NaCl-Modified Coagulants from Moringa and Watermelon Seeds for BOD_5 and Turbidity Removal in River Water

Jhon Gessler Julca-Palomino[1]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[2]
[1,2]Universidad César Vallejo, Perú, *jjulcapa01@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe*

Abstract– This study evaluated the efficiency of sodium chloride (NaCl)-modified coagulants, obtained from defatted seed meal of Moringa oleifera Lam and Citrullus lanatus, for the removal of turbidity and BOD_5 from water in the Chancay River, Lambayeque. The water had a pH of 7.75, turbidity of 151.4 NTU, and BOD_5 of 116 mg/L. FTIR-ATR analysis confirmed Amide I and Amide II bands in both flours, indicating a functional protein nature suitable for coagulation, with a protein content of 37.52% in moringa and 30.43% in watermelon. Using jar tests with a factorial design, moringa achieved its best performance at a dose of 1.25 g/L with a contact time of 20 minutes, achieving 99.08% removal of both turbidity and BOD_5; watermelon required a dose of 2.30 g/L and 30 minutes to achieve 97.95% removal. Statistical analysis showed that dose was the most influential factor (p=0.000), while the raw material did not show a significant difference between coagulants (p=0.846). The treatment cost per cubic meter was lower with moringa (S/2,916.67) compared to watermelon (S/3,263.89). It is concluded that both coagulants constitute a natural, efficient, and viable alternative for the treatment of contaminated water.

Keywords-- Water Treatment; Surface Water; Watershed; Water Pollution.

Coagulantes de semillas de moringa y sandía modificados con NaCl en la remoción de DBO_5 y turbidez en aguas de río

Jhon Gessler Julca-Palomino[1]; Cristian Michel Gomez-Cornejo[2]
[1,2]Universidad César Vallejo, Perú, *jjulcapa01@ucvvirtual.edu.pe, Gcornejocm@ucvvirtual.edu.pe*

Resumen– ***La presente investigación evaluó la eficiencia de coagulantes modificados con cloruro de sodio (NaCl), obtenidos de harina desgrasada de semillas de Moringa oleifera Lam y Citrullus lanatus, para la remoción de turbidez y*** DBO_5 ***en aguas del río Chancay, Lambayeque. El agua presentó un pH de 7.75, turbidez de 151.4 NTU y*** DBO_5 ***de 116 mg/L. El análisis FTIR-ATR confirmó bandas de Amida I y Amida II en ambas harinas, evidenciando naturaleza proteica funcional para la coagulación, con un contenido de 37.52% de proteínas en moringa y 30.43% en sandía. Mediante pruebas de jarras con diseño factorial, la moringa alcanzó su mejor desempeño a una dosis de 1.25 g/L con 20 minutos de contacto, logrando 99.08% de remoción tanto de turbidez como de*** DBO_5***; la sandía requirió una dosis de 2.30 g/L y 30 minutos para alcanzar 97.95% de remoción. El análisis estadístico evidenció que la dosis fue el factor más influyente (p=0.000), mientras que la materia prima no mostró diferencia significativa entre coagulantes (p=0.846). El costo de tratamiento por metro cúbico resultó más económico con moringa (S/2,916.67) frente a sandía (S/3,263.89). Se concluye que ambos coagulantes constituyen una alternativa natural, eficiente y viable para el tratamiento de aguas contaminadas.***

Palabras Clave-- Tratamiento del Agua; Agua Superficial; Cuenca; Contaminación del Agua.

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento inadecuado de las aguas residuales continúa siendo uno de los problemas ambientales de mayor alcance en el mundo. Según cifras de la Organización Mundial de la Salud, en 2020 el 44 % de las aguas residuales domésticas generadas globalmente se vertió al ambiente sin haber recibido un tratamiento seguro, lo que compromete tanto la salud de las poblaciones expuestas como la integridad de los ecosistemas receptores [1]. Este vertimiento constituye, además, una fuente relevante de nutrientes hacia cuerpos de agua costeros y continentales: un análisis de más de 135 000 cuencas hidrográficas estimó que las aguas residuales aportan anualmente 6,2 teragramos de nitrógeno a las aguas costeras del planeta, equivalentes al 40 % del nitrógeno de origen agrícola vertido en esos mismos ambientes [2].

La problemática se repite, con particularidades propias, en distintas cuencas del Perú. En el río Ichu, sierra central del país, los vertimientos domésticos sin tratar elevan la carga contaminante hasta 5 899,91 kg/día, superando de forma sostenida los Estándares de Calidad Ambiental vigentes [3]. De manera similar, en el río Yuracyacu la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del efluente alcanzó 28,9 mg/L, valor que excede el estándar fijado para la subcategoría E2 de conservación del ambiente acuático en ríos de selva [4]. A nivel local, la planta de tratamiento de aguas residuales de Lambayeque, operativa desde 2003, cumple apenas el 28,6 % de los límites máximos permisibles del Ministerio del Ambiente, con concentraciones de DBO_5 que llegan a 228 mg/L frente al límite de 100 mg/L [5]. A esto se suma la crisis hídrica que enfrenta la cuenca Chancay-Lambayeque, donde se han registrados déficits pluviométricos de hasta -100 % entre abril y agosto, además de pérdidas superiores a 98 millones de m^3 en la infraestructura de almacenamiento y distribución [6], [7].

Frente a esta problemática, la coagulación-floculación con sales metálicas como sulfato de aluminio y cloruro férrico, principalmente continúa siendo el método convencional más extendido para la remoción de turbidez y materia orgánica. Sin embargo, estos coagulantes generan grandes volúmenes de lodo químico de difícil disposición, modifican sustancialmente el pH del agua tratada y representan un costo operativo creciente para plantas con recursos limitados [8]. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de coagulantes de origen vegetal como alternativa de menor impacto ambiental: estudios con semillas desgrasadas de zapallo han reportado eficiencias de remoción de turbidez de hasta 96,9 % sin alterar significativamente el pH del agua tratada [9], mientras que la modificación química de coagulantes a base de almidón ha permitido superar las limitaciones de densidad de carga catiónica que restringen su aplicación en forma nativa [10].

Entre los coagulantes naturales, las semillas de *Moringa oleifera* Lam han sido las más estudiadas por su elevado contenido proteico y su capacidad de neutralizar cargas coloidales. Hounsinou et al. desarrollaron un método que combina extracción Soxhlet con tratamiento salino para obtener un coagulante compuesto en 99 % de proteínas, capaz de reducir la turbidez de agua de lago de 40 a 2 NTU con una dosis de 0,7 mg/L, resultando 57 veces más eficiente que el sulfato de aluminio en las mismas condiciones [11]. En el contexto peruano, Díaz Pilco y Estrada Cárdenas aplicaron un diseño factorial 2^3 con semillas de moringa en el río Caplina (Tacna) y alcanzaron una remoción de turbidez de 97,77 % [12]. Por su parte, Endale et al. combinaron polvo de semilla de sandía

(*Citrullus lanatus*) con alumbre en proporción 1:3, logrando remociones de 96,1 % de DBO_5 y 95,26 % de DQO en aguas superficiales [13]. Estos antecedentes, junto con estudios que reportan remociones superiores a 90 % en aguas residuales de almazaras [14], domésticas [15] y textiles [16], respaldan la viabilidad técnica de ambas materias primas, aunque persiste la necesidad de determinar su eficiencia relativa cuando se someten a un mismo protocolo de modificación y a condiciones experimentales comparables [17], [18], [19], [20], [21].

En este contexto, el aprovechamiento de semillas de moringa y de sandía, además de ser un residuo agroindustrial de bajo costo y amplia disponibilidad regional— resulta pertinente para el tratamiento de las aguas del río Chancay, que en el tramo evaluado presenta niveles de turbidez y DBO_5 muy superiores a los límites permisibles establecidos por el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de coagulantes modificados con cloruro de sodio (NaCl), obtenidos a partir de harina desgrasada de semillas de *Moringa oleifera* Lam y *Citrullus lanatus*, en la remoción de DBO_5 y turbidez del agua del río Chancay, Lambayeque, mediante pruebas de jarras con diseño factorial.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo, diseño y alcance

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, orientado a establecer relaciones causa-efecto entre la dosis de coagulante, el tiempo de contacto y la remoción de turbidez y DBO_5 [22]. El alcance fue explicativo y transversal, dado que las variables se midieron y relacionaron en un único periodo de recolección, sin seguimiento longitudinal [23]. Como variable independiente se consideraron los coagulantes modificados con NaCl obtenidos de semillas de *M. oleifera* y *C. lanatus*; como variable dependiente, la remoción de DBO_5 y turbidez en el agua del río Chancay.

B. Población y muestra

La población de estudio correspondió al volumen de agua superficial del río Chancay a su paso por el distrito de Reque, Lambayeque, fuente clasificada en la categoría 1, subcategoría A2 (poblacional y recreativo) según el D.S. N.º 004-2017-MINAM. La muestra, seleccionada mediante muestreo no probabilístico por conveniencia [22], consistió en 144 L de agua recolectados en un único punto ubicado 90 m aguas arriba del puente Río Chancay-Reque (6°51'11.47"S, 79°49'31.16"O), siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua [24]. La caracterización inicial del agua reportó un pH de 7,75, una turbidez de 151,4 NTU, una temperatura de 24 °C y una DBO_5 de 116 mg/L, esta última determinada por un laboratorio acreditado mediante el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24.ª ed. (2023).

C. Elaboración de los coagulantes modificados

Las semillas de moringa y de sandía fueron descascaradas, secadas, trituradas y tamizadas (malla N.° 50, 297 µm). El desgrasado se realizó mediante extracción Soxhlet con éter de petróleo en proporción 7:1, a 60-80 °C durante 7 horas. La torta desgrasada se sometió a un pretratamiento salino con solución de NaCl 1 mol/L, en relación 1,25:1 (solución:harina), con agitación magnética a 250 rpm durante 30 minutos; posteriormente se secó en estufa a 38 °C durante 12 h 20 min y se molió hasta obtener el coagulante final. El análisis proximal reportó un contenido proteico de 37,52 % en la harina de moringa y de 30,43 % en la de sandía, mientras que la espectroscopía FTIR-ATR confirmó en ambas matrices bandas de Amida I y Amida II, evidencia de su naturaleza proteica funcional (Fig. 9 y Fig. 10).

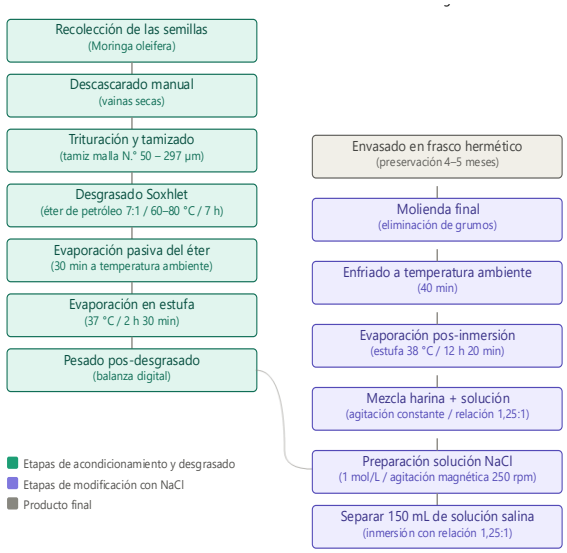


Figura 1. Elaboración de coagulante modificado de semillas de *Moringa oleifera* Lam

El proceso comprendió el descascarado manual, la trituración y el tamizado de las semillas, seguidos del desgrasado por Soxhlet, el pretratamiento salino por inmersión en NaCl 1 mol/L y el secado final, obteniéndose un coagulante estable durante 4-5 meses de almacenamiento.

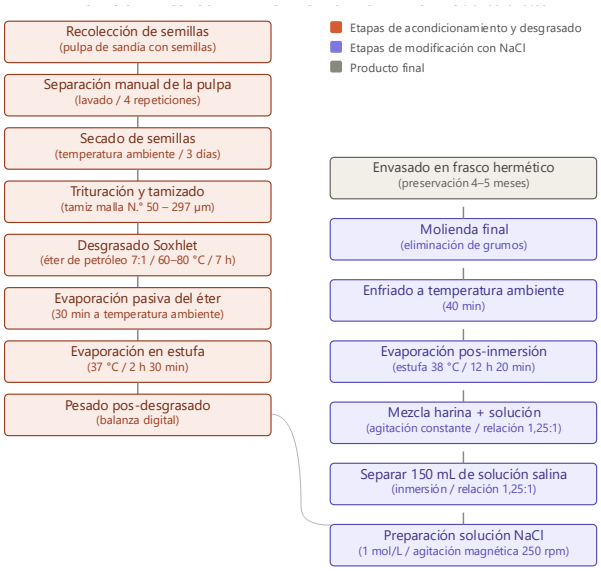


Figura 2. Elaboración de coagulante modificado de semillas de *Citrullus lanatus*

El procedimiento para la sandía siguió una secuencia equivalente, con la diferencia de que las semillas se obtuvieron por separación manual de la pulpa y se secaron a temperatura ambiente durante 3 días antes de la trituración y el tamizado, replicando en adelante las mismas condiciones de desgrasado y pretratamiento salino aplicadas a la moringa [25], [26], [27], [28], [29].

D. Pruebas de jarras y determinación de dosis y tiempos óptimos

La determinación de las dosis y los tiempos óptimos se realizó mediante pruebas de jarras, empleando un diseño factorial de 2 materias primas × 4 dosis (1,25; 2,30; 3,80 y 5,00 g/L) × 3 tiempos de contacto (20, 30 y 40 min) × 2 réplicas, con una fase de mezcla rápida de 150 rpm durante 2 minutos, una fase de mezcla lenta a 40 rpm durante el tiempo de contacto correspondiente y un periodo fijo de sedimentación de 40 minutos, siguiendo los criterios generales de la guía Jar Testing Student Guide [30]. La turbidez final se determinó con un turbidímetro portátil BANTE TB100 y la DBO_5 final mediante el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B. El porcentaje de remoción se calculó como $\%Remoción = [(C_0 – Cf)/C_0] \times 100$, y la reproducibilidad de cada tratamiento se evaluó mediante el coeficiente de variación, considerando aceptable un valor ≤ 10 % [31].

E. Costo de tratamiento y análisis estadístico

El costo de tratamiento por metro cúbico de agua se determinó a partir del costo total de producción de cada coagulante (suma del costo de materia prima y de insumos químicos), dividido entre el volumen total tratado durante la fase experimental (144 L). El análisis estadístico se realizó mediante un diseño factorial general y un análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba post hoc de Tukey al 95 % de confianza para identificar diferencias entre grupos, empleando el software Minitab versión 21.4 (2025).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización fisicoquímica y biológica del agua

La caracterización inicial del punto de muestreo, ubicado en el distrito de Reque, reportó un pH de 7,75, una turbidez de 151,4 NTU, una temperatura de 24 °C y una DBO_5 de 116 mg/L. Mientras que el pH se mantuvo dentro del rango permisible para la categoría 1, subcategoría A2, la turbidez y la DBO_5 superaron ampliamente los límites establecidos por el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, lo que evidencia la influencia de actividades antropogénicas en el tramo evaluado. Este nivel de turbidez fue superior al reportado por Díaz Pilco y Estrada Cárdenas en el río Caplina, Tacna, antes del tratamiento con moringa (90,66 NTU) [12], mientras que la DBO_5 inicial resultó considerablemente mayor a la registrada en el canal Mahmoudia, Egipto (6,65 mg/L), aunque muy inferior a la reportada en efluentes textiles de Kombolcha, Etiopía (480 mg/L) [16], [32]; esto sitúa al río Chancay como un cuerpo de agua superficial afectado por vertimientos agrícolas y domésticos moderados, antes que por una carga de tipo industrial.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y BIOLÓGICA DEL AGUA DEL RÍO CHANCAY

Parámetro	Unidad	Valor	ECA categoría 1-A2
pH	—	7,75	5,5 – 9,0
Turbidez	NTU	151,4	100
Temperatura	°C	24	—
DBO5	mg/L	116	N.E.*

B. Composición proximal y caracterización espectroscópica de los coagulantes

El análisis proximal de las harinas desgrasadas (Tabla II) reportó un contenido proteico de 37,52 % para moringa y de 30,43 % para sandía, diferencia coherente con la mayor reducción de masa registrada durante el desgrasado de la primera (24,32 % frente a 16,56 %).

TABLA II
COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LAS HARINAS DESGRASADAS (%)

Parámetro	Moringa	Sandía
Proteínas	37,52	30,43
Carbohidratos	39,27	49,12
Grasa	11,12	10,20
Cenizas	6,79	4,86
Humedad	5,30	5,39

La espectroscopía FTIR-ATR (450–4000 cm^{-1}) confirmó en ambas harinas bandas de Amida I y Amida II, evidencia directa de la conservación de la estructura proteica tras el pretratamiento salino (Tabla III).

TABLA III
GRUPOS FUNCIONALES FTIR IDENTIFICADOS EN LAS HARINAS DE MORINGA Y SANDÍA

Grupo funcional	Moringa (cm^{-1})	Sandía (cm^{-1})	Origen
Amida I (C=O)	1647	1634	Enlace peptídico

Grupo funcional	Moringa (cm⁻¹)	Sandía (cm⁻¹)	Origen
Amida II (N–H)	1539	1538	Proteínas
O–H	3286	3281	Hidroxilos / polisacáridos
N–H	3300	3298	Amidas
C–H	2925	2924	Cadenas alifáticas
C–O	1055	1030	Éteres / polisacáridos

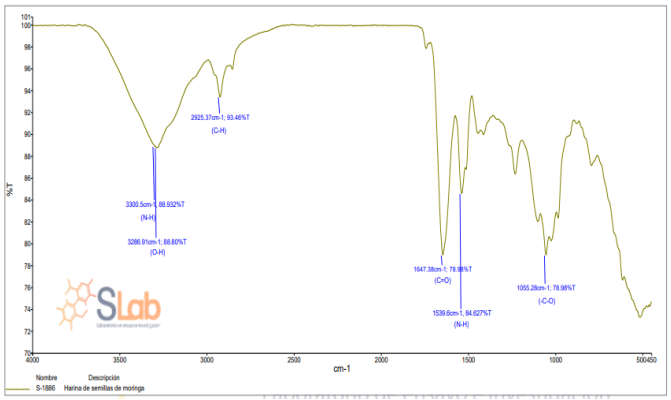


Figura 3. Espectros FTIR-ATR de la muestra moringa (s-1886)

El espectro FTIR-ATR de la muestra S-1886 fue registrado entre 450 y 4000 cm⁻¹ e identificó seis bandas de absorción. En la región de altas frecuencias se observaron dos señales solapadas alrededor de 3286 y 3300 cm⁻¹, correspondientes a vibraciones O–H y N–H, respectivamente; a 2925 cm⁻¹ se registró una absorción moderada atribuible a cadenas alifáticas. Las señales más relevantes se ubicaron entre 1700 y 1000 cm⁻¹, con dos absorciones pronunciadas a 1647 cm⁻¹ (Amida I) y 1539 cm⁻¹ (Amida II), seguidas de una banda intensa a 1055 cm⁻¹ en la zona de huella digital, asociada a polisacáridos estructurales.

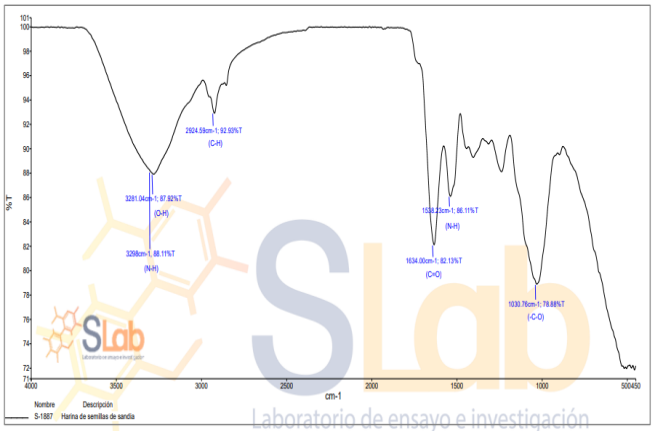


Figura 4. Espectros FTIR-ATR de la muestra sandía (s-1887)

El espectro FTIR-ATR de la muestra S-1887 fue registrado entre 450 y 4000 cm⁻¹ e identificó seis bandas de absorción. En la zona de altas frecuencias, la señal a 3281 cm⁻¹ reflejó vibraciones O–H propias de polisacáridos y humedad retenida tras el pretratamiento, mientras que la banda a 3298 cm⁻¹ evidenció tensiones N–H de grupos amida, señalando la presencia de proteínas en la matriz. A 2924 cm⁻¹ se detectó la vibración C–H de cadenas alifáticas, atribuible al contenido lipídico residual de la semilla. Las bandas más relevantes correspondieron a 1634 cm⁻¹ (Amida I) y 1538 cm⁻¹ (Amida II); la posición de la Amida I, desplazada hacia menores frecuencias respecto a la moringa, es indicativa de una mayor proporción de estructuras en lámina-β, características de globulinas de almacenamiento tipo 11S propias de cucurbitáceas.

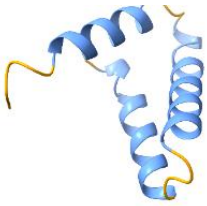


Figura 5. Modelo de las proteínas de *M. Oleifera* elaborado en chimerax

El modelo elaborado para M. oleifera (P24303, 60 aminoácidos) reveló una estructura compacta dominada por hélices-α, con segmentos desordenados en los extremos. Esta conformación helicoidal es coherente con la Amida I registrada a 1647 cm⁻¹ en el espectro FTIR, confirmando que las proteínas floculantes adoptan dicha arquitectura en estado nativo; además, su reducido tamaño favorece la exposición superficial de residuos cargados positivamente, mecanismo asociado a la neutralización de partículas coloidales en agua.



Figura 6. Modelo de proteínas de *C. Lanatus* elaborado en chimerax

El modelo tridimensional para C. lanatus (P13744, 480 aminoácidos) mostró una arquitectura más compleja, con láminas-β predominantes y hélices-α distribuidas periféricamente. Esta organización estructural es consistente con el desplazamiento de la Amida I hacia 1634 cm⁻¹ identificado en la muestra S-1887, típico de globulinas de almacenamiento con alta densidad de láminas antiparalelas. Este perfil espectral y estructural es coherente con el método descrito por Hounsinou et al., quienes combinaron extracción Soxhlet con tratamiento salino en NaCl 1 mol/L para obtener, a partir de semillas de moringa, un coagulante compuesto en 99 % de proteínas [11]; el procedimiento de desgrasado aplicado a las semillas de sandía, por su parte, coincide con el descrito por Endale et al. para semillas de *Citrullus lanatus* [13].

C. Eficiencia de remoción de turbidez y DBO5

Las 24 combinaciones experimentales evaluadas para cada materia prima alcanzaron remociones superiores al 95 % tanto

para turbidez como para DBO_5. La condición óptima de cada coagulante se resume en la Tabla IV.

TABLA IV
CONDICIONES ÓPTIMAS DE REMOCIÓN POR COAGULANTE

Coagulante	Dosis (g/L)	Tiempo (min)	Turbidez final (NTU)	DBO5 final (mg/L)	% Remoción
Moringa	1,25	20	1,39	1,07	99,08
Sandía	2,30	30	3,11	2,38	97,95

La harina de moringa alcanzó su mejor desempeño a 1,25 g/L con 20 minutos de contacto, reduciendo la turbidez de 151,4 a 1,39 NTU y la DBO_5 de 116 a 1,07 mg/L; la harina de sandía, en cambio, requirió una dosis mayor (2,30 g/L) y un tiempo de contacto de 30 minutos para alcanzar su óptimo de 97,95 % de remoción. En ambos casos se observó una relación no lineal entre la dosis y la eficiencia: dosis superiores a la óptima (3,80 y 5,00 g/L) produjeron una ligera disminución de la remoción, comportamiento que Díaz Pilco y Estrada Cárdenas también documentaron con moringa en el río Caplina, atribuyéndolo a un efecto de repulsión electrostática entre partículas por exceso de coagulante [12]. Un patrón similar reportó Rifi et al. en aguas residuales de almazaras, donde concentraciones de moringa superiores al punto óptimo (65 g/L) redujeron la eficiencia de remoción de turbidez [14]. Respecto al tiempo de contacto, este no mostró diferencias estadísticamente significativas al evaluarse de forma aislada (sección D), lo que coincide con lo señalado por Ahmed S. Abd Askar y Athraa Shakir Dakhil, quienes concluyeron que tiempos de contacto entre 15 y 25 minutos son suficientes para alcanzar la máxima remoción con semillas de moringa [32].

D. Análisis estadístico: ANOVA y prueba de Tukey

TABLA V
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TURBIDEZ Y DBO5 FINAL

Factor	F (Turbidez)	p (Turbidez)	F (DBO5)	p (DBO5)
Materia prima	0,17	0,682	0,17	0,683
Dosis (g/L)	17,56	0,000	17,57	0,000
Tiempo (min)	4,11	0,019	4,12	0,019
Interacción M×D×T	11,68	0,000	11,70	0,000

El modelo factorial general resultó significativo tanto para turbidez (F=18,59; p=0,000) como para DBO_5 (F=18,61; p=0,000), con coeficientes de determinación de 81,66 % y 81,68 %, respectivamente (Tabla V). La dosis fue el factor individual más influyente en ambas variables de respuesta (p=0,000), mientras que la materia prima no mostró diferencia significativa por sí sola (p=0,682-0,683); la prueba de Tukey confirmó esta equivalencia, agrupando a moringa y sandía en un mismo grupo homogéneo, con medias de turbidez final de 4,22 y 4,28 NTU, respectivamente. El tiempo de contacto alcanzó significancia únicamente dentro del modelo con interacciones (p=0,019), pero no al analizarse de forma aislada (p=0,395-0,396), lo que indica que su efecto depende de la dosis y la materia prima con las que interactúa. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Worku y Abate, quienes al evaluar moringa y cactus en aguas residuales textiles encontraron que la dosis y el tiempo de mezcla interactúan de forma significativa, y que dosis excesivas (5 y 8 g/L) generan reestabilización de partículas [16].

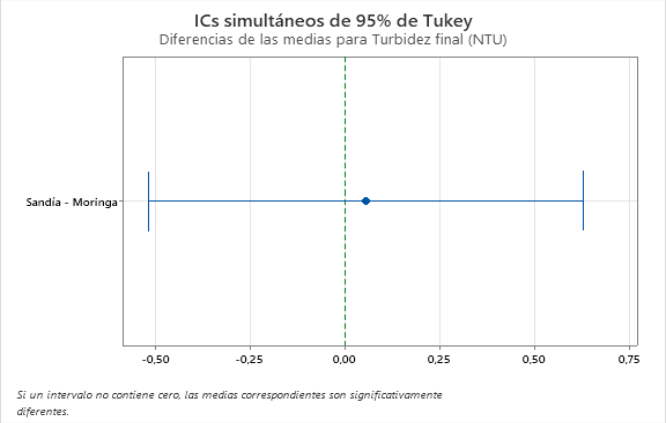


Figura 7. Intervalos de confianza de Tukey para turbidez final vs. materia prima

El intervalo de confianza para la diferencia entre moringa y sandía incluyó el valor cero, confirmando que la diferencia observada entre ambos coagulantes es atribuible al azar y no a un efecto real del tipo de materia prima empleada.

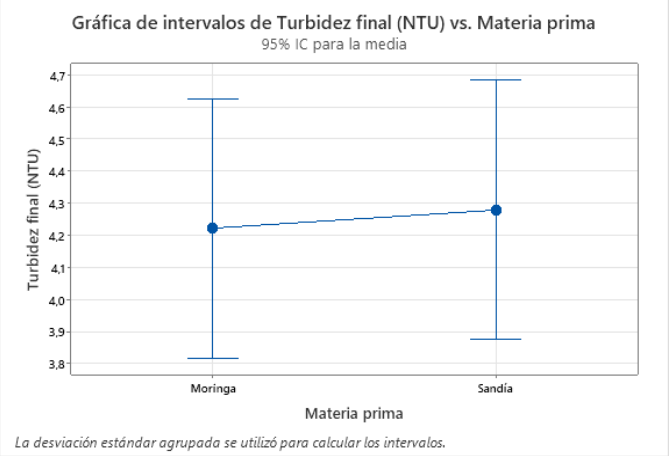


Figura 8. Intervalos de confianza de Tukey para turbidez final vs. dosis

La comparación entre dosis evidenció que 3,80 g/L produjo una turbidez significativamente mayor que 1,25 g/L, con un intervalo de confianza completamente positivo; en cambio, la comparación entre 5 y 3,80 g/L mostró una mejora parcial que no alcanzó la equivalencia con la dosis de 1,25 g/L, confirmando la relación no lineal entre dosis y eficiencia descrita en la sección C.

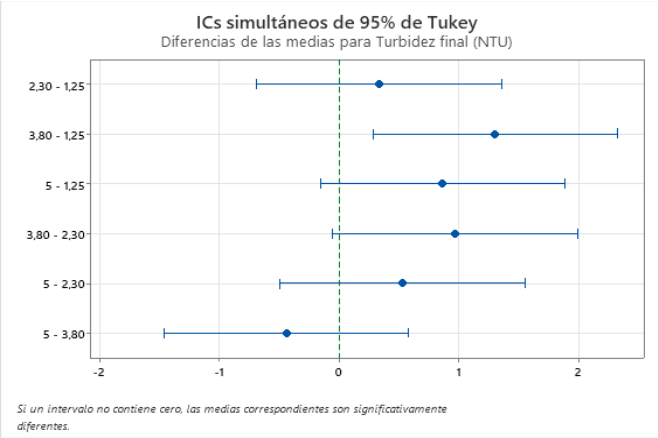


Figura 9. Intervalos de confianza de Tukey para DBO5 final vs. materia prima

De manera análoga a la turbidez, el intervalo de confianza para la diferencia de DBO_5 entre moringa y sandía cruzó completamente la línea de cero, lo que confirma que ambas materias primas son estadísticamente equivalentes también respecto a la remoción de materia orgánica.

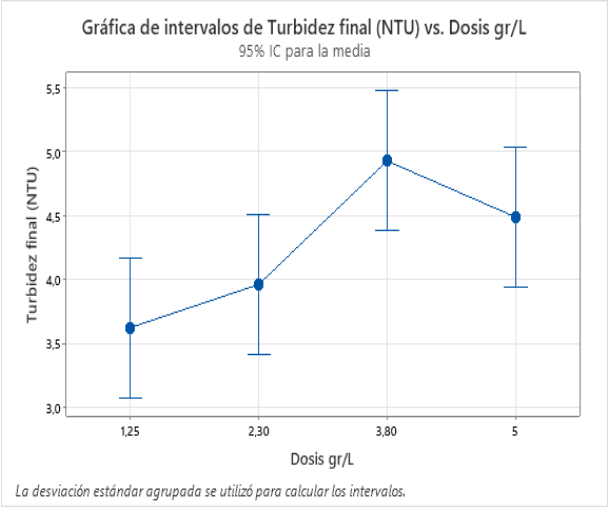


Figura 10. Intervalos de confianza de Tukey para DBO5 final vs. dosis

El patrón de agrupación de Tukey para DBO_5 replicó el observado para turbidez: la dosis de 1,25 g/L registró el valor más bajo (2,776 mg/L) y la de 3,80 g/L el más alto (3,775 mg/L), reforzando que el comportamiento no lineal de la dosis afecta de forma conjunta a ambos parámetros de respuesta (Tabla VI).

TABLA VI
AGRUPACIÓN DE TUKEY (95 % DE CONFIANZA) POR DOSIS DE COAGULANTE

Dosis (g/L)	Turbidez media (NTU)	DBO5 media (mg/L)	Grupo
1,25	3,623	2,776	B
2,30	3,961	3,034	A B
5,00	4,489	3,439	A B
3,80	4,928	3,775	A

E. Costo de tratamiento por metro cúbico

El costo de producción calculado para tratar el volumen experimental (144 L) fue de S/210,00 para el coagulante de moringa y de S/235,00 para el de sandía. Al proyectar estos valores a un metro cúbico de agua tratada, el costo resultante fue de S/2 916,67 para moringa y de S/3 263,89 para sandía, siendo la primera un 10,63 % más económica. Estos costos, elevados frente a coagulantes comerciales, corresponden a una escala de laboratorio en la que el éter de petróleo empleado en el desgrasado representa la fracción dominante del gasto; a escala productiva real, este insumo podría sustituirse por métodos de extracción de mayor rendimiento y menor costo unitario, tal como sugieren Díaz Pilco y Estrada Cárdenas respecto a la accesibilidad de la materia prima de moringa frente a coagulantes convencionales [12]. De manera similar, Bautista Rodríguez destaca que la viabilidad de los coagulantes naturales no depende únicamente de su eficiencia de remoción, sino también de la disponibilidad local de la materia prima y de los costos de producción, factores que determinan su escalabilidad [33]. En conjunto, estos resultados posicionan a la harina de moringa como la alternativa técnica y económicamente más favorable para el tratamiento del agua del río Chancay, sin descartar a la sandía como residuo agroindustrial de bajo costo como coagulante complementario en aplicaciones descentralizadas.

IV. CONCLUSIONES

Los coagulantes modificados obtenidos de semillas de *Moringa oleifera* Lam y *Citrullus lanatus* demostraron alta capacidad de remoción de turbidez y DBO5 en agua superficial del río Chancay, superando el 95 % de eficiencia en la totalidad de las combinaciones experimentales evaluadas. La harina de moringa con pretratamiento salino alcanzó la mayor remoción registrada en el estudio, 99,08 % tanto para turbidez como para DBO5, bajo condiciones de 1,25 g/L de coagulante, 20 minutos de contacto y 40 minutos de sedimentación. Estos resultados confirman que la modificación química con cloruro de sodio constituye un procedimiento eficaz para potenciar la actividad coagulante de matrices proteicas de origen vegetal, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible asociados al acceso a agua segura y al manejo responsable de residuos agrícolas.

La caracterización fisicoquímica y biológica del agua del río Chancay evidenció que el cuerpo hídrico presenta condiciones de pH dentro del rango permisible para la categoría 1, subcategoría A2 del Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM; no obstante, la turbidez de 151,4 NTU y la DBO5 de 116 mg/L superaron ampliamente los límites establecidos por dicha normativa. Esta condición fue atribuida a la influencia de vertimientos de origen agrícola y doméstico identificados durante el reconocimiento de campo, lo que evidencia la necesidad de implementar procesos de tratamiento orientados a la reducción de carga orgánica y sólidos en suspensión en el tramo evaluado.

El proceso de elaboración de las harinas desgrasadas y modificadas con NaCl permitió obtener coagulantes con contenido proteico relevante: 37,52 % en moringa y 30,43 % en sandía. La espectroscopía FTIR-ATR confirmó en ambas

matrices la presencia de bandas de Amida I y Amida II, indicativas de la conservación de la estructura proteica tras el pretratamiento salino. Las diferencias estructurales identificadas conformación predominante de hélices-α en moringa frente a láminas-β en sandía son coherentes con el distinto comportamiento observado durante la aplicación experimental, sin que ello implique una diferencia estadísticamente significativa en la eficiencia global de remoción entre ambas materias primas.

El análisis factorial general confirmó que la dosis de coagulante constituye el factor con mayor poder explicativo sobre la remoción de turbidez y DBO5 ($p = 0{,}000$), mientras que el tipo de materia prima no representó un factor diferenciador estadísticamente significativo ($p = 0{,}846$), lo que posiciona a ambas harinas como alternativas funcionalmente equivalentes bajo las condiciones estudiadas. Se identificó una relación no lineal entre la dosis y la eficiencia de remoción: concentraciones superiores al punto óptimo produjeron un efecto de reestabilización coloidal que redujo el desempeño del coagulante, independientemente de la materia prima empleada. El tiempo de contacto, evaluado de forma aislada, no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de 20, 30 y 40 minutos.

Desde la perspectiva económica, el costo de tratamiento por metro cúbico de agua fue de S/ 2 916,67 para la moringa y S/ 3 263,89 para la sandía, siendo el primer coagulante un 10,63 % más económico. Considerando de manera conjunta la mayor eficiencia de remoción alcanzada bajo su dosis óptima y el menor costo de producción, la harina de semillas de *Moringa oleifera* se consolida como la alternativa técnica y económicamente más favorable para el tratamiento del agua del río Chancay. La sandía, por su parte, se presenta como una opción viable para aplicaciones descentralizadas, dada su disponibilidad como residuo agroindustrial en la región Lambayeque y su desempeño equivalente al de la moringa desde el punto de vista estadístico.

REFERENCIAS

[1] Naciones Unidas, "Agua." Consultado: 14 sep. 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.un.org/es/global-issues/water

[2] C. Tuholske, B. S. Halpern, G. Blasco, J. C. Villasenor, M. Frazier y K. Caylor, "Mapping global inputs and impacts from of human sewage in coastal ecosystems," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 11, art. no. e0258898, nov. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0258898.

[3] K. Ortega-Quispe, L. Enriquez-Pinedo, M. Aliaga-Rojas, N. Carbajal Quispe, E. Solis-Porras y D. Ccopi-Trucios, "Impact of domestic wastewater discharge on organic load and thermotolerant coliforms in the Ichu River, Central Highlands of Peru," *Peruvian Agricultural Research*, vol. 6, no. 2, 2024, doi: 10.51431/par.v6i2.967.

[4] M. T. Herrera Pedraza *et al.*, "Analysis of wastewater treatment efficiency: Environmental consequences in a Peruvian district," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 117, pp. 301-306, jul. 2025, doi: 10.3303/CET25117051.

[5] C. D. Avila Sanchez y E. J. Diaz Lizana, "Mejora del proceso de tratamiento de efluentes de la PTAR Lambayeque para el cumplimiento de los límites máximos permisibles," tesis de título profesional, Fac. de Ingeniería, Univ. Tecnológica del Perú, Chiclayo, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12867/10622

[6] Centro de Operaciones de Emergencia Nacional, "Por déficit hídrico en el departamento de Lambayeque," Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú, Reporte de Peligro Inminente no. 059, reporte no. 1, 2 dic. 2024. [En línea]. Disponible en: https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2024/12/REPORTE-DE-PELIGRO-INMINENTE-N.º-059-2DIC2024-POR-DEFICIT-HÍDRICO-EN-EL-DEPARTAMENTO-DE-LAMBAYEQUE-1.pdf

[7] Autoridad Nacional del Agua, "Informe de evaluación PADH en la cuenca Chancay Lambayeque." Consultado: 19 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/1244588-informe-de-evaluacion-padh-en-la-cuenca-chancay-lambayeque

[8] D. Diver, I. Nhapi y W. R. Ruziwa, "The potential and constraints of replacing conventional chemical coagulants with natural plant extracts in water and wastewater treatment," *Environ. Adv.*, vol. 13, art. no. 100421, oct. 2023, doi: 10.1016/j.envadv.2023.100421.

[9] A. Al-Hanaktah, R. A. Al-Rafayia, A. H. Al-Ghbabsheh, A. E. Al-Rawajfeh, B. Mainali y M. K. Shahid, "A comparative analysis of defatted pumpkin seed extract and conventional coagulants for sustainable turbidity reduction in water and wastewater treatment," *Cleaner Water*, vol. 4, art. no. 100114, dic. 2025, doi: 10.1016/j.clwat.2025.100114.

[10] K. Ho *et al.*, "Review of starch-based coagulants for water treatment: Mechanisms, extraction and surface modification," *Next Sustainability*, vol. 5, art. no. 100083, 2025, doi: 10.1016/j.nxsust.2024.100083.

[11] P. S. Hounsinou *et al.*, "New method of producing a more efficient coagulant for the treatment of water from seeds of *Moringa oleifera*," *MethodsX*, vol. 11, art. no. 102485, dic. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102485.

[12] G. Díaz Pilco y F. Estrada Cardenas, "Efecto de la semilla de la *Moringa oleífera* en polvo como coagulante natural para la remoción de la turbidez del agua del río Caplina, Perú," *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 90, no. 1, pp. 52-62, 2024, doi: 10.37761/rsqp.v90i01.463.

[13] Y. Endale, Z. A. Samuel, S. Kebede y A. B. Bayu, "Blended natural and synthetic coagulants for the COD and BOD removal from surface water; optimization by response surface methodology: The case of Gibe river," *Heliyon*, vol. 10, no. 18, art. no. e37961, sep. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37961.

[14] S. K. Rifi *et al.*, "Optimization of coagulation process for treatment of olive oil mill wastewater using *Moringa oleifera* as a natural coagulant, CCD combined with RSM for treatment optimization," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 162, pp. 406-418, jun. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.04.010.

[15] W. M. Desta y M. E. Bote, "Wastewater treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera* seeds): Optimization through response surface methodology," *Heliyon*, vol. 7, no. 11, art. no. e08451, nov. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08451.

[16] G. D. Worku y S. N. Abate, "Efficiency comparison of natural coagulants (Cactus pads and *Moringa* seeds) for treating textile wastewater (in the case of Kombolcha textile industry)," *Heliyon*, vol. 11, no. 4, art. no. e42379, feb. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42379.

[17] W. M. Hoyos-Alayo, "Bibliometric analysis of urbanisation, land-use change and ecosystem services in urban and regional planning," *Rev. Bras. Meio Ambient.*, vol. 14, no. 1, pp. 209-236, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i1.2065.

[18] W. M. Hoyos-Alayo, "Bibliometric analysis of energy poverty and thermal comfort in the residential sector and social housing," *Rev. Bras. Meio Ambient.*, vol. 14, no. 2, pp. 2-28, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i2.2056.

[19] W. M. Hoyos-Alayo, "Carbon sequestration in tropical agroforestry systems: A bibliometric analysis of research trends and future perspectives," *Innovaciencia*, vol. 14, no. 1, 2026, doi: 10.15649/2346075X.6080.

[20] W. M. Hoyos-Alayo, "Construction project management with a circular economy and waste minimisation focus: A bibliometric analysis of its evolution and research trends," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 41, no. 1, pp. 1-17, 2026, doi: 10.7764/RIC.00173.21.

[21] W. M. Hoyos-Alayo, "Trends and perspectives on PFAS in drinking water and its regulation," *Nativa*, vol. 14, no. 2, art. no. e20377, 2026, doi: 10.31413/nat.v14i2.20377.

[22] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6.ª ed. México D. F., México: McGraw-Hill Education, 2014.

[23] C. Manterola, M. J. Hernández-Leal, T. Otzen, M. E. Espinosa y L. Grande, "Estudios de corte transversal. Un diseño de investigación a considerar en ciencias morfológicas," *Int. J. Morphol.*, vol. 41, no. 1, pp. 146-155, 2023, doi: 10.4067/S0717-95022023000100146.

[24] Autoridad Nacional del Agua, *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*, Lima, Perú, 2016. Consultado: 11 oct. 2025. [En línea]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-superficiales

[25] W. M. Hoyos-Alayo, J. E. Vélez-Verona, A. C. Pérez-Sandoval y A. L. Yenque-Aguilar, "Comparative effectiveness of emerging and conventional technologies for arsenic removal in drinking water: A systematic review (2015-2025)," en *Proc. LACCEI Int. Multiconf. Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD)*, 2025, doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.216.

[26] W. M. Hoyos-Alayo, J. L. Leiva-Piedra, J. L. Amaro-Mellado y E. Ramirez-Juidias, "Comparative evaluation of *Citrus aurantifolia* and *Passiflora edulis* peel flours as bioadsorbents for arsenic removal from drinking water," *Rev. Bras. Meio Ambient.*, vol. 14, no. 1, pp. 58-83, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i1.1980.

[27] W. M. Hoyos-Alayo y J. L. Leiva-Piedra, "Comparative evaluation of an organic and an inorganic coagulant in the clarification of vinasse: Dose optimization for BOD_5 and turbidity reduction," *Rev. Interdiscip. Ciênc. Apl.*, vol. 10, no. 15, pp. 1-12, 2026, doi: 10.18226/25253824.v10.n15.04.

[28] E. J. Cotrina-Urbina, W. M. Hoyos-Alayo, J. L. Leiva-Piedra y E. Ramirez-Juidias, "Determining the optimal dose of *Trichoderma harzianum* for the morphophysiological development of *Pinus radiata* seedlings in the nursery," *Rev. Bras. Meio Ambient.*, vol. 14, no. 2, pp. 102-126, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i2.2064.

[29] S. M. Jiménez-Hernández, J. D. Velásquez-Quesquén, J. L. Leiva Piedra, W. M. Hoyos-Alayo y C. A. Monteza Arbulu, "Bioremediation of arsenic in groundwater using residues of the fungus *Suillus luteus*," *Rev. Bras. Meio Ambient.*, vol. 14, no. 1, pp. 119-141, 2026, doi: 10.66205/rvbma.v14i1.1996.

[30] Texas Commission on Environmental Quality, *Jar Testing: How to Design and Perform Representative Jar Tests for a Surface Water Treatment Plant (SWTP)*, Student Guide, Texas Optimization Program, Directed Assistance Module 2B, rev. 8 sep. 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.tceq.texas.gov/downloads/drinking-water/plan-technical-review/assistance/dam-02b-jar-testing-student-guide.pdf

[31] U.S. Food and Drug Administration, *Q2(R2) Validation of Analytical Procedures: Guidance for Industry*, rev. 2, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.fda.gov/media/161201/download

[32] A. S. Abd Askar y A. S. Dakhil, "Efficiency of *Moringa oleifera* seeds as a natural alternative to the chemical coagulants in the drinking water treatment process," *J. Wildlife Biodivers.*, vol. 7, núm. especial, pp. 196-216, 2023, doi: 10.5281/zenodo.10212120.

[33] A. Bautista Rodriguez, "Evaluación de la dosis óptima de *Moringa* como coagulante-floculante en el tratamiento de agua del manantial Tumpa Puquio-Huancavelica," tesis de título profesional, Esc. Acad. Prof. de Ingeniería Ambiental, Univ. Continental, Huancayo, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12394/16079