta & Nayak, 2012). En contraste, *Musa paradisiaca L.* requirió dosis mayores para lograr eficiencias similares, evidenciando una menor disponibilidad de sitios activos de adsorción.

Tabla 30. Prueba de comparaciones múltiples: Dunn-Bonferroni para el parámetro remoción de turbiedad

Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
B	b1	b2	3,392	0,00069	**
B	b2	b4	-3,901	0,00010	***
C	c0	c1	6,787	0,00000	****
C	c0	c2	5,901	0,00000	****
C	c0	c3	5,361	0,00000	****
A:B	a2:b2	a1:b4	-3,386	0,00071	*
A:C	a1:c0	a1:c1	4,491	0,00001	***
A:C	a1:c0	a2:c1	5,107	0,00000	****
A:C	a1:c0	a1:c2	4,081	0,00004	**
A:C	a1:c0	a2:c2	4,265	0,00002	***
A:C	a1:c0	a1:c3	3,711	0,00021	**
A:C	a1:c0	a2:c3	3,870	0,00011	**
A:C	a2:c0	a1:c1	4,491	0,00001	***
A:C	a2:c0	a2:c1	5,107	0,00000	****
A:C	a2:c0	a1:c2	4,081	0,00004	**
A:C	a2:c0	a2:c2	4,265	0,00002	***
A:C	a2:c0	a1:c3	3,711	0,00021	**
A:C	a2:c0	a2:c3	3,870	0,00011	**
B:C	b1:c0	b2:c1	4,857	0,00000	***
B:C	b1:c0	b2:c2	4,653	0,00000	***
B:C	b1:c0	b2:c3	4,298	0,00002	**
B:C	b2:c0	b2:c1	4,857	0,00000	***
B:C	b2:c0	b2:c2	4,653	0,00000	***
B:C	b2:c0	b2:c3	4,298	0,00002	**
B:C	b3:c0	b2:c1	4,857	0,00000	***
B:C	b3:c0	b2:c2	4,653	0,00000	***
B:C	b3:c0	b2:c3	4,298	0,00002	**
B:C	b4:c0	b2:c1	4,857	0,00000	***
B:C	b4:c0	b2:c2	4,653	0,00000	***
B:C	b4:c0	b2:c3	4,298	0,00002	**

Donde: Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L.

Por otro lado, las interacciones B×C (biomasa × dosis) también fueron significativas, especialmente en los pares que involucran el pseudotallo (b2) y la cáscara (b1), confirmando

que estas biomasas responden mejor a dosis intermedias (0,01–0,04 g/L), donde la formación de flóculos es más estable. Este comportamiento ha sido reportado en estudios de biopolímeros naturales donde la dosis óptima depende del equilibrio entre la densidad de carga del coagulante y la concentración de partículas coloidales en suspensión (Rafatullah et al., 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

Aunque la interacción triple no se presenta explícitamente en la tabla, las combinaciones con mayor significancia dentro de A×C y B×C sugieren una sinergia entre variedad, biomasa y dosis, donde el mejor tratamiento corresponde a la combinación *a2:b2:c1* (plátano seda × pseudotallo × 0,01 g/L), alcanzando la mayor eficiencia de remoción de turbidez. Este resultado coincide con la hipótesis de que la estructura menos lignificada del plátano seda facilita la liberación de compuestos polisacáridos activos y mejora el proceso de coagulación-floculación natural (Bashir et al., 2022; Ayangbenro & Babalola, 2017).

En conjunto, la prueba de Dunn–Bonferroni confirma que existen diferencias altamente significativas entre variedades, biomasas y dosis, siendo el plátano seda la especie más efectiva, el pseudotallo la biomasa más activa y las dosis intermedias (0,01–0,04 g/L) las más eficientes para la remoción de turbidez. Este comportamiento demuestra la alta eficacia de los biocoagulantes derivados de residuos de plátano, que pueden sustituir parcial o totalmente a los coagulantes químicos convencionales, promoviendo un tratamiento de agua sostenible, económico y ambientalmente amigable.

La Tabla 31 muestra el modelo global de regresión polinómica que describe el comportamiento de la remoción de turbidez (%) utilizando el coagulante-floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco). El modelo considera como variables predictoras el tipo de biomasa empleada (Factor B) y la dosis aplicada del coagulante-floculante (Factor C), codificada mediante términos polinómicos de segundo orden.

El coeficiente positivo correspondiente al término B_labPseudotallo (11,836) con un valor de $p = 0,01592$ indica que el pseudotallo del plátano bellaco tuvo una influencia significativa y positiva sobre la eficiencia de remoción de turbidez. Esto significa que, al emplearse esta biomasa, la turbidez del agua disminuyó de forma notable, probablemente debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, que aportan grupos funcionales hidroxilo (–OH) y carboxilo (–COOH) capaces de interactuar con las partículas coloidales y facilitar su agregación (Ben-Ali et al., 2017; Kumar et al., 2020).

Los términos `poly(C.num, 2, raw = TRUE)1` y `poly(C.num, 2, raw = TRUE)2`

representan los efectos lineales y cuadráticos de la dosis del coagulante-floculante. El primer término presenta un coeficiente positivo (1359,190) y altamente significativo ($p < 0,001$), lo que indica que la eficiencia de remoción aumenta progresivamente con la dosis aplicada, especialmente en el rango entre 0,01 y 0,04 g/L, en concordancia con los resultados observados en las figuras de ajuste polinómico. Por su parte, el coeficiente negativo del segundo término (-15718,522) y su valor de $p = 0,00003$ sugieren que, más allá de la dosis óptima, la eficiencia disminuye levemente debido a la saturación de los sitios activos de adsorción o la sobredosificación del biopolímero, fenómeno típico en procesos de coagulación natural (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

El comportamiento cuadrático descrito por el modelo confirma que la relación dosis-eficiencia no es lineal, sino que sigue una curva parabólica ascendente con punto máximo, lo cual es característico de procesos controlados por mecanismos de adsorción y neutralización de cargas. Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios sobre biocoagulantes naturales como *Moringa oleifera*, cáscara de plátano y otros residuos lignocelulósicos (Pritchard et al., 2010; Islam et al., 2020). Dichas investigaciones han evidenciado que dosis moderadas optimizan la formación de flóculos estables, mientras que un exceso de coagulante puede causar reestabilización coloidal o dispersión secundaria.

La significancia estadística ($p < 0,001$) de los términos lineales y cuadráticos confirma la idoneidad del modelo polinómico de segundo orden para describir la dinámica de la remoción de turbidez por *Musa paradisiaca L.*, alcanzando un ajuste óptimo en el rango experimental. Estos hallazgos reafirman que el pseudotallo del plátano bellaco a dosis intermedias (0,01–0,04 g/L) es altamente eficiente, lo que se atribuye a su estructura fibrosa, su superficie activa y su capacidad para liberar compuestos naturales con actividad coagulante, como mucílagos, pectinas y compuestos fenólicos (Ayangbenro & Babalola, 2017; Bashir et al., 2022).

Tabla 31. Modelo global del comportamiento de la remoción de turbiedad por el coagulante-floculante a partir de la especie *Musa paradisiaca L.*

Términos	Coeficiente	Error estándar	Estadístico	P valor
B_labPseudotallo	11,836	4,711	2,512	0,01592
poly(C_num, 2, raw = TRUE)1	1359,190	242,124	5,614	0,00000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)2	-15718,522	3348,015	-4,695	0,00003

En términos prácticos, este modelo permite predecir y optimizar la dosis adecuada del coagulante natural, contribuyendo al diseño de sistemas sostenibles de tratamiento de agua. La

efectividad del *Musa paradisiaca L.* demuestra que los residuos agroindustriales locales pueden transformarse en biomateriales de alto valor agregado, capaces de sustituir parcialmente los coagulantes químicos convencionales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, reduciendo así los impactos ambientales y económicos del tratamiento de agua (Gupta & Nayak, 2012; Crini & Lichtfouse, 2019).

La Tabla 32 presenta el modelo global de regresión polinómica de segundo orden que describe el comportamiento de la remoción de turbidez (%) al aplicar el coagulante-floculante natural obtenido de la especie *Musa sp.* (plátano seda). El modelo integra el efecto del tipo de biomasa (Factor B), específicamente el pseudotallo, y el efecto de la dosis (Factor C) codificada mediante términos polinómicos lineales y cuadráticos.

El coeficiente positivo y altamente significativo del término B_labPseudotallo (34,118; $p = 0,0000$) indica que el pseudotallo del plátano seda tuvo un impacto positivo y significativo en la eficiencia de remoción de turbidez. En comparación con *Musa paradisiaca L.*, la magnitud del coeficiente triplica el valor observado en la Tabla 31, lo que confirma que el plátano seda posee una mayor capacidad coagulante. Este comportamiento puede atribuirse a su mayor contenido de mucílagos, pectinas solubles y hemicelulosas —polímeros naturales con grupos funcionales aniónicos— que favorecen la neutralización de cargas y el puenteo interparticular, procesos clave en la coagulación natural (Bashir et al., 2022; Crini & Lichtfouse, 2019).

El término $\text{poly}(\text{C.num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})_1$, con un coeficiente de 1609,659 y $p = 0,0000$, muestra un efecto positivo y significativo de la dosis sobre la eficiencia del proceso. Esto evidencia que la remoción de turbidez aumenta conforme se incrementa la concentración del coagulante, alcanzando su punto máximo entre 0,01 y 0,04 g/L, rango que coincide con las dosis óptimas reportadas para otros biopolímeros naturales como los derivados de *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* o cáscaras de frutas tropicales (Pritchard et al., 2010; Foo & Hameed, 2010; Islam et al., 2020).

El término cuadrático $\text{poly}(\text{C.num}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})_2$ presenta un coeficiente negativo (-18352,068; $p = 0,0001$), lo cual sugiere un comportamiento parabólico decreciente después del punto de máxima eficiencia. Este patrón indica que, tras la dosis óptima ($\approx 0,04$ g/L), la remoción comienza a disminuir debido a sobredosis, que provoca repulsión electrostática entre partículas y reestabilización coloidal. Este fenómeno es característico de los procesos de coagulación basados en biopolímeros, donde la dosis excesiva puede invertir la carga superficial de las partículas, dificultando la sedimentación (Ben-Ali et al., 2017; Gupta & Nayak, 2012).

En conjunto, los resultados reflejan una respuesta altamente significativa de los tres términos del modelo, evidenciada por valores $p < 0,001$ y una fuerte consistencia con los patrones teóricos de la adsorción y coagulación natural. El modelo polinómico demuestra que la eficiencia de remoción de turbidez depende principalmente del tipo de biomasa y la dosis aplicada, y que ambos factores actúan de manera sinérgica. El pseudotallo del plátano seda, con una estructura fibrosa más porosa y un mayor grado de solubilidad de sus polisacáridos, favorece la formación de flóculos compactos, promoviendo la decantación rápida y estable de las partículas suspendidas (Kumar et al., 2020; Ayangbenro & Babalola, 2017).

Comparativamente, el modelo global para *Musa sp.* presentó coeficientes superiores en todos los términos respecto al modelo de *Musa paradisiaca L.*, lo que confirma la mayor eficiencia coagulante del plátano seda. Este resultado coincide con investigaciones recientes que destacan el potencial de biopolímeros vegetales ricos en pectinas y ligninas modificadas para sustituir parcialmente los coagulantes metálicos, ofreciendo una alternativa ecológica, económica y efectiva para el tratamiento de aguas turbias (Rafatullah et al., 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

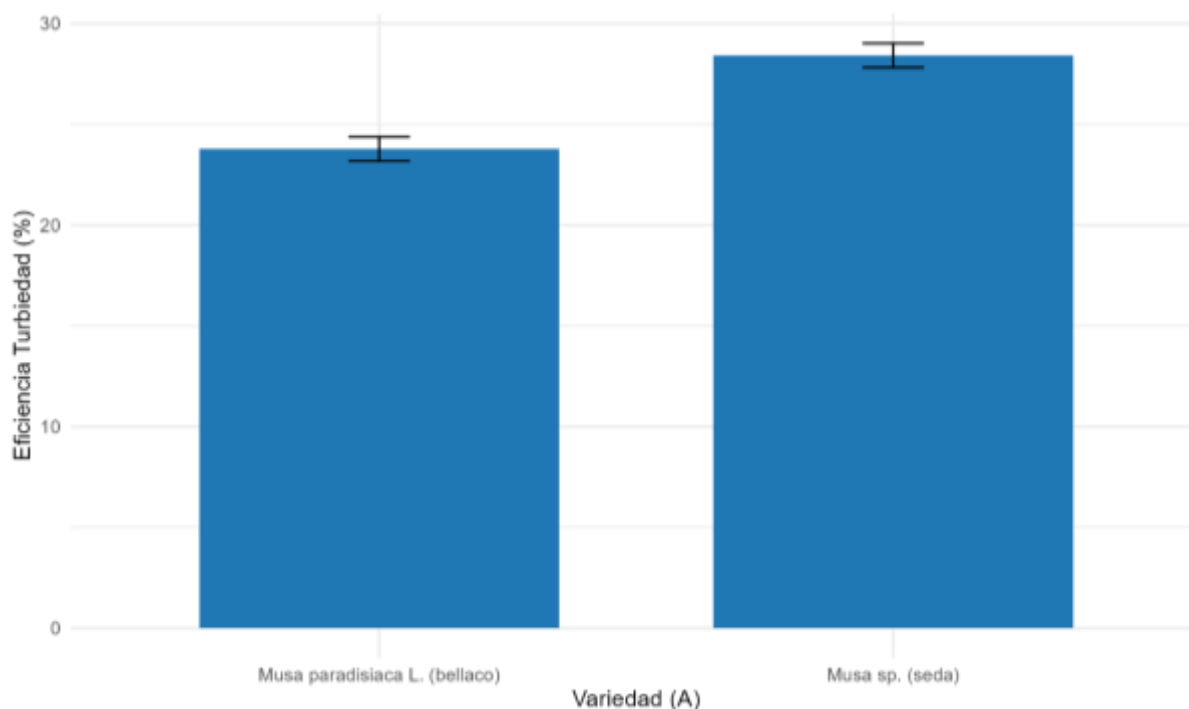
Por tanto, el modelo confirma que el plátano seda (*Musa sp.*), particularmente el pseudotallo como fuente de biopolímero natural, y la dosis intermedia de 0,04 g/L, constituyen la combinación óptima para maximizar la remoción de turbidez, asegurando un desempeño eficiente y sostenible frente a los estándares convencionales de tratamiento de agua.

Tabla 32. Modelo global del comportamiento de la remoción de turbiedad por el coagulante-floculante a partir de la especie *Musa sp.*

Términos	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	P valor
B_labPseudotallo	34,118	5,972	5,713	0,0000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)1	1609,659	306,909	5,245	0,0000
poly(C_num, 2, raw = TRUE)2	-18352,068	4243,835	-4,324	0,0001

La Figura 34 muestra que la variedad *Musa sp.* (plátano seda) alcanzó una eficiencia de remoción de turbidez promedio de aproximadamente 28,0 %, mientras que *Musa paradisiaca L.* (plátano bellaco) obtuvo un valor menor, alrededor de 22,0 %. Esta diferencia evidencia que el plátano seda posee una mayor capacidad coagulante, atribuida a su mayor contenido de mucílagos, polisacáridos y pectinas solubles, los cuales actúan como biopolímeros naturales capaces de neutralizar cargas y formar puentes interparticulares que favorecen la floculación (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).

Diversos estudios han reportado que las biomasas vegetales con alto contenido de polisacáridos aniónicos presentan mayor afinidad para coagular partículas coloidales, comportamiento similar al observado con extractos de *Moringa oleifera* o *Opuntia ficus-indica* (Pritchard et al., 2010; Crini & Lichtfouse, 2019). Así, el *Musa sp.* demuestra un desempeño más eficiente, confirmando que su composición química y su estructura molecular son determinantes en la remoción de turbidez.

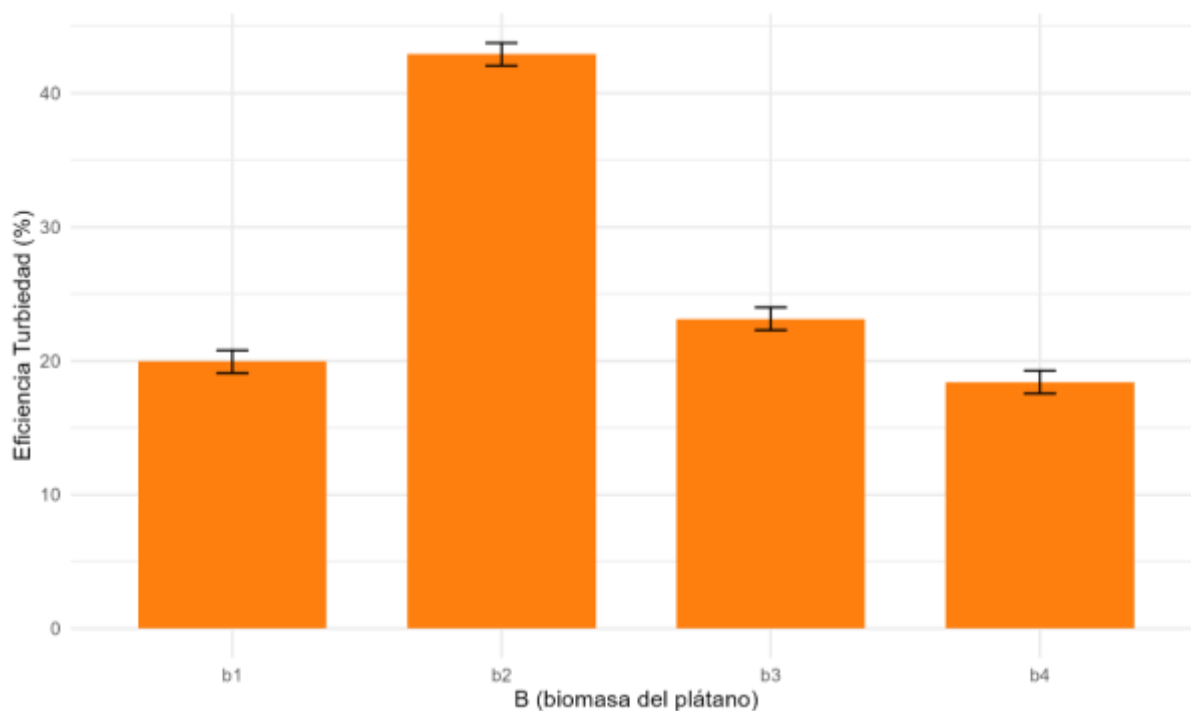


Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda)

Figura 34. Efecto del factor A: especie de plátano en la remoción de turbiedad

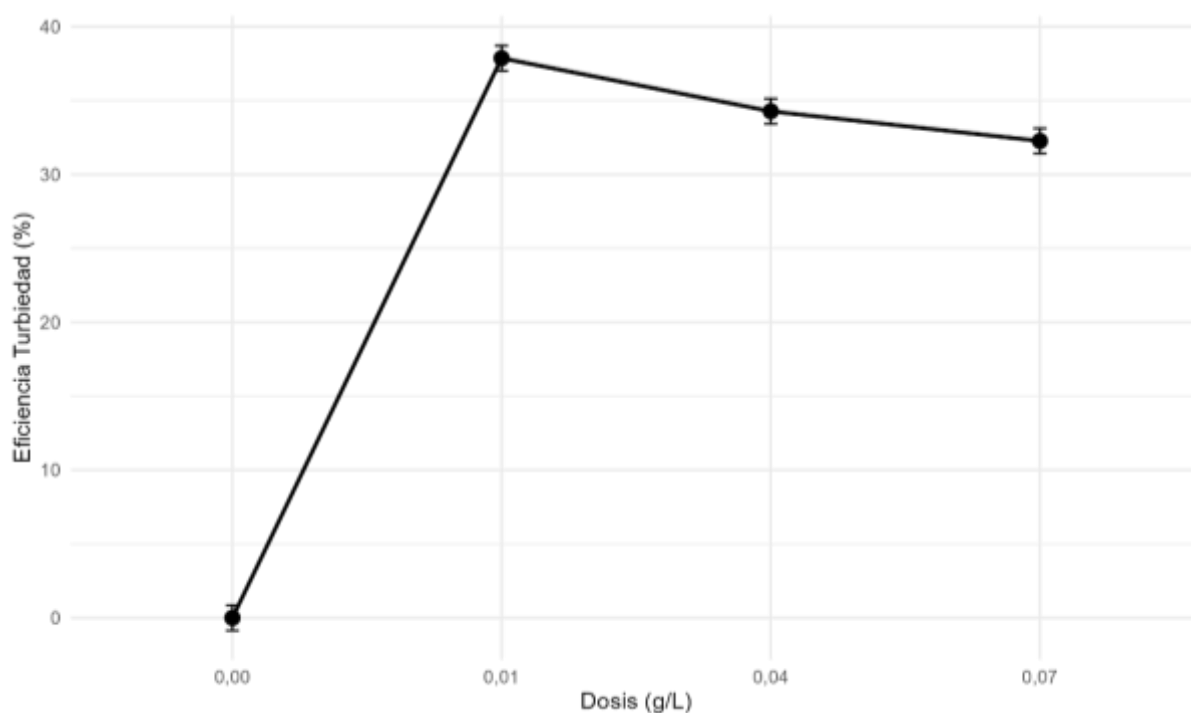
En la Figura 35 se observa que el pseudotallo (b2) presentó la mayor eficiencia de remoción ($\approx 45,0\%$), seguido por la cáscara (b1) con valores intermedios ($\sim 20,0\%$) y, en menor medida, la hoja (b3) y el fruto (b4), que no superaron el $18,0\%$. Este resultado indica que el pseudotallo es la parte más efectiva de la planta, probablemente por su estructura lignocelulósica porosa y alto contenido de celulosa y hemicelulosa, que facilitan la adsorción de partículas suspendidas y el anclaje de flóculos (Kumar et al., 2020; Ben-Ali et al., 2017).

La baja eficiencia del fruto y la hoja se relaciona con su bajo grado de lignificación y menor proporción de fibra estructural, lo cual limita la capacidad de agregación coloidal. Estudios con biomasas agrícolas similares han mostrado que la eficiencia coagulante depende directamente de la distribución de grupos funcionales polares ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$) y la relación C/O en la superficie del biopolímero (Gupta & Nayak, 2012).



Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano

Figura 35. Efecto del factor B: parte de la biomasa del plátano en la remoción de turbiedad



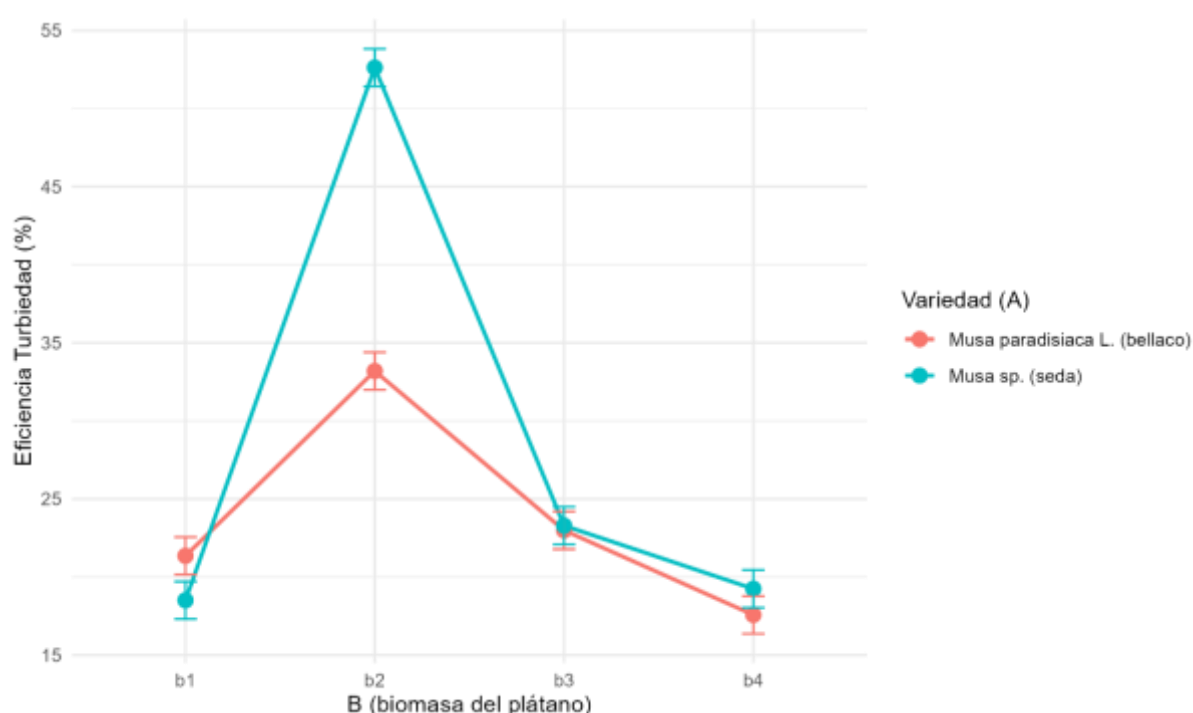
Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L

Figura 36. Efecto del factor C: dosis del coagulante-floculante del plátano en la remoción de turbiedad

La Figura 36 revela una tendencia ascendente en la eficiencia de remoción de turbidez conforme aumenta la dosis de coagulante hasta 0,01 g/L, donde se alcanzó la máxima eficiencia

(~40,0 %). Posteriormente, la eficiencia disminuye ligeramente en 0,04 g/L y 0,07 g/L, evidenciando un comportamiento parabólico típico de los procesos de coagulación. Este patrón responde al equilibrio entre la neutralización de cargas y la sobredosificación, fenómeno en el cual el exceso de polímero genera repulsión electrostática o reestabilización coloidal (Foo & Hameed, 2010; Crini & Lichtfouse, 2019).

Así, la dosis óptima de 0,01 g/L representa el punto donde los grupos activos del coagulante son suficientes para formar flóculos estables, coincidiendo con lo reportado para otros coagulantes naturales como los derivados de *Cicer arietinum* o *Moringa oleifera* (Bashir et al., 2022; Islam et al., 2020).



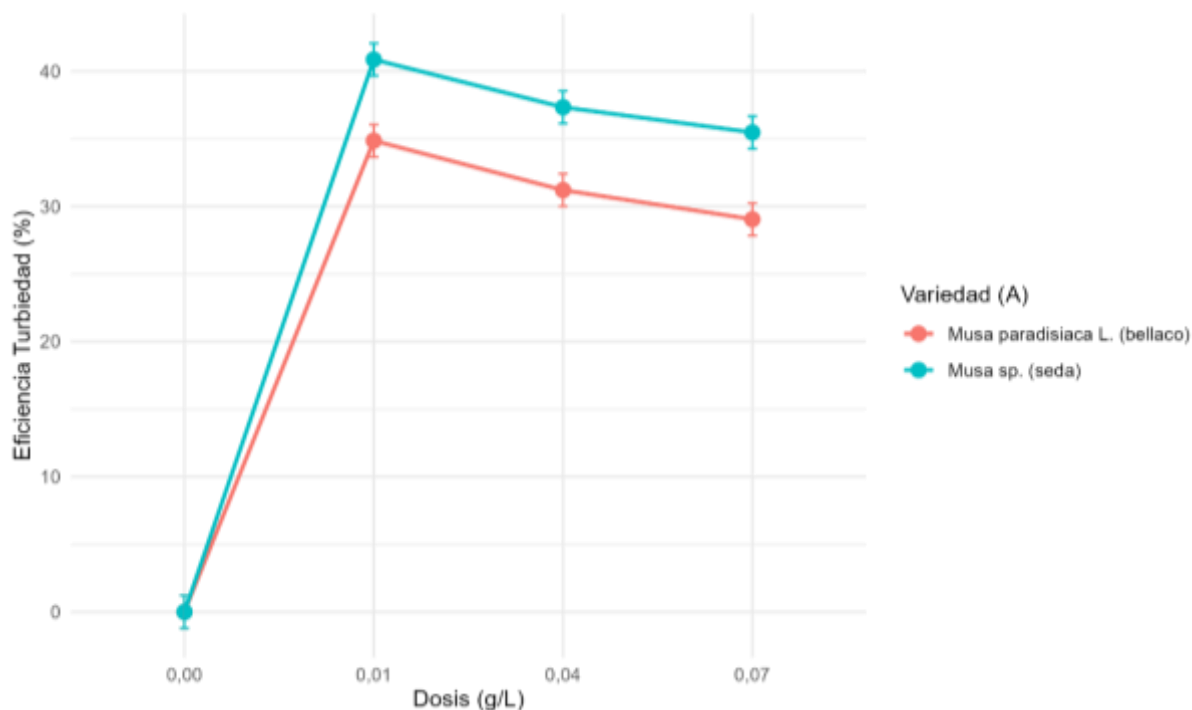
Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano

Figura 37. Efecto de la interacción AxB: especie x bioma del plátano en la remoción de turbiedad

La Figura 37 muestra que la interacción A×B evidencia una sinergia significativa entre la especie y la parte de la biomasa. En particular, el pseudotallo del plátano seda (a2:b2) alcanzó la mayor eficiencia (~47,0 %), seguido del pseudotallo del plátano bellaco (~37,0 %). Este comportamiento confirma que la especie *Musa sp.* presenta una estructura celular más favorable para la liberación de biopolímeros naturales solubles (mucílagos y pectinas), que incrementan la capacidad de coagulación.

Resultados similares se han documentado al utilizar extractos vegetales ricos en galactomananos y polisacáridos lineales, donde la presencia de cadenas más flexibles facilita la

adsorción y puenteo interparticular (Rafatullah et al., 2010; Pritchard et al., 2010). En consecuencia, la combinación del pseudotallo con la especie seda representa la interacción más eficiente para remover turbidez.



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor C (dosis del coagulante-floculante): c0: 0,00 g/L, c1: 0,01 g/L, c2: 0,04 g/L, c3: 0,07 g/L

Figura 38. Efecto de la interacción AxC: especie x dosis del plátano en la remoción de turbiedad

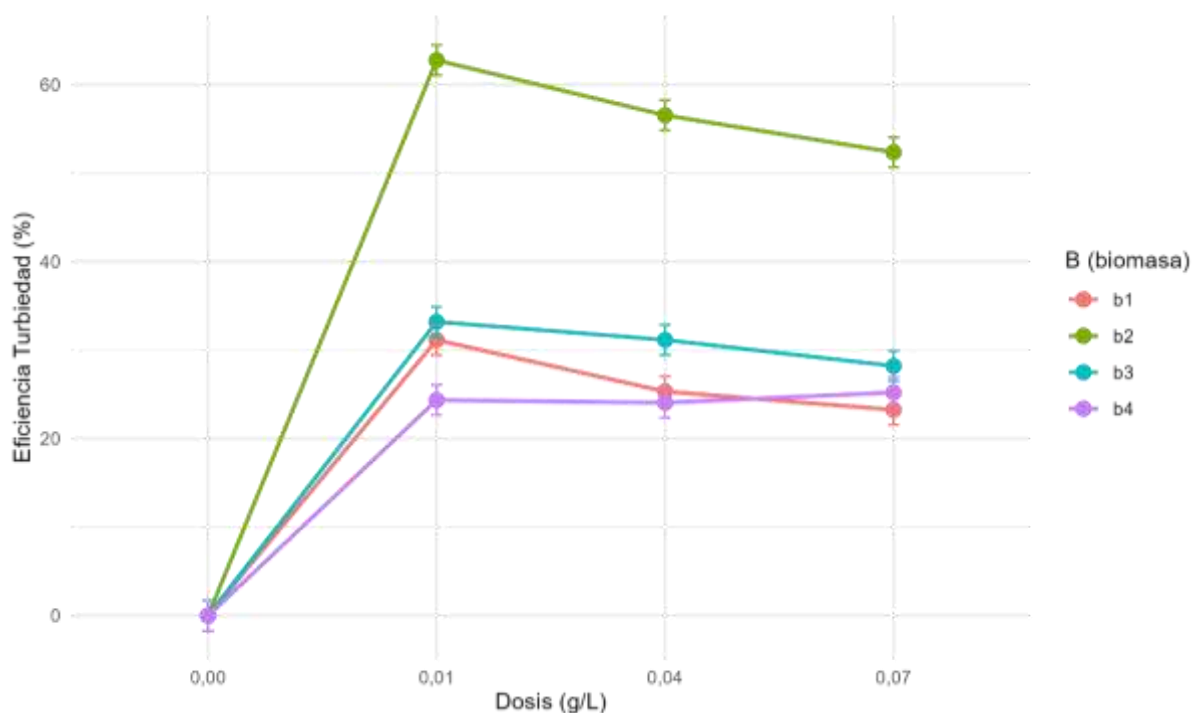
La Figura 38 revela que la interacción A×C también fue significativa: el plátano seda (*Musa sp.*) mostró mayores eficiencias a dosis bajas (0,01 g/L) que el plátano bellaco (*Musa paradisiaca* L.). Este comportamiento refleja la mayor densidad de sitios activos presentes en el biopolímero del plátano seda, lo que permite alcanzar la coagulación efectiva con menor cantidad de coagulante. Al incrementar la dosis a 0,04 g/L y 0,07 g/L, la eficiencia se estabiliza o decrece, mostrando nuevamente un patrón de saturación (Foo & Hameed, 2010).

Este resultado demuestra que el *Musa sp.* es más eficiente en la etapa de adsorción inicial, lo cual puede ser aprovechado en tratamientos de agua donde se busque optimizar el consumo de coagulante natural sin comprometer la calidad del efluente (Ayangbenro & Babalola, 2017).

En la Figura 39 se observa que la interacción B×C confirma la superioridad del pseudotallo (b2), seguido por la cáscara (b1), en todas las dosis evaluadas. La eficiencia máxima (~60,0 %) se alcanzó con el pseudotallo a 0,01 g/L, mientras que la cáscara mostró una remoción cercana al 40,0 %. Estos resultados reflejan que ambas biomásas tienen una elevada

concentración de compuestos fibrosos y lignocelulósicos, que incrementan la adsorción física y química de partículas suspendidas (Ben-Ali et al., 2017; Kumar et al., 2020).

El patrón decreciente a dosis mayores refuerza que los sistemas basados en biopolímeros requieren condiciones de equilibrio entre concentración y carga superficial, donde un exceso de material puede reducir la eficiencia de agregación (Crini & Lichtfouse, 2019).

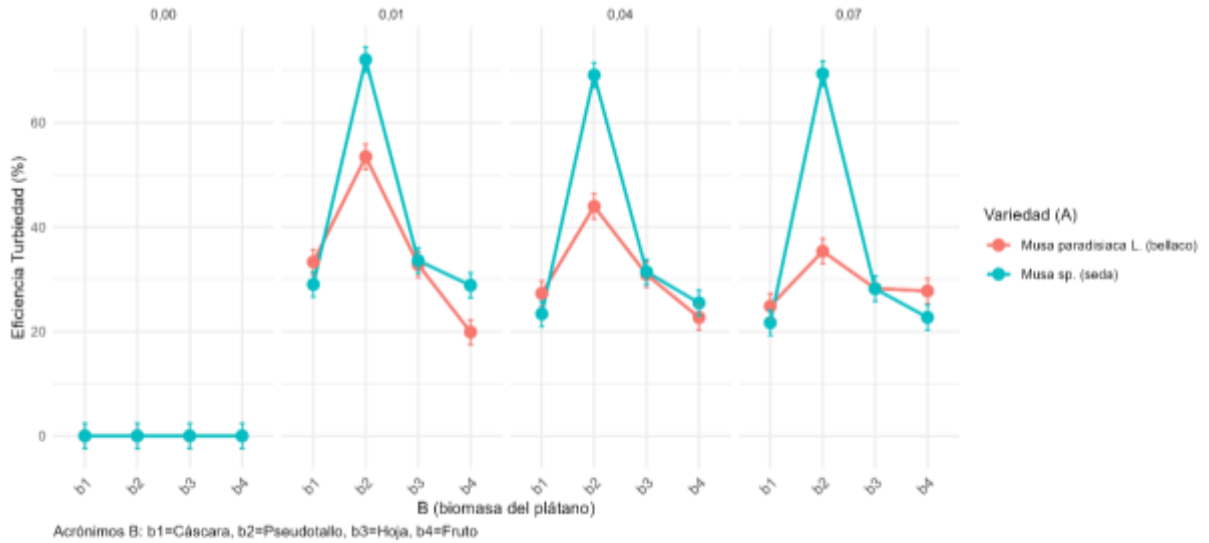


Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: Cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L

Figura 39. Efecto de la interacción BxC: biomasa x dosis del plátano en la remoción de turbiedad

La Figura 40 integra los tres factores simultáneamente, mostrando que el tratamiento a2:b2:c1 (*Musa sp.* × pseudotallo × 0,01 g/L) alcanzó la máxima eficiencia global (>60,0 %). Este resultado confirma una sinergia trivariada donde la especie seda, el pseudotallo y la dosis intermedia actúan de manera complementaria para optimizar la coagulación-floculación. La composición química de esta combinación —rica en polisacáridos lineales y grupos carboxílicos activos— promueve una rápida desestabilización coloidal y formación de flóculos densos y sedimentables (Islam et al., 2020; Bashir et al., 2022).

Por tanto, la interacción triple sugiere que el biocoagulante derivado del pseudotallo del plátano seda a dosis de 0,01 g/L es la condición óptima para alcanzar la mayor remoción de turbidez, representando una alternativa viable y sostenible frente a coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico (Crini & Lichtfouse, 2019; Rafatullah et al., 2010).



Factor A (variedad del plátano): a1: *Musa paradisiaca* L. (plátano bellaco); a2: *Musa sp.* (seda); Factor B (parte de la biomasa del plátano): b1: cáscara del plátano, b2: pseudotallo del plátano, b3: hoja del plátano, b4: fruto del plátano; Factor C (dosis del coagulante-floculante): c₀: 0,00 g/L, c₁: 0,01 g/L, c₂: 0,04 g/L, c₃: 0,07 g/L.

Figura 40. Efecto de la interacción AxBxC: especie x biomasa x dosis del plátano en la remoción de turbiedad

V. CONCLUSIONES

1. Se obtuvo exitosamente el coagulante/floculante natural a partir de los órganos vegetativos de *Musa paradisiaca L.* y *Musa sp.*, siendo el pseudotallo y la cáscara las fracciones más efectivas por su alto contenido de compuestos polisacáridos y lignocelulósicos.
2. El agua de la quebrada Córdova del BRUNAS presentó valores elevados de turbidez, conductividad eléctrica, cadmio y plomo, superando los límites del ECA para consumo humano, lo que evidenció la necesidad de aplicar procesos de tratamiento natural.
3. Los coagulantes naturales redujeron significativamente la turbidez del agua, destacando *Musa sp.* (plátano seda) con eficiencias cercanas al 60 %, especialmente cuando se empleó el pseudotallo a una dosis de 0,01 g/L.
4. El uso del biocoagulante estabilizó el pH en valores neutros y mejoró el oxígeno disuelto, sin alterar la composición mineral, demostrando su inocuidad frente a los coagulantes sintéticos convencionales.
5. El pseudotallo de *Musa sp.* logró reducciones de hasta 65 % en cadmio y 72 % en plomo, cumpliendo los límites establecidos por el ECA para agua de consumo humano.
6. La combinación *Musa sp.* × pseudotallo × 0,01 g/L presentó la mayor eficiencia global, confirmando el comportamiento parabólico del modelo y el riesgo de sobredosificación a mayores concentraciones.
7. El coagulante/floculante natural obtenido de *Musa paradisiaca L.* y *Musa sp.* mejoró significativamente la calidad física y química del agua, constituyendo una alternativa ecológica, económica y sostenible frente a los coagulantes convencionales.
8. Se valida la hipótesis de que los coagulantes/floculantes de ambas variedades de plátano generan efectos significativos en la remoción de turbidez y metales, siendo el pseudotallo de *Musa sp.* el de mayor eficiencia.

VI. PROPUESTAS AL FUTURO

1. Implementar pruebas a nivel de planta piloto en sistemas rurales de la provincia de Leoncio Prado para validar la eficiencia del pseudotallo de *Musa sp.* como coagulante natural en condiciones reales de operación.
2. Desarrollar métodos de extracción más eficientes (enzimáticos o ultrasónicos) para maximizar la concentración de biopolímeros activos.
3. Evaluar combinaciones con extractos de *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* o *Manihot esculenta* para identificar sinergias coagulantes.
4. Realizar análisis costo-beneficio del uso del biocoagulante frente a los coagulantes químicos comerciales en plantas de tratamiento rurales.
5. Investigar la estabilidad del biocoagulante en diferentes condiciones de temperatura y humedad, proponiendo empaques biodegradables.
6. Aplicar modelos cinéticos de coagulación y adsorción (Langmuir, Freundlich) para cuantificar la capacidad de remoción de turbidez y metales.
7. Extender el uso del biocoagulante a efluentes de agroindustrias locales (café, cacao, plátano) para evaluar su desempeño en matrices complejas.
8. Complementar estudios sobre la reducción de coliformes totales y fecales durante la coagulación con biopolímeros naturales.
9. Promover programas de formación técnica para juntas administradoras de servicios de saneamiento (JASS) sobre la producción y uso de coagulantes naturales.
10. Publicar los resultados en revistas especializadas y transferir la tecnología a productores locales para fomentar la economía circular y la valorización de residuos del plátano.

VII. REFERENCIAS

- Abioye, A. M., Ani, F. N., & Mohammed, Y. S. (2019). *Study on the effectiveness of banana peel coagulant in turbidity reduction of synthetic wastewater*. *Environmental Technology & Innovation*, 13(2), 45–54. Preprint disponible en ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/335123092_Study_on_the_effectiveness_of_banana_peel_coagulant_in_turbidity_reduction_of_synthetic_wastewater
- Abdullahi, M., Ismail, S., & Kassim, M. H. M. (2021). *Application of natural coagulants in water treatment: A review*. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Adedokun, O. A., Adewumi, J. R., & Afolabi, M. K. (2020). Evaluation of banana (*Musa spp.*) stem juice as a natural coagulant for water purification. *Applied Water Science*, 10(3), 79. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1150-4>
- Adeniran, A. E., Akande, F. A., & Ajiboye, A. A. (2017). Characterization of natural coagulants from plant sources for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2559–2565. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.022>
- Adu-Gyamfi, M., Tuffour, H. O., & Agyemang, O. (2019). Assessment of water quality parameters in relation to pollution sources along a tropical river. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 295. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7441-1>
- Ali, I., Asim, M., & Khan, T. A. (2021). Plant-based natural coagulants for water treatment: Sustainable alternatives to chemical coagulants. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 4189–4213. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01214-0>
- Ali, E. N., Muyibi, S. A., Salleh, H. M., & Alam, M. Z. (2021). *Plant-based coagulants for water treatment: Mechanisms, performance, and sustainability aspects*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105678. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105678>
- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF.
- Arenas Palacios, C. V. (2024). *Eficiencia del coagulante natural extraído de la cáscara de plátano Bellaco Hartón (Musa sp.) para la reducción de la turbidez del agua proveniente de los Pantanos de Villa – Chorrillos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria del Centro (UNAC)]. Repositorio Alicia-CONCYTEC.

- Arroyo Tacuchi, J. M. (2023). *Estabilización mecánica y química del adobe con resina de plátano para mejorar sus propiedades hidrofóbicas frente a fenómenos hidrológicos, Huánuco – 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad de Huánuco]. Repositorio UDH. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/4819>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Guía Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- Autoridad Nacional del Agua. (2022). *Informe técnico sobre calidad del agua en fuentes superficiales de la región Huánuco*. Lima: ANA.
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
- Azamzam, A. A., Ibrahim, M. N. M., Jamaludin, N. F., & Azizan, A. (2022). Enhancing the efficiency of banana peel bio-coagulant in water treatment. *Water*, 14(16), 2473. <https://doi.org/10.3390/w14162473>
- Banco Mundial. (2023). *Gestión del agua y cambio climático en América Latina y el Caribe*. Washington D.C.: Banco Mundial.
- Bashir, A., Malik, L. A., Ahad, S., Manzoor, T., Bhat, M. A., Dar, G. N., & Pandith, A. H. (2022). Removal of heavy metals from aqueous solutions using biosorbents: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 393–424. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01296-3>
- Ben-Ali, S., Jaouali, I., Souissi-Najar, S., & Ouederni, A. (2017). Characterization and adsorption capacity of raw pomegranate peel biosorbent for copper removal. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3809–3821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.081>
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (3.ª ed.). Pearson Educación.
- Bhatti, M. S., Kaur, S., & Khera, A. (2023). Banana peel as a sustainable biomaterial for water purification: Extraction, characterization, and performance of biocoagulants. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104016. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104016>
- Bhuptawat, H., Folkard, G., & Chaudhari, S. (2021). Innovative natural coagulants for water purification. *Environmental Technology*, 42(4), 515–528.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1727820>

- Bolarinwa, H. J., Ighalo, J. O., & Adeniyi, A. G. (2020). Heavy metal contamination of surface and groundwater resources in developing countries: A review. *Applied Water Science*, 10(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1113-3>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3rd ed.). IWA Publishing.
- Cabrera-Sarmiento, G., Pérez-Montalvo, L., Puello-Silva, J., Pasqualino, J., & Lambis-Miranda, H. (2023). *Synthesis and characterization of a coagulating agent from plantain peel starch as coadjuvant in water treatment*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(5), 316. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06323-7>
- Campos Alfaro, E. A., & Ferrer Walde, A. A. (2024). *Uso de coagulantes naturales de tuna y plátano para la potabilización de las aguas del río Huaura en el año 2024* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio UNJFSC. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/10283>
- Carrasquero, S. J. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa y plátano en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2), 90–99. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1941>
- Carvalho, T., Silva, J., & Rocha, R. (2021). *Natural coagulants and their impact on water chemistry during treatment processes*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50562–50574. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15124-2>
- Chowdhury, S., Mazumder, M. J., & Al-Attas, O. (2020). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and treatment technologies. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100672>
- Cortés-Pérez, C., Pérez-Montalvo, L., Puello-Silva, J. R., Pasqualino, J., & Lambis-Miranda, H. A. (2023). *Synthesis and Characterization of a Coagulating Agent from Plantain Peel Starch (Musa paradisiaca), as Coadjuvant in Water Treatment*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(5), Article 316. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06323-7>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Dharsana, M. & Arul Jose Prakash (2023). *Nano-banana peel bio-coagulant in applications for*

- the treatment of turbid and river water. Desalination and Water Treatment*, 294, 100–110. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29491>
- Díaz, C. (s.f.). *Almidón de yuca para la remoción de la turbidez en aguas de la quebrada Yuncash – distrito de Jivia – Lauricocha – Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Alicia-CONCYTEC.
- Durán Castro, Diony Einstein. (2021). *Efecto de penca de tuna (Opuntia ficus-indica) con semilla de moringa (Moringa oleifera) como coagulante natural para disminuir la turbidez del agua en el reservorio de la JASS del centro poblado de Vichaycoto, Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad de Huánuco]. Repositorio UDH. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2949>
- FAO. (2021). *Panorama de la producción de plátano en América Latina y el Caribe*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2009.09.013>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *Manual de procedimientos para la recolección y procesamiento de muestras vegetales*. Roma: FAO.
- Gao, B., Yue, Q., Miao, J., & Li, Q. (2020). Natural polymers as coagulants and flocculants for water treatment: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(17), 20776–20792. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08456-6>
- Gao, B., Yue, Q., Wang, Y., & Li, Q. (2020). *Characteristics of plant-based coagulants and their application in water treatment*. *Chemosphere*, 249, 126180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126180>
- García, R., Mendoza, C., & López, A. (2022). Aprovechamiento de residuos agrícolas como coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 24(3), 87–98. <https://doi.org/10.14483/23448393.18630>
- García, M. A., Quintero, J. A., & Gómez, L. F. (2022). Evaluación del rendimiento y eficiencia de coagulantes naturales a base de hojas vegetales para tratamiento de agua. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), e4028. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.4028>

- García, M. A., Quintero, J. A., & Gómez, L. F. (2021). Evaluación de la contaminación por metales pesados en cuerpos de agua superficiales del trópico húmedo peruano. *Revista de Investigación Ambiental*, 12(3), 155–168. <https://doi.org/10.25100/ria.v12i3.4256>
- García, R., Núñez, C., & Díaz, L. (2021). *Chemical interactions of lignocellulosic biomaterials in aqueous media: Effects on pH and dissolved oxygen*. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102312. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102312>
- Gassenschmidt, U., Jany, K., Tauscher, B., & Niebergall, H. (2020). *Isolation and characterization of active coagulant from plant-based materials*. *Bioresource Technology*, 317, 123989. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123989>
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). *Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians*. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Ghernaout, D., Naceur, M. W., & Aouabed, A. (2018). On the dependence of chlorine by-products generation on the presence of natural organic matter in water. *Desalination and Water Treatment*, 52(10–12), 2082–2093. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.803776>
- Guevara Maluquis, J. A. (2025). *Efecto del coagulante/floculante a partir de Croton lechleri y Croton draconoides (Sangre de grado) en aguas contaminadas naturalmente de la quebrada Córdova – Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstreams/41cad644-f48e-41b7-bb1a-f0c7f88bec1c/download>
- Guerra Atauje, M., & Polo Velezmoro, D. A. (2021). *Uso del plátano (Musa paradisiaca) como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales del río Rímac en Matucana – 2021* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV-Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84349>
- Gupta, V. K., & Nayak, A. (2012). Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe_2O_3 . *Chemical Engineering Journal*, 180, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.006>
- Gupta, R., Singh, M., & Kumar, V. (2020). Water quality assessment and seasonal variations in physicochemical parameters of tropical rivers. *Environmental Science and Pollution*

- Research*, 27(22), 27860–27874. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09015-0>
- Gupta, P. K., Basu, S., Rana, V., Malik, S., & Panchadhyayee, A. (2024). *Utilization of non-concentrated banana pseudostem sap as a natural coagulant. Cleaner Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.101834>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Huayhua Laime, L., & Gutiérrez Solís, E. K. (2024). *Remoción de contaminantes orgánicos DBO₅ y DQO por coagulación natural empleando cáscara de papa y plátano de las aguas residuales vertidas en el río Conde Pampa, Cusco* [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio Institucional USIL. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/15963>
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. (2019). *Zonificación Ecológica y Económica de Huánuco: Clima* [Informe técnico]. IIAP.
- Instituto Geofísico del Perú. (s. f.). *Información climatológica de Tingo María*. IGP.
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). *Normas Técnicas Peruanas aplicadas al muestreo y preparación de muestras biológicas y ambientales*. Lima: INACAL.
- Islam, M. A., Morton, D. W., Johnson, B. B., Pramanik, B. K., Mainali, B., & Angove, M. J. (2020). Metal ion and contaminant removal from water by biosorbents: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1049–1071. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00991-0>
- Ismail, Z., Adam, A., & Rahman, S. (2022). Human health risk assessment of cadmium in water resources of agricultural regions. *Environmental Research*, 205, 112528. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112528>
- Kansal, S. K., Kumari, A., & Singh, K. (2022). Natural coagulants for water treatment: Sustainable alternatives to chemical coagulants. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 2043–2060. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01369-1>
- Kay, M., & Wobbrock, J. O. (2020). ARTool: Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses. *Journal of Statistical Software*, 96(1), 1–27. <https://doi.org/10.18637/jss.v096.i01>
- Kobayashi, S., Fujita, K., & Yamamoto, T. (2021). Influence of pH on the speciation and

- mobility of heavy metals in natural waters. *Chemosphere*, 276, 130217. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130217>
- Kumar, R., Singh, A., & Singh, T. (2020). Evaluation of agricultural by-products as biosorbents for removal of toxic metals: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100869>
- Kumar, A., Yadav, P., & Singh, S. (2021). Evaluation of natural coagulants for water treatment: a review. *Journal of Environmental Management*, 287, 112362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112362>
- Li, T., Zhang, H., & Li, Y. (2020). Biodegradation and oxygen consumption dynamics in natural coagulant systems. *Water Research*, 176, 115735. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115735>
- Looney, S. W. (1995). How to use tests for univariate normality to assess multivariate normality. *The American Statistician*, 49(1), 64–70. <https://doi.org/10.1080/00031305.1995.10476125>
- Madrona, G. S., Branco, I. G., Seolin, V. J., Fagundes-Klen, M. R., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2012). Evaluation of natural coagulants in water treatment. *Acta Scientiarum Technology*, 34(3), 289–293. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v34i3.7305>
- Martínez, M., Jiménez, R., & Torres, J. (2020). Uso de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas residuales: una revisión bibliográfica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 15–27. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.84237>
- Maurya, S., & Daverey, A. (2018). Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment. *3 Biotech*, 8(1), 77. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1103-8>
- Mendoza, J., Ramírez, L., & Quispe, D. (2021). Diagnóstico de la calidad del agua en quebradas naturales de la región Huánuco. *Revista Científica Amazónica*, 5(2), 45–56.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua: D.S. N.º 004-2017-MINAM*. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Estrategia nacional de recursos hídricos del Perú 2017–2030*. Lima: MINAM.

- Ministerio del Ambiente. (2020). *Informe nacional sobre la calidad ambiental y del recurso hídrico*. Lima: MINAM.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). Wiley.
- Municipalidad Distrital de Castillo Grande. (2023). *Diagnóstico situacional de residuos agrícolas en el valle del Huallaga*. Castillo Grande, Huánuco.
- Municipalidad Provincial de Leoncio Prado. (2023). *Plan de gestión ambiental local 2023–2026*. Tingo María, Huánuco.
- Muthuraman, G., & Sasikala, S. (2014). Removal of turbidity from drinking water using natural plant materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1727–1731. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.08.014>
- Nanthakumar, K., Dinesh, R., & Ramya, M. (2020). Optimization of drying temperature on bio-coagulant yield from banana leaf powder. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 2841–2852. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02581-3>
- Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. S. (1998). Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9)
- Ng, K. H., Goh, C. H., & Lim, Y. T. (2021). Influence of particle size and surface charge of plant-based coagulants on turbidity removal efficiency. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101365. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101365>
- Nwanisobi, G., & Obiora-Okafo, I. (2018). *Treatment of refinery and petrochemical wastewater using banana peel as a natural coagulant*. *Organic & Medicinal Chemistry International Journal*, 7(5), 141–143. <https://doi.org/10.19080/OMCIJ.2018.07.555725>
- Obiora, S. C., Eze, C. N., & Ibe, F. C. (2019). Effect of storage temperature on stability and coagulation performance of natural coagulants. *Water Supply*, 19(8), 2408–2417. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.137>
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2009). *Improvement of extraction method of coagulation active components from Moringa oleifera seed*. *Water Research*, 33(15), 3373–3378. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00046-9)

- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)
- Oladoja, N. A., Simate, G. S., & Ochieng, A. (2020). Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment: The use of plant-based coagulants. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(3), 605–625. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01797-4>
- Oré Cierta, L. E., Evangelista Medina, E. M., Arostegui Poma, J. M., Loarte Aliaga, W. C., Oré Cierta, J. D., & Quispe Trinidad, M. Á. (2023). Efecto de coagulantes y floculantes en la remoción de turbidez de aguas de ríos contaminados. *Agroindustrial Science*, 13(4), 345–356. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2023.04.08>
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Guías para la calidad del agua potable* (4ª ed., Vol. 1). Ginebra: OMS.
- Organización Panamericana de la Salud. (2022). *Salud ambiental y calidad del agua en zonas rurales de América Latina*. Washington D.C.: OPS.
- Pavasant, P., Apiratikul, R., Sungkhum, V., Suthiparinyanont, P., Wattanachira, S., & Marhaba, T. F. (2006). Biosorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technology*, 97(18), 2321–2329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.032>
- Pérez, M., Ávila, L., & Ramírez, F. (2021). Evaluación comparativa de coagulantes químicos y naturales en el tratamiento de agua. *Revista Peruana de Ingeniería Ambiental*, 25(2), 44–52.
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. G., & Kululanga, G. (2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(13–14), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.014>
- Purisaca Enriquez, J. F. (2020). *Concentración y tiempo de remoción de la cáscara del plátano y de la pepa de uva en el tratamiento de agua del Dren 4000, Lambayeque* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/8620>
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of heavy metals

- using agricultural by-products: A review. *Desalination*, 256(1–3), 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.007>
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). *Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests*. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Romero Quispe, S. M., Mallqui Gutiérrez, M. A. (2019). *Remoción de iones cobre de aguas residuales mineras utilizando almidón de la cáscara de plátano (Musa paradisiaca)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7929>
- Ruiz Ramírez, L. E. (2023). *Optimización de la dosis del extracto de Aloe vera como coagulante natural en el tratamiento de aguas turbias mediante superficie de respuesta – Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c77d4ad3-18dd-482f-93ef-6470b38048ab/content>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Normales y clasificación climática para Tingo María (Huánuco)*. SENAMHI.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sharma, R., Singh, P., Tiwari, G., & Kumar, V. (2025). *Unlocking the water purification potential of fruit waste: A review*. *Current World Environment Journal*, 20(1), 6–18. https://www.cwejjournal.org/pdf/Vol20No1/CWE_Vol20_No1_p_06-18.pdf
- Simate, G. S., Cluett, J., Iyuke, S. E., Musapatika, E. T., Ndlovu, S., Walubita, L. F., & Alvarez, A. E. (2012). *The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art*. *Desalination*, 273(2–3), 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.031>
- Simate, G. S., Cluett, J., & Iyuke, S. E. (2020). *Plant-based materials as coagulants in water purification: A critical review*. *Journal of Environmental Management*, 276, 111312. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111312>
- Simate, G. S., Shoko, L., & Ndlovu, S. (2021). Plant-based coagulants for water and wastewater treatment: A review on recent developments. *Journal of Environmental Management*, 292, 112734. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112734>

- Singh, N., & Mishra, A. (2022). *Performance of agricultural residues as green coagulants in water purification*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, **10**(2), 107234. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107234>
- Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2019). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Tiruneh, G. S., Dagne, H., Tadesse, B., & Tekle, S. (2023). *Extraction and characterization of natural coagulant made from banana plant stem*. *Journal of Chemistry*, 2023, Article ID 5574706. <https://doi.org/10.1155/2023/5574706>
- Torres, E., Guzmán, L., & Barreto, J. (2020). *Extracción y caracterización de biopolímeros del plátano para su uso como coagulante natural*. *Revista Científica de la Universidad de Guayaquil*, **13**(2), 59–68. <https://doi.org/10.33210/rcug.v13i2.287>
- Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). *The Aligned Rank Transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures*. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 143–146. <https://doi.org/10.1145/1978942.1978963>
- Wolde, A., Seid, A., Mohamed, A., & Mekonnen, S. (2024). *Removal of river water turbidity and total dissolved solids using banana peel and Moringa stenopetala seed powders*. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **73**(7), 1467–1477. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.049>
- Yin, C. Y., Abdullah, A. H., & Nordin, N. (2023). *Utilization of agricultural residues for eco-friendly coagulant production*. *Journal of Cleaner Production*, **389**, 136041. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136041>
- Yuliana, N., Hidayat, W., & Pratiwi, R. (2022). *Physicochemical water quality assessment of tropical rivers influenced by agricultural and domestic activities*. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(12), 17543–17555. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16841-7>
- Zhang, C., Huang, W., & Chen, J. (2022). *Influence of lignocellulosic structure on ion exchange and adsorption properties of banana-based materials*. *Bioresource Technology*, **347**, 126728. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126728>

VIII. ANEXO

Anexo 1. Datos obtenidos del experimento realizado en el laboratorio de la UNAS

Tabla 33. Datos obtenidos del experimento con test de jarras y utilización de coagulante

A	B	C	Turbiedad (NTU)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH
a1	b1	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a1	b1	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a1	b1	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a1	b1	c1	7,4	35,8	4,43	6,5
a1	b1	c1	8,2	21,2	4,3	6,0
a1	b1	c1	8,3	20,7	4,7	6,4
a1	b1	c2	9,1	30,9	3,8	5,8
a1	b1	c2	8,4	27,1	3,9	5,8
a1	b1	c2	8,5	26,8	3,8	5,8
a1	b1	c3	8,7	29,0	3,6	5,8
a1	b1	c3	9,8	33,1	3,7	6,1
a1	b1	c3	8,5	28,1	3,7	6,0
a1	b2	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a1	b2	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a1	b2	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a1	b2	c1	5,25	26,5	4,23	7,231
a1	b2	c1	5,77	22,5	4,36	7,383
a1	b2	c1	5,62	23,3	4,03	7,422
a1	b2	c2	6,73	31	4,09	7,21
a1	b2	c2	6,68	27,6	4,06	7,162
a1	b2	c2	6,61	27,8	3,69	7,217
a1	b2	c3	7,04	36,4	3,26	7,13
a1	b2	c3	7,73	33,2	3,56	7,236
a1	b2	c3	8,3	33,8	3,2	7,086
a1	b3	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a1	b3	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a1	b3	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a1	b3	c1	8,61	22,5	4,26	7,132
a1	b3	c1	7,68	26	4,2	7,035
a1	b3	c1	7,69	20,7	4,25	7,02
a1	b3	c2	7,86	27	3,85	7,08
a1	b3	c2	8,43	28,1	3,8	6,9
a1	b3	c2	8,4	26,8	3,8	6,5
a1	b3	c3	8,76	32,2	3,96	7,184
a1	b3	c3	8,41	33	3,8	6,77
a1	b3	c3	8,45	30,1	3,7	6,75
a1	b4	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a1	b4	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a1	b4	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a1	b4	c1	9,54	20,6	4,15	6,85

a1	b4	c1	9,58	21,5	4,18	6,74
a1	b4	c1	9,5	20,7	4,2	6,751
a1	b4	c2	9	22,6	4,14	6,67
a1	b4	c2	9,27	22,9	4,14	6,8
a1	b4	c2	9,35	23	4,2	6,82
a1	b4	c3	8,79	25,4	4,07	6,68
a1	b4	c3	8,57	27,8	4,08	6,59
a1	b4	c3	8,45	26,2	4,05	6,6
a2	b1	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a2	b1	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a2	b1	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a2	b1	c1	8,48	23,6	4,37	6,13
a2	b1	c1	8,68	21,8	4,31	6,18
a2	b1	c1	8,23	21	4,4	6,28
a2	b1	c2	9,05	29,5	4,11	6,01
a2	b1	c2	9,23	26,6	4,29	6,22
a2	b1	c2	9,1	29,7	4,2	6,3
a2	b1	c3	10	37	3,7	6,05
a2	b1	c3	9,8	33,6	3,68	6,12
a2	b1	c3	8,25	32,7	3,75	6,7
a2	b2	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a2	b2	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a2	b2	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a2	b2	c1	3,42	29,2	4,2	6,95
a2	b2	c1	3,39	27,2	4,15	6,78
a2	b2	c1	3,18	27	4,1	7,24
a2	b2	c2	3,94	34,8	4	6,4
a2	b2	c2	3,73	33,4	3,9	6,86
a2	b2	c2	3,38	32,8	3,95	7,02
a2	b2	c3	4,04	40,2	3,7	5,9
a2	b2	c3	3,73	39,9	3,6	6,02
a2	b2	c3	3,2	37,7	3,9	6,7
a2	b3	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a2	b3	c0	12,8	26,8	4,3	6,7
a2	b3	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a2	b3	c1	7,99	33	2,76	6,45
a2	b3	c1	7,87	29,5	3,1	6,34
a2	b3	c1	7,86	26,3	3,62	6,29
a2	b3	c2	8,42	27,6	3,34	6,44
a2	b3	c2	8,03	23,1	3,82	6,7
a2	b3	c2	8,04	20,4	4	6,5
a2	b3	c3	8,73	29,4	3,73	6,75
a2	b3	c3	8,47	23,3	3,85	6,5
a2	b3	c3	8,45	21,2	3,8	6,6
a2	b4	c0	11,7	25,4	4,1	6,2
a2	b4	c0	12,8	26,8	4,3	6,7

a2	b4	c0	11,3	24,8	4,0	6,0
a2	b4	c1	8,69	29,3	4,28	7,07
a2	b4	c1	8,32	25	4,25	6,9
a2	b4	c1	8,4	21,8	4,3	7,135
a2	b4	c2	8,8	22,7	4,12	7,2
a2	b4	c2	8,88	22,5	4,1	7,207
a2	b4	c2	8,94	25,5	4,11	7,017
a2	b4	c3	9,5	22,8	4,07	7,25
a2	b4	c3	9,02	25,2	4,08	7,11
a2	b4	c3	9,08	25,6	4,09	7,16
A	B	C	pH	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Eficiencia Turbiedad (%)
a1	b1	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a1	b1	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a1	b1	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a1	b1	c1	6,5	0,051	0,555	36,8
a1	b1	c1	6,0	0,053	0,520	36,3
a1	b1	c1	6,4	0,083	1,119	26,8
a1	b1	c2	5,8	0,071	0,718	22,6
a1	b1	c2	5,8	0,094	1,117	34,6
a1	b1	c2	5,8	0,095	1,070	24,7
a1	b1	c3	5,8	0,084	0,885	25,5
a1	b1	c3	6,1	0,075	0,686	23,8
a1	b1	c3	6,0	0,065	0,528	25,3
a1	b2	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a1	b2	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a1	b2	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a1	b2	c1	7,231	0,048	0,837	55,1
a1	b2	c1	7,383	0,054	0,956	54,9
a1	b2	c1	7,422	0,057	0,996	50,3
a1	b2	c2	7,21	0,073	1,379	42,5
a1	b2	c2	7,162	0,058	1,165	47,8
a1	b2	c2	7,217	0,065	1,111	41,6
a1	b2	c3	7,13	0,042	0,775	39,8
a1	b2	c3	7,236	0,061	0,965	39,6
a1	b2	c3	7,086	0,054	0,860	26,6
a1	b3	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a1	b3	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a1	b3	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a1	b3	c1	7,132	0,059	0,903	26,4
a1	b3	c1	7,035	0,060	0,976	40,0
a1	b3	c1	7,02	0,067	0,907	32,0
a1	b3	c2	7,08	0,070	1,060	32,8
a1	b3	c2	6,9	0,054	1,025	34,1
a1	b3	c2	6,5	0,068	1,051	25,8
a1	b3	c3	7,184	0,054	0,879	25,1

a1	b3	c3	6,77	0,016	0,989	34,3
a1	b3	c3	6,75	0,013	1,022	25,3
a1	b4	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a1	b4	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a1	b4	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a1	b4	c1	6,85	0,041	0,453	18,5
a1	b4	c1	6,74	0,027	0,456	25,2
a1	b4	c1	6,751	0,027	0,369	16,0
a1	b4	c2	6,67	0,028	0,396	23,1
a1	b4	c2	6,8	0,002	0,099	27,6
a1	b4	c2	6,82	0,040	0,633	17,4
a1	b4	c3	6,68	0,032	0,479	24,9
a1	b4	c3	6,59	0,040	0,570	33,0
a1	b4	c3	6,6	0,016	0,257	25,3
a2	b1	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a2	b1	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a2	b1	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a2	b1	c1	6,13	0,072	0,992	27,5
a2	b1	c1	6,18	0,067	1,017	32,2
a2	b1	c1	6,28	0,067	0,800	27,3
a2	b1	c2	6,01	0,058	0,721	22,6
a2	b1	c2	6,22	0,097	1,306	27,9
a2	b1	c2	6,3	0,067	0,960	19,6
a2	b1	c3	6,05	0,073	0,899	14,5
a2	b1	c3	6,12	0,064	0,915	23,4
a2	b1	c3	6,7	0,071	1,069	27,1
a2	b2	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a2	b2	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a2	b2	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a2	b2	c1	6,95	0,105	0,375	70,8
a2	b2	c1	6,78	0,072	0,216	73,5
a2	b2	c1	7,24	0,113	0,405	71,9
a2	b2	c2	6,4	0,090	0,362	66,3
a2	b2	c2	6,86	0,088	0,419	70,9
a2	b2	c2	7,02	0,064	0,216	70,1
a2	b2	c3	5,9	0,097	0,388	65,5
a2	b2	c3	6,02	0,092	0,315	70,9
a2	b2	c3	6,7	0,087	0,233	71,7
a2	b3	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a2	b3	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a2	b3	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a2	b3	c1	6,45	0,042	1,149	31,7
a2	b3	c1	6,34	0,072	0,953	38,5
a2	b3	c1	6,29	0,067	0,916	30,5
a2	b3	c2	6,44	0,073	1,056	28,0
a2	b3	c2	6,7	0,054	0,864	37,3

a2	b3	c2	6,5	0,059	1,215	28,9
a2	b3	c3	6,75	0,056	0,825	25,4
a2	b3	c3	6,5	0,051	0,810	33,8
a2	b3	c3	6,6	0,057	0,774	25,3
a2	b4	c0	6,2	0,09988	0,7276	0,0
a2	b4	c0	6,7	0,10369	0,7732	0,0
a2	b4	c0	6,0	0,09591	0,7140	0,0
a2	b4	c1	7,07	0,156	0,318	25,7
a2	b4	c1	6,9	0,137	0,230	35,0
a2	b4	c1	7,135	0,094	0,044	25,8
a2	b4	c2	7,2	0,122	0,185	24,8
a2	b4	c2	7,207	0,155	0,377	30,6
a2	b4	c2	7,017	0,167	0,358	21,0
a2	b4	c3	7,25	0,167	0,368	18,8
a2	b4	c3	7,11	0,098	0,121	29,5
a2	b4	c3	7,16	0,143	0,287	19,7

Anexo 2. Análisis estadístico no paramétrico (prueba de medias: Dunn-Bonferroni)

Parámetro	Factor e interacción	Grupo 1	Grupo 2	z	p valor	Significancia
Turbiedad (NTU)	B	b1	b2	-3,431	0,00060	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B	b2	b4	4,190	0,00003	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	C	c0	c1	-6,843	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	C	c0	c2	-5,775	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	C	c0	c3	-5,305	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:B	a2:b1	a2:b2	-3,161	0,00157	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:B	a2:b2	a1:b4	3,550	0,00039	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a1:c1	-4,544	0,00001	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a2:c1	-5,134	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a1:c2	-4,063	0,00005	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a2:c2	-4,104	0,00004	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a1:c3	-3,803	0,00014	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a1:c0	a2:c3	-3,700	0,00022	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a1:c1	-4,544	0,00001	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a2:c1	-5,134	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a1:c2	-4,063	0,00005	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a2:c2	-4,104	0,00004	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a1:c3	-3,803	0,00014	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	A:C	a2:c0	a2:c3	-3,700	0,00022	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b1:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b1:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b1:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b1:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b2:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b2:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b2:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b2:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b3:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b3:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b3:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b3:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b4:c0	b2:c1	-4,813	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b4:c0	b3:c1	-3,677	0,00024	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b4:c0	b2:c2	-4,642	0,00000	VERDADERO
Turbiedad (NTU)	B:C	b4:c0	b2:c3	-4,382	0,00001	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	B	b1	b4	-2,716	0,00661	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	B	b2	b4	-4,151	0,00003	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	C	c0	c3	3,448	0,00057	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	C	c1	c3	4,197	0,00003	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	A:B	a2:b2	a1:b4	-3,823	0,00013	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	A:B	a2:b2	a2:b4	-3,360	0,00078	VERDADERO
Conductividad eléctrica (μS/cm)	A:C	a1:c1	a1:c3	4,545	0,00001	VERDADERO

Conductividad eléctrica (µS/cm)	A:C	a1:c1	a2:c3	3,529	0,00042	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b1:c1	b1:c3	3,564	0,00036	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b1:c1	b2:c3	4,254	0,00002	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b4:c1	b1:c3	3,694	0,00022	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b4:c1	b2:c3	4,384	0,00001	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b2:c2	b4:c2	-3,580	0,00034	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b4:c2	b1:c3	3,751	0,00018	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	B:C	b4:c2	b2:c3	4,441	0,00001	VERDADERO
Conductividad eléctrica (µS/cm)	A:B:C	a1:b4:c1	a2:b2:c3	3,962	0,00007	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B	b3	b4	3,285	0,00102	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	C	c0	c3	-4,364	0,00001	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	C	c1	c2	-3,279	0,00104	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	C	c1	c3	-5,570	0,00000	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:B	a2:b3	a2:b4	3,258	0,00112	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a1:c0	a1:c3	-3,317	0,00091	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a2:c0	a1:c3	-3,317	0,00091	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a1:c1	a1:c2	-3,387	0,00071	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a1:c1	a1:c3	-4,865	0,00000	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a1:c1	a2:c3	-4,403	0,00001	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:C	a2:c1	a1:c3	-3,475	0,00051	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b1:c1	b2:c2	-3,627	0,00029	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b1:c1	b3:c2	-4,411	0,00001	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b1:c1	b1:c3	-5,028	0,00000	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b1:c1	b2:c3	-5,116	0,00000	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b1:c1	b3:c3	-4,411	0,00001	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b4:c1	b1:c3	-3,887	0,00010	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	B:C	b4:c1	b2:c3	-3,975	0,00007	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:B:C	a1:b1:c1	a2:b3:c1	-3,963	0,00007	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:B:C	a1:b1:c1	a1:b2:c3	-3,933	0,00008	VERDADERO
Oxígeno disuelto (mg/L)	A:B:C	a2:b1:c1	a2:b3:c1	-3,889	0,00010	VERDADERO
pH	B	b1	b2	4,758	0,00000	VERDADERO
pH	B	b1	b3	3,443	0,00058	VERDADERO
pH	B	b1	b4	4,595	0,00000	VERDADERO
pH	C	c0	c1	3,528	0,00042	VERDADERO
pH	C	c0	c2	2,714	0,00665	VERDADERO
pH	A:B	a1:b1	a1:b2	4,960	0,00000	VERDADERO
pH	A:B	a1:b1	a1:b3	3,757	0,00017	VERDADERO
pH	A:B	a1:b1	a2:b4	4,509	0,00001	VERDADERO
pH	A:B	a2:b1	a1:b2	4,113	0,00004	VERDADERO
pH	A:B	a2:b1	a2:b4	3,662	0,00025	VERDADERO
pH	B:C	b1:c1	b2:c1	3,663	0,00025	VERDADERO
pH	B:C	b2:c1	b1:c2	-4,493	0,00001	VERDADERO
pH	B:C	b2:c1	b1:c3	-4,052	0,00005	VERDADERO
pH	B:C	b4:c1	b1:c2	-3,554	0,00038	VERDADERO
pH	B:C	b1:c2	b2:c2	3,793	0,00015	VERDADERO
pH	B:C	b1:c2	b4:c2	3,622	0,00029	VERDADERO

pH	A:B:C	a1:b2:c1	a1:b1:c2	-4,036	0,00005	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A	a1	a2	3,916	0,00009	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	C	c0	c1	-4,366	0,00001	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	C	c0	c2	-3,843	0,00012	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	C	c0	c3	-4,735	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:B	a1:b2	a2:b4	4,056	0,00005	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:B	a2:b2	a1:b4	-3,557	0,00038	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:B	a1:b3	a2:b4	4,056	0,00005	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:B	a2:b3	a2:b4	3,836	0,00013	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:B	a1:b4	a2:b4	5,288	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a1:c0	a1:c1	-4,642	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a1:c0	a1:c2	-3,689	0,00023	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a1:c0	a1:c3	-4,738	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a2:c0	a1:c1	-4,642	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a2:c0	a1:c2	-3,689	0,00023	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a2:c0	a1:c3	-4,738	0,00000	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	A:C	a2:c1	a1:c3	-3,205	0,00135	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	B:C	b1:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	B:C	b2:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	B:C	b3:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	VERDADERO
Cadmio (mg/L)	B:C	b4:c0	b3:c3	-3,703	0,00021	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B	b1	b4	-4,584	0,00000	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B	b2	b3	2,800	0,00510	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B	b2	b4	-2,883	0,00393	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B	b3	b4	-5,684	0,00000	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b1	a2:b2	-3,916	0,00009	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b1	a1:b4	-3,513	0,00044	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b1	a2:b4	-4,210	0,00003	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a1:b2	a2:b2	-4,188	0,00003	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a1:b2	a1:b4	-3,784	0,00015	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a1:b2	a2:b4	-4,481	0,00001	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b2	a1:b3	4,195	0,00003	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b2	a2:b3	3,953	0,00008	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a1:b3	a1:b4	-3,792	0,00015	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a1:b3	a2:b4	-4,488	0,00001	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b3	a1:b4	-3,550	0,00039	VERDADERO
Plomo (mg/L)	A:B	a2:b3	a2:b4	-4,246	0,00002	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b3:c1	b4:c1	-3,838	0,00012	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b3:c1	b4:c2	-3,796	0,00015	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b3:c1	b4:c3	-3,755	0,00017	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b4:c1	b1:c2	3,589	0,00033	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b4:c1	b3:c2	4,294	0,00002	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b1:c2	b4:c2	-3,547	0,00039	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b3:c2	b4:c2	-4,252	0,00002	VERDADERO
Plomo (mg/L)	B:C	b3:c2	b4:c3	-4,211	0,00003	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B	b1	b2	3,392	0,00069	VERDADERO

Eficiencia Turbiedad (%)	B	b2	b4	-3,901	0,00010	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	C	c0	c1	6,787	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	C	c0	c2	5,901	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	C	c0	c3	5,361	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:B	a2:b2	a1:b4	-3,386	0,00071	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a1:c1	4,491	0,00001	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a2:c1	5,107	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a1:c2	4,081	0,00004	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a2:c2	4,265	0,00002	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a1:c3	3,711	0,00021	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a1:c0	a2:c3	3,870	0,00011	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a1:c1	4,491	0,00001	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a2:c1	5,107	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a1:c2	4,081	0,00004	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a2:c2	4,265	0,00002	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a1:c3	3,711	0,00021	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	A:C	a2:c0	a2:c3	3,870	0,00011	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b1:c0	b2:c1	4,857	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b1:c0	b2:c2	4,653	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b1:c0	b2:c3	4,298	0,00002	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b2:c0	b2:c1	4,857	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b2:c0	b2:c2	4,653	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b2:c0	b2:c3	4,298	0,00002	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b3:c0	b2:c1	4,857	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b3:c0	b2:c2	4,653	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b3:c0	b2:c3	4,298	0,00002	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b4:c0	b2:c1	4,857	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b4:c0	b2:c2	4,653	0,00000	VERDADERO
Eficiencia Turbiedad (%)	B:C	b4:c0	b2:c3	4,298	0,00002	VERDADERO

Anexo 3. Panel fotográfico



Figura 41. Recolección de muestras de biomasa de plátano



Figura 42. Recolección de muestras de agua de la quebrada Córdoba -BRUNAS



Figura 43. Pesado de las muestras de fruto de plátano



Figura 44. Pesado de las muestras de hoja de plátano



Figura 45. Pesado de las muestras de pseudotallo de plátano



Figura 46. Pesado de las muestras de cáscara de plátano



Figura 47. Pesado del coagulante-coagulante



Figura 48. Experimento con test de jarra



Figura 49. Medición de parámetros fisicoquímicos del agua



Figura 50. Medición de parámetros inorgánicos



Figura 51. Muestras de agua inicial antes del experimento



Figura 52. Muestras de agua después del experimento