

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LA SEMILLA DE MORINGA
OLEÍFERA COMO POTENCIAL AGENTE COAGULANTE EN EL
TRATAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL**

ESTUDIANTES

WLADIMIR ALEJANDRO GUANO ORTIZ (202026787)

JUAN CAMILO MURCIA VIVEROS (202025950)

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Sanitarios y Ambientales

DIRECTORAS

PATRICIA TORRES LOZADA

Ingeniera Sanitaria, PhD.

Prof. Titular - Escuela EIDENAR

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental - ECCA

ANDREA PÉREZ VIDAL

Ingeniera Sanitaria, PhD.

Prof. Asociada - Escuela EIDENAR

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental - ECCA



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

CALI, VALLE DEL CAUCA

2025

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
1.0 INTRODUCCIÓN.....	7
2.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3.0 ANTECEDENTES.....	9
4.0 OBJETIVOS	14
4.1 Objetivo general	14
4.2 Objetivos específicos.....	14
5.0 REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
5.1 Sistemas de tratamiento de agua potable.....	14
5.1.1 Tratamiento convencional o de ciclo completo.....	16
5.2 Coagulación.....	17
5.2.1 Coagulantes inorgánicos	19
5.2.2 Coagulantes orgánicos.....	20
6.0 MATERIALES Y MÉTODOS	29
6.1 Análisis bibliométrico enfocado en la aplicabilidad de la Moringa Oleífera (MO) como agente coagulante en el tratamiento de agua potable.....	29
6.2 Ensayos experimentales a escala de laboratorio.....	32
6.2.1. Obtención y preparación del polvo de semillas de MO en su aplicación de ensayos de jarras como coagulante orgánico.....	33
6.2.1.1 Fase 1: Evaluación preliminar.....	33
6.2.1.2 Fase 2: Evaluación final	37
7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
7.1 Análisis bibliométrico	40
7.1.1 Caracterización de la Producción Científica: Áreas Temáticas y Tipología Documental (1995-2025)	40
7.1.2 Caracterización Físicoquímica y Proteica de la MO.....	47
7.1.3 Métodos de Preparación y Extracción en el Rendimiento del Coagulante	50
7.1.4 Parámetros clave para el uso eficiente de la MO como coagulante orgánico	55
7.1.5 Decisiones derivadas del análisis bibliométrico para la fase experimental.....	58
7.2. Ensayos experimentales a escala de laboratorio.....	61
7.2.1 Fase 1: Evaluación preliminar.....	61
7.2.2 Fase 2: Evaluación final	68
8.0 CONCLUSIONES	77
9.0 RECOMENDACIONES	79
ANEXOS.....	80
REFERENCIAS.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estudios a nivel internacional del uso de MO como coagulante orgánico.....	13
Tabla 2. Estudios a nivel nacional del uso de MO como coagulante orgánico	13
Tabla 3. Beneficios encontrados en estudios realizados con la planta de moringa oleífera (MO)	25
Tabla 4. Recopilación de ventajas y limitaciones relacionadas con el potencial de aplicación del coagulante natural a base de semillas de MO.	27
Tabla 5. Ecuaciones aplicadas en la búsqueda de información bibliográfica relacionada con el uso de MO en el tratamiento de agua.	31
Tabla 6. Condiciones operativas de las pruebas de jarras preliminares para simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación	35
Tabla 7. Cantidad de coagulante de MO en polvo aplicado directamente en la prueba de jarras y su equivalencia en dosis de mg/L	36
Tabla 8. Cantidad de coagulante de MO en polvo aplicado directamente en la prueba de jarras finales y su equivalencia en dosis de mg/L	39
Tabla 9. Criterios de calidad para la solución de Moringa Oleífera (MO).....	50
Tabla 10. Comparación de métodos de extracción de la MO.....	54
Tabla 11. ANOVA y coeficiente de correlación para el coagulante en solución de MO en agua destilada	65
Tabla 12. ANOVA y coeficiente de correlación para el coagulante de MO en solución salina.....	65
Tabla 13. Valores de pH y Alcalinidad luego de aplicar coagulante de semillas de MO ..	66
Tabla 14. Resumen de varianzas para los resultados de pH y alcalinidad según las formas de aplicación del coagulante de MO.....	67
Tabla 15. Resumen de ANOVA y coeficiente de correlación según la forma de aplicación (Agua destilada, Solución salina, Aplicación de polvo) del coagulante de MO.	72
Tabla 16. Resumen de ANOVA para los resultados de pH y alcalinidad post aplicación del coagulante de MO según nivel de turbiedad para las pruebas finales.	73
Tabla 17. ANOVA del volumen de lodo con coagulante de MO según nivel de turbiedad	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologías y procesos de tratamiento de agua para consumo humano.....	15
Figura 2. Tren de tratamiento en sistemas convencionales de potabilización de agua	17
Figura 3. Ubicación del cultivo de MO alrededor del mundo.	22
Figura 4. Zonificación de sitios potenciales para el cultivo de moringa oleífera en Colombia.	23
Figura 5. Usos de la planta de MO en función de sus partes.	24
Figura 6. Pasos de investigación bibliométrica.	30
Figura 7. Ruta metodológica para la obtención del coagulante.	33
Figura 8. Soluciones realizadas para la obtención del coagulante.	34
Figura 9. Esquema del diseño experimental para la evaluación preliminar.	36
Figura 10. Ruta metodológica para la obtención del coagulante en la evaluación final.. ...	38
Figura 11. Esquema del diseño experimental para pruebas finales.	40
Figura 12. Áreas de conocimiento relacionadas con los estudios de MO entre 1995 y 2025.	41
Figura 13. Gráfico de barras y mapeo de influencia de investigación por autores	42
Figura 14. Evolución del número de publicaciones y regiones relacionadas con el uso de la MO como coagulante entre 1995 y 2025.	44
Figura 15. Visualización en red del mapa de palabras clave de investigación de estudios relacionados con MO.	45
Figura 16. Clasificación y porcentaje en peso de los aminoácidos que componen la proteína activa de MO.	48
Figura 17. Procesos para la preparación del coagulante orgánico.....	51
Figura 18. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 26 UNT.	61
Figura 19. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 140 UNT.	62
Figura 20. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 300 UNT.	62
Figura 21. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 26 UNT.....	68
Figura 22. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 140 UNT.....	69
Figura 23. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 300 UNT.....	69
Figura 24. Comparación de la reducción de turbiedad del agua cruda con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO.....	71

RESUMEN

En Colombia, las fuentes superficiales constituyen la principal alternativa de abastecimiento de agua potable, tratadas en su mayoría mediante el método convencional (coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida, desinfección y estabilización química) que emplea coagulantes inorgánicos a base de sales de aluminio y hierro. Como opción más sostenible, se ha propuesto el uso de coagulantes orgánicos, entre ellos la Moringa oleífera - MO por su bajo costo, disponibilidad y carácter biodegradable.

Este trabajo evaluó el potencial coagulante de las semillas de MO en el tratamiento del agua cruda del río Meléndez a través de dos etapas. Primero, se realizó un análisis bibliométrico que permitió consolidar un panorama sobre el uso de la MO como coagulante, identificando ventajas, limitaciones, métodos de preparación, rangos de concentración y condiciones operativas (turbiedad inicial, dosificación, tiempos de mezcla y sedimentación). En la segunda etapa, que comprendió el desarrollo experimental, se desarrollaron en dos fases: i) evaluación preliminar, con ensayos de jarras en tres niveles de turbiedad (26, 140 y 300 UNT), tres modalidades de aplicación (soluciones en agua destilada, soluciones salinas y polvo de semilla) en tres concentraciones 2%, 3% y 5%, y (ii) evaluación final, enfocada en la solución al 2 % en agua destilada y el polvo, incorporando ajustes metodológicos a un rango de 24 dosis por cada modalidad de aplicación de coagulante comprendidas entre 15–300 mg/L. Las variables de respuesta fueron turbiedad final (≤ 5 UNT), pH, alcalinidad, características de flóculos y volumen de lodos, cada una medida en tiempos de sedimentación de 10 y 30 minutos. Los resultados se representaron gráficamente y se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias entre las formas de aplicación y las concentraciones probadas.

Los resultados del análisis bibliométrico permitieron realizar el diseño experimental tras conocer una visión general de las fuentes documentales y los tipos de estudios analizados, seguido de un enfoque específico en el papel y los mecanismos de acción de la MO, asimismo, se identificó los componentes proteicos de la semilla, así como aspectos clave (dosis, pH, alcalinidad, tiempos de sedimentación, velocidad de sedimentación, condiciones de almacenamiento y características del lodo generado), se conocieron los principales limitantes de la implementación del coagulante como la falta de caracterización de las semillas y ausencia de metodologías estandarizadas de preparación.

Experimentalmente, con la evaluación preliminar se determinó que el coagulante orgánico presentó limitaciones en las tres condiciones de turbiedad evaluadas (26, 140 y 300 UNT), ya que ninguna forma de aplicación alcanzó de manera consistente el valor de turbiedad final (≤ 5 UNT). Para el caso de la evaluación final en aguas de baja turbiedad (26 UNT) la MO no logró cumplir de forma consistente el valor de referencia y, con las dosis (≥ 225 mg/L) incrementó la turbiedad por el aporte de sólidos. En turbiedad media (140 UNT), el polvo mostró mejor desempeño que la solución de MO al 2% en agua destilada (98 %, 3.83 UNT,

dosis 300 mg/L frente a 96 %, 5.10 UNT, dosis 300 mg/L respectivamente), y en alta turbiedad (300 UNT) alcanzó los mejores resultados (99 %, 2.90 UNT, dosis 300 mg/L con polvo y 98.5 %, 4.60, dosis 300 mg/L con solución). En todos los escenarios, la menor turbiedad residual se alcanzó con la aplicación directa del polvo, con dosis elevadas (300 mg/L) y a tiempos de sedimentación de 30 minutos. Pese a haber alcanzado algunas condiciones experimentales apropiadas desde el punto de vista de la eficiencia de remoción de turbiedad logrando valores menores a 5 UNT, un aspecto desfavorable fue la cantidad de lodos generados, que presentaron un aumento proporcional a la turbiedad inicial.

El estudio concluyó que el coagulante orgánico de MO no demostró los resultados acorde a lo reportado en la literatura; si bien, tanto el polvo de semilla y la solución al 2% en agua destilada demostraron menor impacto en el pH y alcalinidad, en general, los resultados relacionados a la turbiedad residual obtenidos en la evaluación preliminar y final, sugieren que la MO no es un coagulante primario adecuado, por lo que se recomienda considerar su evaluación como un ayudante de coagulación, lo cual podría reducir el uso de coagulantes inorgánicos. Adicionalmente, se recomienda avanzar en la estandarización de su preparación, incorporando procesos como el desengrasado de semillas, la cuantificación de proteínas activas y la uniformidad del tamaño de partícula, además de monitorear el carbono orgánico total (COT) residual en el agua tratada.

Palabras clave: Coagulación orgánica; potabilización de agua; moringa oleífera; turbiedad; pH.

1.0 INTRODUCCIÓN

En el transcurso de la existencia humana, el uso y consumo del agua ha sido el pilar del desarrollo de la sociedad en sus distintos componentes económicos, políticos y sociales, lo cual ha llevado a la elaboración de un estrecho vínculo con la supervivencia, la salud pública y la resolución de necesidades (Meza et al., 2018). En este sentido, la calidad del agua para consumo humano cobra gran relevancia, pues según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2023, la baja calidad del agua se relaciona con bajas condiciones de saneamiento e higiene, lo que resulta en la muerte de más de 505.000 personas por año a nivel mundial, a causa de enfermedades diarreicas.

A pesar de la importancia de esta situación, los sistemas de abastecimiento en los países en desarrollo, especialmente en pequeños municipios y áreas rurales, enfrentan desafíos significativos. Los elevados costos operativos, problemas en la operación y mantenimiento, y dificultades para monitorear la eficacia de los procesos, especialmente ante fluctuaciones hidro-climatológicas, afectan directamente la capacidad de los sistemas para manejar parámetros críticos de calidad como la turbiedad, el pH, la conductividad, la presencia de compuestos orgánicos disueltos y la concentración de microorganismos patógenos (Sánchez, & Quiroga, 2020). Esta situación aumenta la necesidad de implementar tecnologías eficientes y adaptables que puedan garantizar un suministro seguro y constante de agua potable, incluso en condiciones adversas (Yimer et al., 2021).

Los procesos de coagulación y floculación son útiles para la eliminación de sólidos suspendidos coloidales, causantes de turbiedad y color aparente. Para tal fin, se pueden emplear coagulantes químicos como el sulfato de aluminio y cloruro férrico (Arboleda, 1992) o coagulantes orgánicos naturales obtenidos a partir de plantas y semillas (Oledora & Adebayo, 2018) y crustáceos y microorganismos (Carmona, 2012). Estas sustancias propician en la coagulación, la desestabilización de las partículas coloidales presentes, las cuales se aglutinan en la floculación, alcanzando un peso específico mayor al del agua, lo que facilita su sedimentación y posterior remoción (Arboleda, 1992).

Aunque los coagulantes químicos presenten grandes eficiencias, algunas sustancias o subproductos propios de sus componentes, pueden permanecer en el agua tratada en forma residual, lo que lleva a la alteración de otros parámetros críticos como el pH, la conductividad y la alcalinidad, convirtiéndose en un riesgo ante la ingesta y la acumulación de estas sustancias en el medio ambiente (Flaten, 2001) y demandando más procesos para la estabilización química del agua tratada. Por su parte, los coagulantes naturales no generan sustancias residuales, ni alteran significativamente otros parámetros. Tal es el caso de las semillas de *Moringa oleífera* (MO), que se presentan como un destacado coagulante orgánico el cual posee entre sus componentes, una proteína catiónica soluble en agua que facilita la coagulación del material coloidal presente en el agua turbia (Fuentes et al., 2016). Teniendo en cuenta los beneficios del uso de las semillas de MO como coagulante, en el presente

trabajo de grado se evaluó su potencial aplicación como coagulante orgánico en el tratamiento del agua cruda del río Meléndez.

2.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las sustancias químicas coagulantes más utilizadas en el tratamiento de agua son principalmente las sales de hierro y aluminio (Cogollo, 2011); aunque su aplicación es altamente efectiva para la remoción de turbiedad y materia coloidal, puede generar alteraciones en la calidad del agua tratada, especialmente en parámetros como el pH, la alcalinidad y la relación entre cloruros y sulfatos, otorgándole características corrosivas que pueden afectar la integridad de los sistemas de distribución, además de incrementar la producción de lodos con mayores contenidos de metales residuales (Saleem & Bachmann, 2019; Yin, 2010). En cuanto a la salud humana, las concentraciones residuales de estas sustancias deben mantenerse dentro de los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales, como lo señalan las Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), que indican que mientras dichos valores no se superen (por ejemplo, 0,1 a 0,2 mg/L para el aluminio en sistemas convencionales), los riesgos se consideran tolerables. Sin embargo, cuando las concentraciones exceden estos límites o la exposición es prolongada, pueden presentarse efectos adversos sobre las células epiteliales del intestino y el sistema nervioso, asociados con deterioro cognitivo, enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer, cáncer y enfermedades óseas (Meza et al., 2018). Por ello, el uso de coagulantes metálicos requiere un control riguroso tanto en el proceso de tratamiento como en la vigilancia de los residuos en el agua de consumo, a fin de asegurar la inocuidad del recurso y proteger la salud pública.

En Santiago de Cali, el sistema de tratamiento de agua potable enfrenta desafíos técnicos derivados de la variabilidad estacional del río Meléndez, una de las principales fuentes superficiales de abastecimiento. Su agua es tratada en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) La Reforma, que en condiciones normales suministra el servicio a 120,000 habitantes (aprox. 5,5 % de la población de la ciudad). Durante los periodos de estiaje, la capacidad de producción disminuye significativamente y el suministro debe complementarse con otras plantas. Según las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda, que varían entre la época seca y la lluviosa, la PTAP La Reforma puede operar en ciclo completo (tratamiento convencional), filtración directa o filtración en línea, ajustando la dosificación de coagulantes y los parámetros hidráulicos. La coagulación química con sales metálicas puede generar descensos en la alcalinidad (10–20 mg/L de CaCO_3) y el pH, aumentando la agresividad o potencial corrosivo del agua en las redes de distribución (IWA, 2012), por lo que se requiere un monitoreo y control constante de la estabilidad química para preservar la integridad del sistema y la calidad del agua entregada a los usuarios (López et al., 2018).

En este contexto, el uso de coagulantes naturales, como la *Moringa Oleífera* (MO), se plantea como una alternativa que podría minimizar los impactos negativos asociados al empleo de coagulantes inorgánicos, mejorar la sostenibilidad del tratamiento del agua y ofrecer una solución más eficiente y menos problemática en términos de la variación del pH y la alcalinidad del agua tratada (Saleem & Bachmann, 2019; Oladoja & Adebayo, 2018). Por lo tanto, en esta investigación se evaluó la eficiencia como coagulante, de las semillas de MO, para el tratamiento del agua del río Meléndez con tres niveles de turbiedad (26, 140 y 300 UNT).

3.0 ANTECEDENTES

La tecnología de tratamiento predominante en los procesos de potabilización es la denominada convencional o de ciclo completo, que comprende las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y estabilización química (Di Bernardo & Sabogal, 2008). Aunque en la actualidad es común el uso de coagulantes químicos, técnicas de tratamiento como la molienda y estratificación con materiales vegetales, se han empleado desde la antigüedad para mejorar la calidad del agua. Por ejemplo, en la sociedad egipcia de alrededor de 2000 a.C., se utilizaban derivados de almendras para tratar el agua extraída de los ríos (Bratby, 2006).

En tiempos más recientes, el uso de moringa oleífera (MO) ha ganado relevancia, al encontrarse que las semillas de esta planta almacenan una proteína catiónica soluble en agua que le otorga las propiedades coagulantes, fomentando la desestabilización de partículas coloidales por medio de adsorción y neutralización de cargas, dando lugar a la remoción de turbiedad y microorganismos durante la sedimentación posterior.

Las comunidades africanas han sido pioneras en utilizar las semillas de este árbol como coagulante natural a raíz de su disponibilidad en la zona (Pritchard et al., 2010); el mismo autor destaca la capacidad de un solo árbol de MO para producir alrededor de 2000 semillas al año, lo que permite tratar aproximadamente 6000 litros de agua. Con un cultivo adecuado, esta cantidad puede aumentar de 5 a 10 veces, permitiendo el tratamiento de hasta 60,000 litros de agua anualmente (Pritchard et al., 2010). Este potencial ha llevado a la adopción de la MO como coagulante en países como India, China, y otras partes del mundo, incluyendo Latinoamérica, destacándose como una opción prometedora y sostenible en el tratamiento de agua (Bongiovani et al., 2014).

Pese al potencial de aplicación de esta materia prima como coagulante natural, la obtención del componente activo en forma de coagulante no se encuentra patentada y tampoco cuenta con una metodología estandarizada. Por esta razón, las investigaciones realizadas, se han enfocado en el estudio del desempeño del coagulante elaborado bajo la metodología definida

por el autor, por lo que difieren en la utilización y características del solvente para diluir las semillas de MO, la concentración y la dosificación del coagulante o la inclusión de pasos más sofisticados, al realizar procesos adicionales como el desengrasado de la semilla y la implementación de equipos industrializados, por lo que los resultados alcanzados también llegan a ser cambiantes (Bongiovani et al., 2014).

La utilización de MO como coagulante ha mostrado eficiencias de remoción de turbiedad superiores al 90%, especialmente en aguas con turbiedad media o alta. Asimismo, presenta un comportamiento más favorable que coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, al no alterar significativamente el pH del agua tratada y producir un lodo más fácilmente manejable. Sin embargo, su eficacia disminuye notoriamente en aguas con baja turbiedad (generalmente <50 UNT), lo que limita su aplicabilidad universal, especialmente en fuentes de agua relativamente limpias que requieren solo un tratamiento final (Magalhães et al., 2021).

Es fundamental analizar no solo la eficiencia porcentual en la remoción de turbiedad, sino también el valor final alcanzado, dado que la normativa de calidad del agua establece límites sobre la turbiedad del agua tratada y no sobre los porcentajes de reducción. En este sentido, Baptista et al. (2015), en su estudio “Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water”, emplearon un extracto salino ultrafiltrado de MO como coagulante. Con una turbiedad inicial de 75 UNT y una dosis de 13 mg/L, se obtuvo una remoción del 88,75%, equivalente a una turbiedad remanente de aproximadamente 8.44 UNT. De manera complementaria, Fera et al. (2014), trabajando con aguas del río Sinú, resaltaron la relevancia de la turbiedad inicial en la eficiencia del proceso. Al aplicar dosis entre 2,50 y 30 ppm de MO en solución salina, lograron eficiencias cercanas al 90% en muestras con más de 90 UNT de turbiedad inicial, lo que se traduce en valores finales próximos a 9 UNT, comparables con los reportados por Baptista et al. (2015). No obstante, en aguas con menos de 66 UNT, las eficiencias de remoción disminuyeron a un rango del 70% al 85%, lo que, para una turbiedad inicial de 66 UNT, representa valores finales entre 9.90 y 19.80 UNT, considerablemente superiores y menos favorables frente a los límites normativos.

Ali et al. (2009) demostraron la eficacia del polvo de semillas de MO aplicado directamente en aguas de río con alta turbiedad, alcanzando remociones de hasta el 99,30%. Considerando una turbiedad inicial de 500 UNT, este resultado correspondería a un valor final cercano a 3.50 UNT, dentro de los estándares de agua potable. De manera similar, Hernández et al. (2021) realizaron un estudio en Colombia utilizando polvo de semillas de MO en una fuente de agua superficial con turbiedad inicial de 170 UNT, logrando una remoción del 96,80% y una turbiedad remanente aproximada de 5.44 UNT.

Además, el estudio de Al-Jadabi et al., (2023) subrayó la doble función de las semillas de MO como coagulante y absorbente ecológico en el tratamiento de aguas. Este estudio destacó que el uso de polvo de semillas no genera subproductos tóxicos, señalando una baja incidencia en la variación de otros parámetros como pH y alcalinidad, lo que lo convierte en una alternativa sostenible, económica y viable para el tratamiento de agua potable, especialmente en comunidades con acceso limitado a tecnologías avanzadas.

A pesar de estos beneficios, la percepción de MO como una “solución verde” requiere un análisis más crítico. Diversas investigaciones han advertido sobre posibles efectos adversos del uso de extractos de MO, como el aumento del carbono orgánico disuelto (COD), que puede favorecer el recrecimiento microbiano en las redes de distribución, además de servir como precursor para la formación de subproductos de desinfección (DBPs) si el agua es posteriormente clorada. También se han reportado efectos citotóxicos bajo ciertas condiciones de extracción o uso de altas dosis, lo que subraya que el hecho de que un coagulante sea de origen natural no garantiza automáticamente su inocuidad o sostenibilidad (Meetiyagoda et al., 2025).

Otro aspecto crucial es la dificultad de aplicar eficazmente los métodos de extracción y procesamiento de MO en contextos de bajos recursos. Si bien las semillas de MO están disponibles localmente en muchas regiones que más necesitan soluciones accesibles para el tratamiento del agua, los protocolos más eficaces desarrollados en laboratorios suelen incluir etapas como el desengrasado, el uso de soluciones salinas específicas (NaCl), el control preciso del pH o la utilización de equipos no disponibles en zonas rurales. Esta brecha entre la investigación científica y la aplicación práctica limita el impacto potencial de MO en comunidades vulnerables. Algunos estudios han propuesto métodos de extracción simplificados, pero su eficacia comparativa aún requiere más validación (Soto et al., 2025).

Asimismo, la variabilidad intrínseca en la composición de las semillas de MO representa un desafío importante para la estandarización del tratamiento. Factores como la variedad genética, las condiciones de cultivo (tipo de suelo, clima, disponibilidad hídrica), el grado de madurez de la semilla y las condiciones de almacenamiento post-cosecha pueden afectar significativamente la actividad coagulante de los extractos. Esta variabilidad dificulta la determinación de dosis óptimas y la reproducibilidad de los resultados entre diferentes regiones o lotes de semillas (Soto et al., 2025).

Con el objetivo de optimizar su uso, las investigaciones se han centrado en la identificación de los compuestos activos responsables de la coagulación, destacándose un grupo de proteínas catiónicas solubles en agua, con bajo peso molecular (aproximadamente entre 6 y 16 kDa) y punto isoeléctrico elevado (entre 10 y 11), lo cual les otorga una carga neta positiva en el rango de pH típico del agua natural (Sheth et al., 2024).

A manera de síntesis, en las Tablas 1 y 2 se presentan diferentes investigaciones a nivel internacional y nacional en las que se han evaluado el uso de la MO con coagulante según el contexto de cada localidad, destacando en su mayoría resultados favorables en la reducción de la turbiedad.

El análisis detallado de la literatura científica de lo recopilado en las Tablas 1 y 2 revela que todos los estudios revisados implementan el proceso convencional de tratamiento de agua basado en la secuencia Coagulación–Floculación–Sedimentación (C–F–S), simulado en laboratorio mediante la técnica estandarizada de la Prueba de Jarras (Jar Test), que permite identificar las condiciones óptimas de operación. No obstante, a pesar de emplear este marco común, se observan diferencias significativas entre estudios en cuanto a la configuración de los parámetros operativos, en particular las velocidades y tiempos de agitación durante las fases de mezcla rápida y lenta, así como los tiempos de sedimentación.

En la fase de mezcla rápida (coagulación), etapa inicial de alta energía cuyo objetivo es dispersar rápida y uniformemente el coagulante en toda la masa de agua para desestabilizar las partículas coloidales, los estudios reportan velocidades que oscilan entre 100 y 250 rpm, con tiempos de agitación de 1 a 4 minutos. Por ejemplo, Sánchez-Martín et al. (2010) utilizaron 100 rpm durante 2 minutos, Asrafuzzaman et al. (2011) aplicaron una agitación más intensa de 200–250 rpm durante 1–3 minutos, y Núñez et al. (2007) emplearon 200 rpm durante 4 minutos. En la fase de mezcla lenta (floculación), que reduce la velocidad para facilitar la colisión y agregación de las partículas desestabilizadas, se reportan condiciones entre 30 y 40 rpm durante un rango de 15 a 40 minutos, dependiendo de las características del agua tratada. Asrafuzzaman et al. (2011) establecieron un rango de 20–60 minutos; Sánchez-Martín et al. (2010) utilizaron 60 minutos; Egbuikwem y Sangodoyin (2013) mencionan un tiempo extendido de 2 horas, asociado a una mayor reducción de la carga bacteriana. En contraste, Gutiérrez et al. (2022) no especifican este parámetro, aunque se infiere su aplicación como parte inherente del procedimiento.

Tabla 1. Estudios a nivel internacional del uso de MO como coagulante orgánico.

País	Fuente de agua	Turbiedad (UNT)		% Reducción turbiedad	Dosis de MO (ppm)	pH		Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)		Tipo de Extracción de la MO	Ref.
		Inicial	Final			Inicial	Final	Inicial	Final		
Reino unido	Fuente superficial	49	4,90	90,00	100	7,50	7,20	120	110	Agua destilada	Pritchard et al (2009)
Bangladesh	Agua sintética	105	5,90	94,10	50	-	-	-	-	Agua destilada	Asrafuzzaman et al (2011)
		48	14,70	69,20							
España	Fuente superficial	80	4,00	95,00	60	7,80	7,40	120	110	Agua destilada	Sánchez et al (2010)
Estados unidos	Agua sintética	80	5,00	93,00	20	6,00	6,50	-	-	-	Miller et al (2008)
Venezuela	Fuente superficial	120	6,00	95,00	100	6,90	7,50	100	95	Agua destilada	Caldera et al (2017)
Ecuador	Fuente superficial	150	4,00	97,00	100	5,80	7,40	120	110	solventes orgánicos	Gutiérrez (2022)
Honduras	Fuente superficial	210	8,00	96,00	100	8,50	7,50	120	115	Agua destilada	Núñez (2007)
Perú	Fuente superficial	50	5,00	98,00	25	7,60	7,40	-	-	Agua destilada	Rivera (2012)
Nigeria	Fuente superficial	200	5,00	97,50	100	7,30	7,20	110	105	Aplicación en polvo	Egbuikwem & Sangodoyin (2013)
Brasil	Agua sintética	150	5,00	96,00	75	7,50	7,30	120	115	Aplicación en polvo	Santos et al. (2016)
India	Fuente superficial	180	4,20	97,60	50	7,20	7,10	115	110	Aplicación en polvo	Katayon et al. (2006)

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 2.** Estudios a nivel nacional del uso de MO como coagulante orgánico.

Ciudad	Fuente de agua	Turbiedad (UNT)		% Reducción turbiedad	Dosis de MO (ppm)	pH		Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)		Tipo de Extracción de la MO	Ref.
		Inicial	Final			Inicial	Final	Inicial	Final		
Malambo	Fuente superficial	56,5	0,1	99,90	100	7,27	7,00	137	125	Agua destilada	Meza et al (2018)
Córdoba	Fuente superficial	364	7,50	97,900	150	8,00	7,50	56	50	Solución salina	Feria et al (2014)
Santa Marta	Fuente superficial	350	6,00	98,40	150	7,40	7,00	80	75	Agua destilada	Lugo et al. (2020)
Medellín	Fuente superficial	150	1,00	99,90	100	7,40	-	-	-	Solución salina	Gámez et al (2015)
	Fuente superficial	120	2,00	90,00	75	6,50	7,40	80	60		
Puerto Tejada	Fuente superficial	40	7,90	57,00	20	9,10	-	-	-	Solución salina	Caracas y Landázuri.(2019)
			2,00	96,00		7,20	6,80	120	90		
Pasto	Fuente superficial	50	1,50	99,00	20-40	6,73	6,88	21	19,80	Solución salina	Quiñones & Riascos. (2018)
Cartagena	Fuente superficial	150	6,00	96,00	75	7,40	7,30	115	110	Aplicación en polvo	Paternina et al. (2020)
Barranquilla	Agua sintética	140	7,50	94,60	60	7,20	7,10	110	105	Aplicación en polvo	Gómez et al. (2010)
Montería	Fuente superficial	170	5,50	96,80	65	7,50	7,30	118	113	Aplicación en polvo	Hernández et al. (2021)

Fuente: Elaboración propia.

4.0 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de aplicación de la coagulación orgánica a base de la semilla de Moringa Oleífera (MO) en el tratamiento de agua superficial del río Meléndez.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis bibliométrico enfocado en la aplicabilidad de la Moringa Oleífera (MO) como agente coagulante en el tratamiento de agua potable.
- Analizar a escala de laboratorio el desempeño de la Moringa Oleífera (MO) como agente coagulante en términos de la eficiencia de remoción de turbiedad del agua cruda del río Meléndez.

5.0 REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Sistemas de tratamiento de agua potable

El acceso y disposición continua de agua con garantías y cobertura sanitaria es clave en la salud pública de una nación, pues fomenta el desarrollo y el bienestar humano de cualquier población (Ramírez et al., 2023). Debido al crecimiento poblacional y la diversidad de usos del suelo en las cuencas de abastecimiento, se pueden generar impactos adversos sobre las aguas superficiales, que son la principal fuente de abastecimiento de las poblaciones, lo que hace necesario aplicar tratamientos eficaces acorde al contexto con el fin de proteger la calidad del agua (Murillo et al., 2022).

En la Figura 1 se sintetizan parte de las tecnologías y combinaciones empleadas para el tratamiento del agua para consumo humano. Aunque los procesos de filtración y desinfección son elementos comunes en todas las alternativas (Di Bernardo, 1993), es importante reconocer la existencia de sistemas de tratamiento fundamentales y antiguos, como la filtración lenta y la filtración en múltiples etapas (FIME), así como sistemas modernos, como la filtración por membrana y el ablandamiento que son ampliamente utilizados (Sánchez et al., 2007).

La elección entre diferentes alternativas de tratamiento depende de la calidad del agua cruda y de los objetivos específicos del proceso, por lo que no existe un enfoque universal. Para cada problema, es necesario evaluar diversas soluciones tecnológicas y seleccionar la más adecuada según el contexto (Murillo et al., 2022).

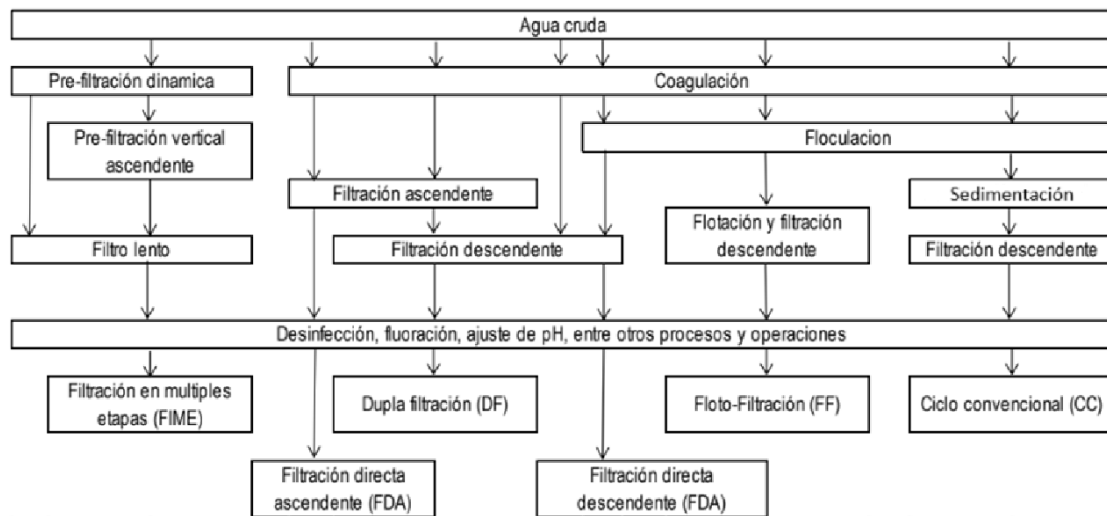


Figura 1. Tecnologías y procesos de tratamiento de agua para consumo humano.

Fuente: (Di Bernardo, 1993)

Independiente de la tecnología empleada, todos los procesos de tratamiento de agua culminan con la desinfección, cuya eficiencia depende de la turbiedad, lo que destaca la importancia de una adecuada filtración basada en el buen desempeño de los procesos previos (Di Bernardo, 1993).

En cuanto al proceso de coagulación, este se aplica en tecnologías de filtración directa, en línea y de ciclo completo o convencional; el correcto funcionamiento de esta última se centra en la etapa de coagulación-floculación, cuya eficacia dependerá de las características del agua e influirá en la adecuada sedimentación de las partículas floculentas conformadas (Zhang et al., 2020).

En Colombia, la Resolución 2115 de 2007, expedida conjuntamente por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Ministerio de la Protección Social, establece los estándares de calidad del agua para consumo humano, fijando un límite máximo de turbiedad de 2 UNT en el agua tratada, con sanciones en caso de incumplimiento. A nivel internacional, la OMS y la OPS recomiendan que la turbiedad no exceda los 5 UNT, aunque se considera óptimo mantenerla por debajo de 1 UNT, dado que este parámetro influye en la efectividad de la desinfección, junto con otros factores críticos como el pH, el tiempo de contacto, el tipo de desinfectante y la naturaleza de los microorganismos presentes. Cabe aclarar que la coagulación no tiene como único propósito la reducción de la turbiedad, sino también la remoción de materia orgánica, hierro y manganeso oxidados, fosfatos y otros sólidos coloidales que afectan la calidad del agua, especialmente en fuentes subterráneas de la región. En este proyecto se adopta la turbiedad como parámetro de control por su relevancia operativa y su relación directa con el riesgo sanitario agudo, siendo además uno de los indicadores más sensibles para evaluar la eficiencia del proceso de coagulación. En ese sentido, algunas organizaciones establecen valores meta más estrictos para el agua sedimentada, fijando un máximo de 2 UNT cuando la turbiedad del agua cruda supera 10

UNT, y de 1 UNT cuando es menor o igual a dicho valor, criterios más exigentes que el límite general de 5 UNT utilizado como referencia internacional.

En Estados Unidos, la EPA regula la calidad del agua bajo el Safe Drinking Water Act (Environmental Protection Agency, 2024), exigiendo que la turbiedad del agua tratada no supere 1 UNT y que el 95% de las muestras diarias no exceda 0.3 UNT. Por su parte, la Directiva Europea sobre Agua Potable también se alinea con las recomendaciones de la OMS, exigiendo que no supere 1 UNT. En Brasil, la Portaria nº 2914 (Ministério da Saúde, 2011) establece límites específicos dependiendo del sistema de abastecimiento. Las autoridades locales en cada país supervisan el cumplimiento de estas normativas a través de análisis regulares (Health Organization, 2017).

5.1.1 Tratamiento convencional o de ciclo completo

En Colombia predomina la aplicación de la tecnología convencional o de ciclo completo para la potabilización del agua (Villamizar, 2020). Con esta tecnología se busca un adecuado tratamiento del agua bajo el enfoque de barreras múltiples y está conformada por las etapas de pretratamiento, clarificación: (coagulación, floculación, sedimentación); filtración rápida, desinfección y estabilización química del pH (Murillo et al., 2022).

El propósito del pretratamiento es acondicionar el agua cruda mediante la remoción de materiales gruesos y partículas pesadas que puedan causar obstrucciones o daños en los equipos mecánicos durante las etapas subsiguientes, asegurando así la integridad y eficiencia del sistema global. Este proceso inicia en las estructuras de captación o bocatomas, responsables de derivar el caudal de agua desde la fuente hacia el sistema de tratamiento, de manera controlada. Inmediatamente después, el agua pasa por un sistema de cribado o desbaste, compuesto por rejillas o mallas metálicas que funcionan como una barrera física para retener sólidos de gran tamaño tales como ramas, hojas, plásticos, peces y otros residuos flotantes cuya presencia podría comprometer el funcionamiento de bombas, válvulas y tuberías. Tras el desbaste, el agua fluye hacia un desarenador que está diseñado para remover partículas inorgánicas densas y no cohesivas, como arena, grava y limo (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Posteriormente, se lleva a cabo la clarificación, un proceso clave del tratamiento convencional del agua que incluye la coagulación, floculación y sedimentación, con el fin de eliminar partículas responsables de la turbiedad y el color; Para el caso de la coagulación, se añaden compuestos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico al agua para neutralizar las cargas eléctricas de las partículas suspendidas. Este proceso permite que las partículas cargadas negativamente, que normalmente se repelen entre sí, se agreguen y formen flóculos más grandes, facilitando su eliminación. No obstante, el uso de coagulantes generalmente consume la alcalinidad del agua, lo que puede reducir el pH y aumentar la corrosividad, especialmente en aguas con alta turbiedad o color, que requieren mayores dosis de coagulante (Montoya et al., 2011).

Una vez que la coagulación ha sido realizada, el siguiente paso es la floculación. En este proceso, el agua tratada con coagulante es agitada lentamente para promover la formación de flóculos, que son grandes conglomerados de partículas. A diferencia de la coagulación, que se enfoca en la neutralización de cargas para facilitar la unión de partículas, la floculación se centra en una agitación suave que fomenta la agrupación de estos flóculos, haciéndolos lo suficientemente grandes como para ser fácilmente eliminados mediante sedimentación o filtración. De esta forma, la floculación optimiza la eficiencia del tratamiento de agua al mejorar la remoción de turbiedad, sin intervenir directamente en la neutralización de las cargas de las partículas, sino más bien en su agrupación para su posterior eliminación (Arboleda, 2001).

En la etapa de sedimentación, los flóculos formados durante la floculación se precipitan en el fondo del tanque facilitando la separación de las partículas sólidas. Posteriormente, la filtración se encarga de retener las partículas más pequeñas que no sedimentaron, mejorando la claridad del agua. Finalmente, la desinfección garantiza la destrucción o inactivación de los microorganismos patógenos que hayan podido sobrevivir a las etapas anteriores de tratamiento, y el ajuste del pH se realiza para prevenir la corrosión en las tuberías y asegurar que el agua sea segura para el consumo (ver Figura 2) (Melo et al., 2020). Dada la temática de este trabajo de grado, a continuación, se amplía el proceso de coagulación.

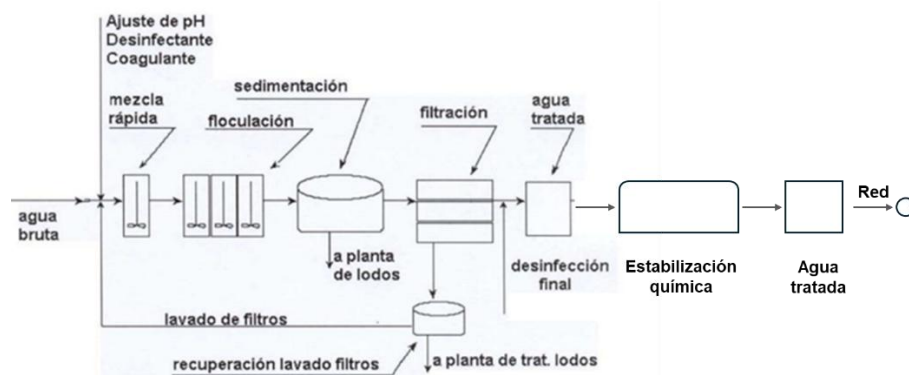


Figura 2. Tren de tratamiento en sistemas convencionales de potabilización de agua.

Fuente: (Di Bernardo, 1993)

5.2 Coagulación

La coagulación es un proceso que transforma partículas dispersas en un líquido en agregados sólidos más grandes y fácilmente separables. Este proceso en general se lleva a cabo mediante la adición de un coagulante químico (Amoquímicos, 2019), generalmente con una carga eléctrica opuesta a la carga de las partículas coloidales presentes en el agua, neutralizando así sus cargas (Metcalf & Eddy, 2014). Este proceso puede ocurrir mediante cuatro mecanismos básicos (Di Bernardo, 1993; Miller et al., 2008; Trigo et al., 2020): compresión de la doble capa; adsorción y neutralización de carga; barrido; adsorción y unión inter-partículas.

- **Compresión de la doble capa**

Este mecanismo de coagulación se basa en la teoría de la doble capa, indicando que las partículas coloidales están rodeadas por una doble capa difusa de moléculas de agua con cargas eléctricas opuestas: una interna negativa y otra externa positiva. La adición de un coagulante neutraliza las cargas, reduciendo el espesor de la doble capa eléctrica y acercando las partículas entre sí (Van der Kooij & Lettinga, G, 2000).

La adición de coagulantes inorgánicos al agua provoca la formación de iones de carga positiva o negativa, los cuales se adsorben en la superficie de las partículas coloidales. Esta adsorción neutraliza la carga de las partículas, eliminando la fuerza repulsiva entre ellas y permitiendo que se atraigan, formando flóculos mediante la fuerza de Van der Waals. Aunque esta fuerza es débil, resulta suficiente para que las partículas coloidales se agrupen en flóculos de mayor tamaño que pueden sedimentarse o filtrarse (Aguilar et al., 2021).

- **Adsorción y neutralización de carga**

En este proceso, las partículas coloidales poseen una carga negativa en su superficie, denominada carga primaria, la cual atrae iones positivos presentes en la solución acuosa, formando una capa adherida al coloide. El potencial en la superficie del plano de cizallamiento, conocido como potencial ZETA o electrocinético, determina el movimiento de los coloides y su interacción mutua (Scaramal et al., 2012).

La adsorción-neutralización se utiliza principalmente en tecnologías de filtración directa, mientras que el barrido es más común en tecnologías convencionales o de ciclo completo (Di Bernardo & Sabogal, 2008).

- **Barrido**

En el tratamiento convencional del agua, se utiliza comúnmente un coagulante inorgánico que, al añadirse en alta concentración, genera un precipitado de hidróxido de metal hidratado. Este precipitado, al ser mucho más denso que las partículas coloidales, desciende y atrapa dichas partículas en su superficie, en un fenómeno conocido como “barrido”. Las partículas coloidales quedan retenidas en el precipitado debido a fuerzas de Van der Waals, electrostáticas y de repulsión hidrófila-hidrófoba, lo que permite una remoción efectiva de las impurezas en el proceso de tratamiento del agua (Di Bernardo & Sabogal, 2008).

- **Adsorción y unión inter-partículas**

Este mecanismo ocurre con el uso de ayudantes de coagulación o floculación, es decir, polímeros. Cuando el coagulante interactúa con cadenas poliméricas de alto peso molecular, aumenta los sitios de adsorción disponibles, lo que facilita la vinculación con partículas presentes en aguas superficiales, como caolín, arcilla, materia orgánica y algas. Juntos, el coagulante y los polímeros forman puentes o redes que conducen a la formación de flóculos, mejorando la eficacia del proceso de coagulación (Arboleda, 2001).

La ocurrencia o predominancia de uno u otro mecanismo de coagulación, depende de aspectos como las características del agua cruda y las condiciones del proceso (tipo de coagulante, dosis y pH de coagulación) (Di Bernardo & Sabogal, 2008).

La relación entre la dosis de coagulante y la turbiedad del agua puede analizarse mediante un diagrama conceptual que identifica cuatro zonas operativas diferenciadas, en función del mecanismo predominante y su efecto sobre la turbiedad residual. En la Zona 1 (Subdosificación), la neutralización de carga es incompleta, lo que impide la desestabilización de los coloides y genera una alta turbiedad residual. La Zona 2 (Óptima) representa el rango ideal de operación, donde ocurre una adsorción y neutralización eficiente de las cargas eléctricas, alcanzándose el punto isoeléctrico (potencial Z igual a cero), lo cual permite una aglomeración máxima de partículas y una turbiedad mínima. En la Zona 3 (Sobredosificación y Re-estabilización), el exceso de coagulante provoca una inversión de la carga superficial de los coloides, generando repulsión entre partículas y un aumento en la turbiedad. Finalmente, en la Zona 4 (Coagulación por Barrido), la remoción de partículas se produce principalmente por el arrastre físico generado por la precipitación masiva del coagulante, logrando una baja turbiedad residual, aunque sin recurrir a la neutralización de carga como mecanismo principal (Arboleda, 2001).

5.2.1 Coagulantes inorgánicos

Los coagulantes inorgánicos más empleados en el tratamiento de agua potable son sales metálicas derivadas principalmente de hierro o aluminio, entre las cuales destacan el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), el cloruro férrico (FeCl_3) y el policloruro de aluminio (PACl), aunque también pueden utilizarse otros compuestos como el aluminato de sodio o el sulfato ferroso. La selección y dosificación de estos coagulantes depende en gran medida de las características fisicoquímicas del agua cruda, particularmente del pH y la alcalinidad, ya que estos parámetros influyen en la especiación química, la solubilidad y la eficacia de la precipitación del coagulante (Cogollo, 2011). Esta decisión debe considerar no solo criterios técnicos, sino también aspectos operativos, económicos y ambientales, ya que cada tipo de coagulante presenta ventajas y limitaciones específicas que afectan el rendimiento del sistema de tratamiento.

El sulfato de aluminio es el coagulante más empleado a nivel global debido a su bajo costo y disponibilidad. Presenta buenos resultados en la remoción de turbiedad, especialmente en aguas de composición constante. No obstante, su desempeño es altamente dependiente del pH, con un rango óptimo estrecho (aproximadamente 6.0 a 7.5). A temperaturas bajas, su eficacia disminuye considerablemente. Además, puede generar residuos de aluminio en el agua tratada si no se controla adecuadamente el proceso (Ye et al., 2007).

Por su parte, el cloruro férrico ofrece una mayor versatilidad operativa, ya que actúa eficientemente en un rango amplio de pH (entre 5.0 y 9.0) y produce flóculos más pesados que sedimentan con mayor facilidad. También destaca por su capacidad de remover

contaminantes específicos como fosfatos, sulfuros y arsénico. Sin embargo, su naturaleza altamente corrosiva requiere infraestructura resistente, lo que incrementa los costos. Además, su precio unitario suele ser más alto y puede provocar una coloración indeseada en el agua tratada (Wang et al., 2009).

El policloruro de aluminio (PACl), un coagulante prehidrolizado, presenta importantes ventajas operativas. Es más eficiente que el sulfato de aluminio requiere dosis menores, funciona en un rango más amplio de pH y temperatura, y consume menos alcalinidad, lo que minimiza la necesidad de correcciones químicas adicionales. Además, produce lodos en menor volumen y de mayor densidad, lo que facilita su tratamiento y disposición. Su principal desventaja radica en el mayor costo inicial y en la necesidad de seleccionar formulaciones específicas según las características del agua a tratar (Van Benschoten & Edzwald, 1990).

Un aspecto crítico relacionado con el uso de coagulantes inorgánicos es la presencia de metales residuales en el agua tratada. Un control inadecuado del pH puede llevar a la resolubilización de los hidróxidos metálicos, generando concentraciones residuales de aluminio o hierro por encima de los límites normativos. Por ejemplo, en Colombia, la Resolución 2115 de 2007 establece valores máximos permitidos de 0,2 mg/L para aluminio y 0,3 mg/L para hierro en agua potable. Mientras que el aluminio ha sido estudiado por su posible relación con enfermedades neurodegenerativas, el hierro residual genera problemas estéticos como coloración, sabor metálico y manchas (Wang et al., 2009).

La gestión de lodos generados en la coagulación representa un desafío técnico y económico para las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP). Estos lodos, compuestos principalmente por hidróxidos metálicos y las impurezas eliminadas, deben someterse a procesos de espesamiento, deshidratación y disposición final conforme a las regulaciones ambientales vigentes. A diferencia de los biosólidos de las plantas de aguas residuales, los lodos de PTAP están sujetos a normativas específicas, como el Decreto 774 de 2025 en Colombia o la NOM-004-SEMARNAT-2002 en México (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

5.2.2 Coagulantes orgánicos

Los coagulantes orgánicos, derivados de fuentes naturales o sintéticas, constituyen una alternativa sostenible y eficiente para la reducción de turbiedad y color en el agua (Ndamitso et al., 2018; García, 2007). Estos incluyen polímeros naturales como la celulosa, el quitosano o las proteínas extraídas de semillas, así como polímeros sintéticos como las poliacrilamidas (Metcalf & Eddy, 2014). Su acción no depende de la hidrólisis, sino de la interacción directa con las partículas coloidales a través de mecanismos de adsorción, neutralización de carga y formación de puentes poliméricos (AWWA, 2019). De este modo, generan flóculos sin

alterar de manera significativa la alcalinidad, lo que reduce la tendencia corrosiva del agua (Singh & Kumar, 2017).

Dentro de los coagulantes orgánicos, la MO se ha consolidado como una de las alternativas más estudiadas. Las proteínas catiónicas presentes en sus semillas (MOCP), con un peso molecular de 6,50–30 kDa, poseen una alta densidad de carga positiva en el rango de pH del agua natural y actúan a través de diversos mecanismos que pueden operar de forma simultánea, dependiendo de la calidad del agua y la dosis aplicada. La eficacia de la MO es una consecuencia directa de su arquitectura molecular, ya que no se trata de un simple ion como el Al^{3+} , sino de una macromolécula compleja y preformada, optimizada para la coagulación. Posee múltiples sitios catiónicos distribuidos a lo largo de una cadena polimérica larga y flexible, lo que le permite ejecutar de manera simultánea la neutralización de carga (a través de los sitios catiónicos) y la formación de puentes (a través de su longitud y flexibilidad). Esta diferencia estructural fundamental respecto a las sales inorgánicas explica su mayor rendimiento, especialmente en aguas con alta turbiedad (Valverde et al., 2018).

El mecanismo de coagulación más distintivo y relevante de la MO es la formación de puentes interarticulares, también denominada parche electrostático. Aunque la neutralización de carga constituye un componente importante de su acción, es la capacidad de generar puentes lo que otorga a la MO su mayor impacto en el tratamiento de agua. La eficacia de la coagulación no depende únicamente de la desestabilización de partículas, sino también de la conformación de flóculos con tamaño y densidad adecuados para una sedimentación eficiente, siendo el mecanismo de puente inherentemente superior en la producción de flóculos grandes, densos y estables (Rondeau et al., 2000).

La explicación de este rendimiento radica en la cinética del proceso de puenteo. Para que se forme un puente, una cadena proteica debe adsorberse primero en una partícula y, antes de replegarse sobre sí misma, encontrar y adherirse a una segunda (teoría de colisiones). En aguas de alta turbiedad, la elevada concentración de partículas reduce las distancias entre ellas, lo que incrementa drásticamente la probabilidad de que una proteína de MO conecte dos o más partículas en poco tiempo. Este favorecimiento cinético convierte al mecanismo de puente en el más eficiente bajo condiciones de alta densidad de partículas. Por el contrario, en aguas de baja turbiedad, la dispersión de partículas disminuye la probabilidad de colisiones, reduciendo con ello la efectividad del proceso (Nwankwo & Ezech, 2021).

El segundo mecanismo relevante es la adsorción y neutralización de carga (Ndabigengesere et al., 1995). En este caso, las proteínas catiónicas de la MO se adhieren a partículas coloidales cargadas negativamente como arcillas, limos o microorganismos, reducen la potencial zeta y colapsan la doble capa eléctrica. La disminución de la repulsión electrostática permite que fuerzas de atracción de corto alcance, como las de van der Waals, promuevan la agregación y la sedimentación de los flóculos (Valverde et al., 2018).

Finalmente, en aguas con materia orgánica y dureza moderada o alta cobra importancia la floculación por barrido mediada por precipitados organometálicos. Okuda et al. (2001) demostraron que, en presencia de cationes divalentes como Ca^{2+} y Mg^{2+} , las proteínas de la MO pueden reticularse y formar complejos insolubles en forma de red, capaces de atrapar partículas de turbiedad durante la formación y sedimentación de flóculos. A diferencia de los coagulantes metálicos, este mecanismo no consume alcalinidad ni altera significativamente el pH, lo que explica la estabilidad química del agua tratada con MO.

5.2.3 *Moringa oleífera*: Usos multidisciplinarios e integrales y su papel en los procesos de potabilización del agua

La MO, conocida también como acacia, perla de oriente o african moringa (González, 2016) originaria de las regiones bajas del Himalaya, el noreste de la India, Bangladesh, Afganistán y Pakistán es una planta multipropósito adaptada a climas tropicales secos, subtropicales y áridos. Se ha ido desplazando progresivamente a otras regiones del mundo, como África, el sudeste asiático, las islas del Pacífico, el Caribe y América del Sur, gracias a su capacidad de adaptación a condiciones de calor intenso y precipitación escasa (Díaz et al., 2017). Posee un tronco leñoso y recto con un diámetro de 20 a 40 cm, y se caracteriza por su rápido crecimiento, especialmente en alturas inferiores a los 600 metros sobre el nivel del mar, en suelos arenosos o de buen drenaje con pH entre 4,50 – 9,00 (Trigo et al, 2020) al que a su vez aporta gran cantidad de nutrientes y protege de factores externos como la erosión y la desecación (Castro, 2013).

En la Figura 3 se denota la ubicación del cultivo de la MO alrededor del mundo (Ang & Mohammad, 2020).



Figura 3. Ubicación del cultivo de MO alrededor del mundo.

Fuente: Azañero, R. (2014)

Para el caso de Colombia, las regiones andina y caribe poseen condiciones ambientales que permiten el desarrollo de la planta. Para el año 2012, el cultivo de MO se concentró en los departamentos de Bolívar, Tolima, Meta y Antioquia, teniendo como destino la comercialización en la agricultura y como complemento nutricional en la dieta de las personas (Ayerza, 2012). La Figura 4 muestra las potenciales zonas para el cultivo de MO en Colombia, resaltando la proyección hacia la zona sur del Valle del Cauca (Castro, 2013).

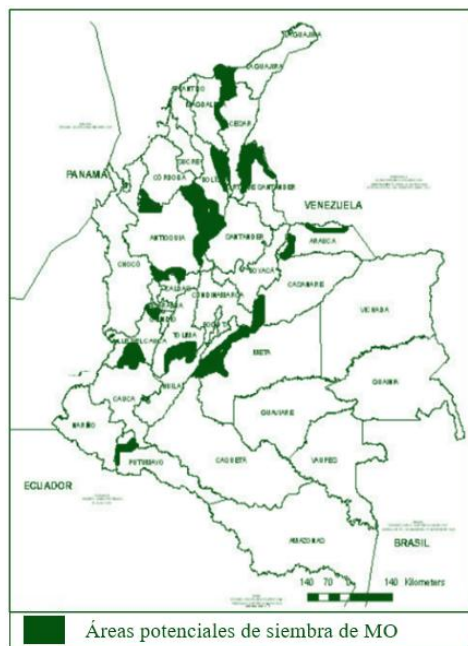


Figura 4. Zonificación de sitios potenciales para el cultivo de moringa oleífera en Colombia.

Fuente: Castro, (2013).

La MO es una planta de alta versatilidad funcional y científica, cuyas propiedades han sido documentadas en múltiples campos del conocimiento, desde la nutrición hasta la ingeniería sanitaria y ambiental. Su potencial radica en la riqueza bioquímica de todas sus partes como las hojas, semillas, corteza, raíces, vainas y flores, las cuales han sido objeto de estudios que respaldan sus aplicaciones con evidencia técnica y experimental. Teniendo en cuenta los hallazgos sobre los beneficios de la MO en función de sus partes, así como su cultivo a nivel nacional e internacional, se ha incrementado progresivamente el aprovechamiento de cada parte en diversos ámbitos, principalmente en la industria y el sector alimenticio, aunque también se destaca su aprovechamiento en temas de ambiente y desarrollo sostenible como son la remediación de suelos, la generación de biocombustibles y la potabilización del agua (Castro, 2013). La Figura 5 ilustra la variedad de usos potenciales asociados a las distintas partes de la MO, y a continuación, se detallará sus aplicaciones en cada uno de los campos las cuales han sido registrados.

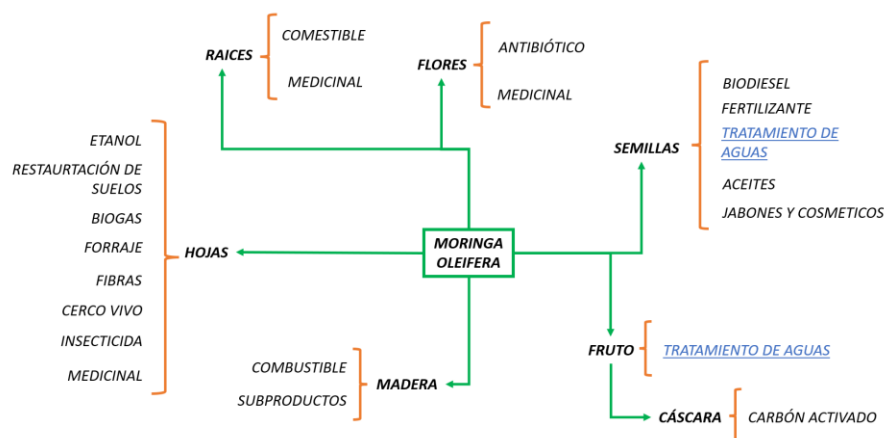


Figura 5. Usos de la planta de MO en función de sus partes.

Fuente: Castro. (2013).

En el ámbito nutricional y alimentario, la MO se destaca como una fuente en nutrientes esenciales, lo que la convierte en una herramienta en programas de seguridad alimentaria, especialmente para el combate de la desnutrición infantil y materna en regiones vulnerables. Diversos estudios han identificado en esta planta más de 90 compuestos químicos nutricionales, incluyendo proteínas, lípidos, carbohidratos y fibra dietética (Fahey, 2005). Entre estos, las proteínas son particularmente abundantes, representando aproximadamente el 25% del peso seco de sus hojas, con un perfil completo de al menos 19 aminoácidos esenciales y no esenciales. Asimismo, contiene una amplia gama de micronutrientes, entre los que se destacan las vitaminas A, B, C y E, y minerales como calcio, potasio, hierro, magnesio y fósforo (Moyo et al., 2011).

Los lípidos están presentes en mayor concentración en las semillas, representando hasta un 30% del peso seco, siendo el ácido oleico, el ácido palmítico y el ácido esteárico sus principales constituyentes. En las hojas, los lípidos predominantes son el ácido linolénico y el ácido palmítico. Una de sus ventajas prácticas más relevantes es la posibilidad de deshidratar y pulverizar las hojas, conservando su valor nutricional por varios meses sin necesidad de refrigeración, lo que facilita su incorporación como suplemento alimentario tanto para consumo humano como animal (Makkar & Becker, 1996).

En el campo de la medicina tradicional y farmacología moderna, se ha validado una amplia gama de propiedades terapéuticas. Extractos de MO exhiben actividad antioxidante, atribuida a su contenido de flavonoides y compuestos fenólicos; antiinflamatoria e inmunomodulador, mediante la inhibición de citocinas proinflamatorias; y antimicrobiana, efectiva contra bacterias Gram positivas, Gram negativas, hongos y ciertos virus (Chumark et al., 2008). Asimismo, se ha observado actividad anticancerígena en líneas celulares de cáncer hepático, colorrectal y mamario, además de efectos hepatoprotectores y nefroprotectores, y propiedades hipocolesterolémicas, hipolipidémicas, antidiabéticas y neuroprotectoras (Anwar & Gilani, 2007). Estos efectos son atribuidos a compuestos como la quercetina, ácido

gálico, isotiocianatos, taninos y saponinas, los beneficios y aplicaciones encontradas en el campo de la medicina para las distintas partes de la planta de MO se visualiza en la Tabla 3.

Tabla 3. Beneficios encontrados en estudios realizados con la planta de moringa oleífera (MO).

Parte del árbol	Efecto descrito	Tipo de estudio
Semillas	Antiinflamatorio en colitis ulcerosa	In vivo
Hoja	Antioxidante en esteatosis hepática	In vivo
Hoja	Antioxidante directo e indirecto	In vitro
Corteza	Inmunomodulador/antiinflamatorio vascular	In vitro
Hoja	antiinflamatorio vascular	In vitro
Semillas	Antioxidante hepático en dietas grasas	In vivo
Semillas	Control de diabetes mielitus T1	In vivo
Hoja	Control de diabetes mielitus T2	In vivo
Hoja	Protector en intoxicacion por arsenico	In vivo
Hoja	Disminuye la fatiga muscular	In vivo
Semilla y vaina	Antimicrobiano bacterias multiresistentes	Cultivo Gram + y -
Semilla	Antimicrobiano en biofilms	Biofilms
Hoja	Antimicrobiano bacterias multiresistentes	Agua Contaminada

Fuente: Castro. (2013).

Además de su relevancia en el ámbito médico y terapéutico, ha despertado creciente interés en sectores como la biotecnología y la industria, donde sus compuestos bioactivos y derivados se aprovechan para el desarrollo de productos con alto valor agregado. Uno de los productos más valorados es el aceite extraído de sus semillas, conocido como aceite de Ben, caracterizado por su alta estabilidad oxidativa y elevado contenido de ácido oleico. Estas propiedades lo hacen especialmente atractivo para la industria cosmética, donde se utiliza en la formulación de productos para el cuidado de la piel y el cabello. Además, su perfil lipídico ha sido aprovechado como materia prima para la producción de biodiésel, generando un combustible vegetal de alta eficiencia energética y bajo impacto ambiental (Rahayu et al., 2024).

En los campos de la agronomía y el medio ambiente, la MO se posiciona como una especie estratégica gracias a su resiliencia a condiciones adversas, como la sequía y los suelos degradados, lo cual la hace ideal para prácticas de agricultura regenerativa y sistemas agroecológicos sostenibles.

Una de las aplicaciones más relevantes en este ámbito es el aprovechamiento de residuos post-tratamiento, como los lodos generados tras el uso de sus semillas en procesos de potabilización. Estos lodos, ricos en nutrientes, han demostrado ser efectivos como biofertilizantes, aportando valor agregado a sistemas agrícolas de bajo impacto ambiental. Además, se ha documentado la capacidad biosorbente de sus cáscaras y vainas para remover metales pesados como plomo, cadmio y zinc, lo que contribuye a la remediación de suelos y cuerpos de agua contaminados (Mangale et al., 2012).

En cuanto al control biológico de vectores, los extractos de semillas, hojas y flores de han mostrado actividad insecticida, larvicida y ovicida frente a especies de interés en salud pública como *Anopheles stephensi*, *Aedes aegypti*, *Culex quinquefasciatus* y *Aedes albopictus*. Esta actividad se atribuye a proteínas como la lectina soluble en agua de las semillas, la cual ha demostrado ser efectiva incluso contra larvas resistentes a insecticidas organofosforados. La pulverización de extractos vegetales sobre criaderos de mosquitos ha evidenciado efectos letales en diferentes fases del desarrollo larvario y en adultos. Sin embargo, el uso ambiental de estos extractos sigue siendo objeto de evaluación, debido a reportes de toxicidad sobre organismos no objetivo, como la microalga *Scenedesmus obliquus* y el crustáceo *Daphnia magna*, comúnmente empleados como indicadores ecotoxicológicos (Ndabigengesere & Narasiah, 2015).

Por otra parte, ha sido objeto de creciente interés en el sector de la acuicultura, donde se enfrenta una fuerte presión por reducir el uso de químicos y antibióticos debido a su impacto ambiental y riesgos asociados a la salud humana y animal (Dansi et al., 2012). Estudios han demostrado el potencial de extractos acuosos, etanólicos y crudos de MO en el tratamiento de aguas utilizadas en el cultivo de peces y camarones, mostrando efectos antimicrobianos contra patógenos como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Vibrio cholerae*, aislados de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) (Ferreira et al., 2011). Esta acción antimicrobiana, junto con su baja toxicidad hacia especies acuáticas cultivadas, refuerza su valor como una herramienta sostenible para la gestión sanitaria en acuicultura intensiva, con menor impacto ambiental y sin generar residuos peligrosos (Anwar et al., 2007).

Por último, uno de los usos más relevantes y ampliamente estudiados de la MO se encuentra en el tratamiento de agua y efluentes, particularmente por las propiedades coagulantes de sus semillas. Estas contienen proteínas activas, entre las que destaca una lectina soluble en agua de bajo peso molecular, capaz de neutralizar cargas negativas en partículas coloidales y microorganismos presentes en el agua. La actividad coagulante de las semillas se atribuye a una red de proteínas solubles que, al disolverse en medios acuosos, inducen la agregación coloidal, la adsorción de iones metálicos y la sedimentación de partículas en suspensión.

Esta acción facilita procesos eficientes de coagulación y floculación, logrando reducciones de hasta un 95 % en turbiedad y carga bacteriana, sin alterar significativamente parámetros críticos como el pH o la alcalinidad, a diferencia de coagulantes inorgánicos tradicionales como el sulfato de aluminio (Okuda et al., 2001). En investigaciones comparativas, se observó que el sulfato de aluminio actúa dentro de un intervalo específico de pH, mientras que las proteínas coagulantes de MO operan de forma independiente del pH, lo cual representa una ventaja técnica significativa en contextos rurales o de bajos recursos, donde el ajuste del pH previo al tratamiento es inviable (Sánchez et al., 2010).

Desde una perspectiva microbiológica, las proteínas coagulantes presentes en las semillas también han mostrado propiedades antimicrobianas. En particular, se ha aislado una proteína

ciónica con capacidad para interactuar directamente con las membranas celulares de bacterias patógenas, como *Escherichia coli*. Según Skaf et al. (2021), esta proteína es capaz de fusionar las membranas internas y externas de la célula bacteriana, comprometiendo su viabilidad. Debido a estas propiedades, su uso ha sido propuesto no solo para el tratamiento de agua en países en desarrollo, sino también en aplicaciones terapéuticas de interés en salud pública.

En la Tabla 4 se presentan las ventajas y limitaciones relacionadas con el potencial de aplicación del coagulante natural a base de semillas de MO.

Tabla 4. Recopilación de ventajas y limitaciones relacionadas con el potencial de aplicación del coagulante natural a base de semillas de MO.

VENTAJA	LIMITACIÓN	REFERENCIA
Remoción de turbiedad típicamente entre 95 % y 99 % en agua cruda o efluentes industriales.	Generación de materia orgánica residual aumenta COD/BOD, lo cual puede favorecer proliferación microbiana si no se desinfiere adecuadamente.	Asrafuzzaman et al., (2011) ; Yarahmadi et al., (2009), Fera et al., (2014) ; Ndabigengesere et al., (1995), Okuda et al., (2001) ; Yin., (2010)
Económico, biodegradable, localmente disponible y produce menor volumen de lodo en comparación con coagulantes químicos.	Requiere dosis mayores que los coagulantes comerciales: variabilidad según origen vegetal, preparación, pH, ionización y temperatura.	Mendoza et al. (2000), Diver et al., (2023)
Contiene proteínas catiónicas de aproximadamente 13 kDa con actividad floculante eficaz similar a polielectrolitos.	Escasa estandarización y falta de confianza industrial; falta de escalamiento más allá de laboratorio o planta piloto.	Saleem & Bachmann., (2019); Ang & Mohammad., (2020) ; Acevedo., (2019), Diver et al., (2023)
Actúa también como desinfectante parcial: reduce microorganismos y coliformes significativamente (hasta ~99,9 %).	Necesita un tratamiento complementario para desinfección completa y estabilización química (como cloración u otros procesos).	Anwar., (2007), Kurniawan et al., (2020); Broin et al., (2002)
No altera significativamente el pH del agua: A diferencia del sulfato de aluminio, que reduce drásticamente el pH del agua tratada (la acidifica), la MO tiene un efecto buffer, manteniendo el pH en un rango más neutro. Esto reduce o elimina la necesidad de usar químicos para ajustar el pH posteriormente.	La combinación de la MO con la cloración debe ser cuidadosamente estudiada para optimizar la dosis y minimizar la formación de SPDs.	Abidin et al., (2019), Ho et al., (2014), Anwar., (2007), Mendoza et al., (2000)
Subproducto residual (lodo press-cake) puede usarse como fertilizante o suplemento animal, aprovechando nutrientes presentes.	Riesgo de acumulación de materia orgánica en sedimentos, potencial proliferación microbiana. Se requiere evaluación del lodo antes de uso agrícola.	Anwar et al. (2007); Mendoza et al. (2000)
El lodo generado tras la sedimentación con MO es menos tóxico en comparación con lodos de sulfato de aluminio.	El lodo puede requerir tratamiento adicional antes de su disposición en cuerpos de agua o suelos agrícolas.	Mendoza et al. (2000); Broin et al. (2002)
Fácil producción y preparación local con secado y molienda sencilla en zonas rurales.	Necesidad de extracción y pretratamiento (desengrasado) para optimizar la eficiencia coagulante.	Okuda et al. (2001); Kurniawan et al. (2020); Saleem & Bachmann (2019)
Uso potencial en comunidades rurales con acceso limitado a tratamientos convencionales.	Estandarización y optimización del proceso de fabricación aún en estudio.	Muyengwa, C., & Mtalo, F. (2023); Diver et al., (2023)

La efectividad de la MO como coagulante depende significativamente de la calidad y pureza de las semillas, recomendándose una pureza mínima del 95%. Una mayor pureza asegura una mayor concentración de proteínas catiónicas, péptidos y alcaloides responsables de neutralizar cargas negativas y formar flóculos estables (Restrepo et al., 2017; Salamanca et al., 2018). El poder coagulante, se mide normalmente usando análisis espectrofotométricos, electroforesis o ensayos de iones cargados, para cuantificar la proporción de proteínas útiles en el polvo con respecto a materia seca total. Para garantizar la eficacia, las semillas deben ser procesadas adecuadamente, obteniendo un producto homogéneo con partículas menores de 100 micras, densidad de 1.2 a 1.4 g/cm³ y un color entre verde amarillento y marrón claro (Ndamitso & Bello, 2018).

Diversos estudios comparativos han evaluado la eficiencia del polvo de semilla de MO frente a coagulantes químicos tradicionales en la remoción de turbiedad y otros parámetros de calidad del agua. Si bien la mayoría de los trabajos se ha centrado en el sulfato de aluminio, la MO también ha sido comparada con otros coagulantes como el cloruro férrico (FeCl₃) y el policloruro de aluminio (PACl), revelando ventajas y limitaciones que dependen del tipo de agua, dosis empleadas y condiciones de operación (Flores, 2019).

En el caso del Sulfato de aluminio, la MO ofrece ventajas claras como no alterar significativamente el pH del agua tratada y generar lodos biodegradables, lo que disminuye el impacto ambiental (Amagloh & Benang, 2009). No obstante, muestra menor eficacia en aguas de baja turbiedad, produce flóculos menos densos y puede añadir materia orgánica al sistema. Frente al cloruro férrico, un coagulante más robusto y eficaz que opera en un rango de pH más amplio y genera flóculos de rápida sedimentación, la MO suele presentar un rendimiento inferior en términos de velocidad de sedimentación y estabilidad de los flóculos. Sin embargo, evita problemas asociados al hierro, como la corrosión de equipos y la coloración del agua. Por su parte, el PACl, al ser un coagulante prehidrolizado de segunda generación, supera en eficiencia tanto al sulfato de aluminio como a la MO, especialmente en dosis requeridas y control del pH. En este sentido, la MO difícilmente compite como coagulante primario en sistemas de tratamiento a gran escala (Delelegn et al., 2018).

No obstante, la MO demuestra potencial en su uso como ayudante de coagulación. En esta aplicación, no sustituye al coagulante inorgánico primario, sino que actúa en sinergia con él, mejorando la formación de flóculos y reduciendo significativamente la dosis requerida del químico. En este rol, la proteína coagulante de la MO actúa como un puente de largo alcance que une microflóculos generados por el coagulante principal, facilitando la formación de flóculos más grandes, densos y sedimentables (Amagloh & Benang, 2009).

Desde una perspectiva bibliométrica, los beneficios de esta estrategia están documentados en la literatura científica (Kwaambwa et al., 2020):

- Reducción de la dosis química: Varios estudios reportan que la inclusión de MO como ayudante permite disminuir entre un 30 % y 70 % la dosis de sulfato de aluminio o cloruro férrico requerida para alcanzar la misma eficiencia.
- Mejora de la sedimentación: Los flóculos híbridos (químico + MO) son más pesados y sedimentan con mayor rapidez, optimizando el proceso de clarificación.
- Reducción del volumen de lodo: Al disminuir el uso de coagulantes metálicos, también se reduce la generación de lodos químicos, que requieren tratamiento y disposición especializada.
- Menor impacto en el pH: El uso combinado permite mantener una mayor estabilidad química en el agua tratada, disminuyendo la necesidad de correcciones posteriores con agentes alcalinos.

6.0 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo utilizando agua del río Meléndez, captada en la parte baja de su cuenca, al sur de la ciudad de Santiago de Cali. Para alcanzar los objetivos establecidos, se desarrolló una metodología dividida en dos etapas:

- i. Análisis bibliométrico enfocado en la aplicabilidad de la Moringa Oleífera (MO) como agente coagulante en el tratamiento de agua potable.
- ii. Ensayos experimentales a escala de laboratorio, utilizando agua cruda del río Meléndez bajo tres calidades, diferenciadas por el nivel de turbiedad de 26 UNT (bajo), 140 UNT (medio) y 300 UNT (alto).

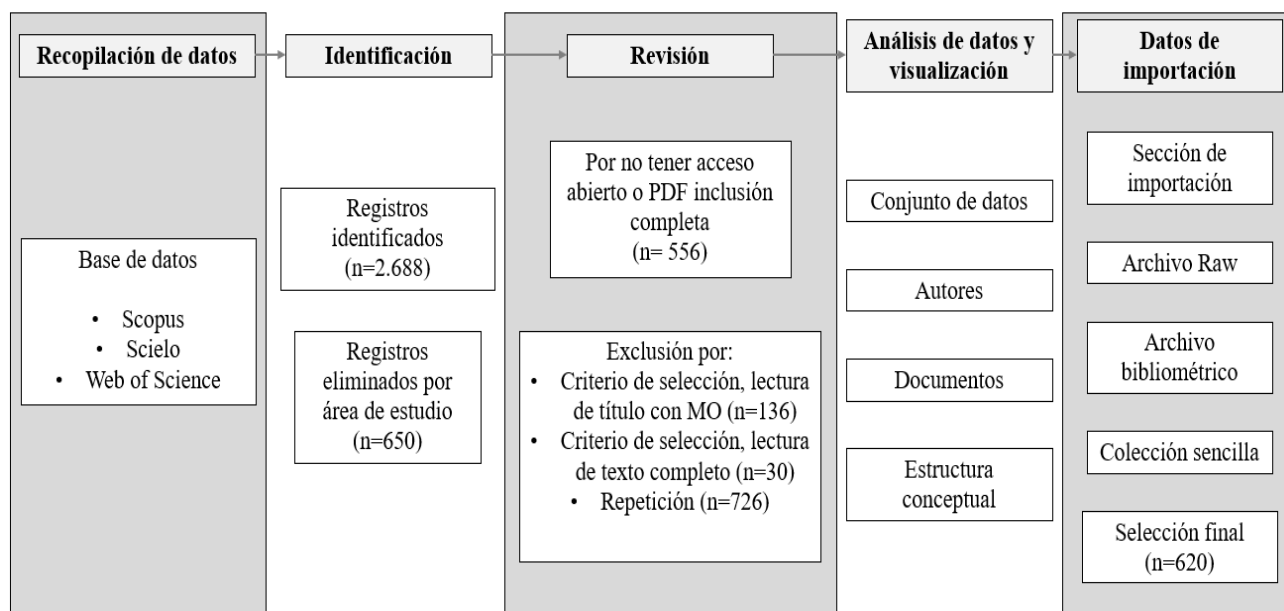
6.1 Análisis bibliométrico enfocado en la aplicabilidad de la Moringa Oleífera (MO) como agente coagulante en el tratamiento de agua potable.

El capítulo de análisis bibliométrico abordó de manera integral los principales ejes temáticos vinculados al uso de la MO en el tratamiento de agua. Se presentó, en primer lugar, una visión general de las fuentes documentales y los tipos de estudios analizados, seguido de un enfoque específico en el papel y los mecanismos de acción de la MO. Posteriormente, se expuso un panorama global de la investigación, destacando su evolución, los contribuyentes clave y las tendencias geográficas y de investigación, así como los aspectos más y menos estudiados. Asimismo, se identifican y describen los clústeres temáticos centrales, junto con la caracterización fisicoquímica y proteica de los coagulantes, y los métodos de preparación y extracción empleados, evaluando su impacto en el rendimiento. Finalmente, se examinan los desafíos y limitaciones en su aplicación, reforzando aspectos operativos y parámetros críticos

como rangos de dosis, pH y alcalinidad óptimos, tiempos y velocidades de sedimentación, dimensión fractal de partícula, condiciones de almacenamiento, así como el manejo y características del lodo generado.

El proceso inició con la recopilación de datos bibliográficos a partir de tres bases reconocidas por su cobertura y fiabilidad (Scopus, SciELO y Web of Science), complementadas con la búsqueda de trabajos de grado mediante Google. Se emplearon estrategias de búsqueda booleanas con operadores lógicos, y la información recuperada incluyó datos bibliográficos, resúmenes y palabras clave. El periodo de observación abarcó desde 1995 hasta el primer semestre de 2025. Para la visualización y análisis de la información se utilizó el software VOSviewer, lo que permitió sistematizar las formas de preparación de la MO como coagulante y registrar parámetros operativos y contextuales reportados en la literatura, sirviendo como base para la etapa experimental.

La Figura 6 esquematiza los pasos aplicados para el análisis, selección y visualización de los documentos, así como el número de documentos encontrados en cada plataforma de búsqueda. A continuación, se muestran las etapas de búsqueda, depuración e importación de documentos para el análisis bibliométrico, desde la recolección en bases de datos hasta la selección final. Se aplicaron filtros temáticos, criterios de inclusión y exclusión, y se estructuraron los datos para su análisis.



* El número de documentos encontrados en cada plataforma de búsqueda, se muestra en la Tabla 5.

Figura 6. Pasos de investigación bibliométrica.

Fuente: (Adaptada de Büyükkidik, S., 2022)

Inicialmente se identificaron un total de 2.688 documentos (Tabla 5); posteriormente, en la fase de identificación, se aplicó un primer filtro temático, eliminando 650 registros que no correspondían al área de estudio objetivo, con el fin de asegurar la pertinencia temática del material recolectado.

Tabla 5. Ecuaciones aplicadas en la búsqueda de información bibliográfica relacionada con el uso de MO en el tratamiento de agua.

PLATAFORMA DE BUSQUEDA	ECUACIÓN BOOLEANA	NÚMERO DE DOCUMENTOS ENCONTRADOS POR ECUACIÓN
Scopus	(TITLE-ABS-KEY ("moringa oleifera seed" OR "Organic coagulant agent" OR "removal turbidity" OR "optimal dose" OR "drinking water") AND TITLE-ABS-KEY ("Preparation of moringa oleifera" OR "characterization of moringa oleifera" OR "evaluation" AND "Water treatment" OR "Influence of extraction of moringa oleifera" OR "Adsorption of colloidal particles" OR "pH stabilization" OR "alkalinity"))	2.472
SciELO	((("moringa oleifera") OR ("drinking water")) AND (Turbidity removal) OR (pH stabilization)) AND (Coagulant)	48
Web of science	((TS=(moringa oleifera seed)) AND TS=((removal turbidity)) AND TS=((preparation de moringa oleifera)) AND TS=((extraction de moringa oleifera)) AND TS=((alkalinity)) OR TS=((Organic coagulant agent)) AND ((TS=(Water Treatment) OR TS=(pH stabilization))) AND TS=((Extraction Techniques Of moringa)) OR TS = ((jar test)) AND TS=((Natural organic matter))	168

Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de revisión, se aplicaron criterios más estrictos de selección y exclusión. Primero, se descartaron 556 documentos por no contar con acceso abierto o versiones completas en formato PDF. Luego, tras la lectura de títulos y resúmenes, se eliminaron 136 registros por no cumplir con la relevancia temática establecida. Una revisión más detallada del texto completo llevó a excluir 30 documentos adicionales que no cumplieran con criterios metodológicos mínimos o carecían de aporte significativo al enfoque del estudio. Asimismo, mediante el uso del software Mendeley versión 2.129, se identificaron y eliminaron 726 documentos duplicados, lo que contribuyó a consolidar una base depurada y única de referencias científicas. De esta manera, el conjunto se redujo a 620 artículos clave, los cuales cumplían con los criterios de inclusión definidos: relevancia del contenido, fiabilidad del diseño metodológico, vigencia del periodo de observación y unicidad del documento.

En la fase de análisis de datos y visualización, los documentos seleccionados fueron organizados y exportados en formatos. RIS y .CSV, lo que permitió estructurar la información para su análisis mediante herramientas especializadas como VOSviewer, Bibliometrix (RStudio) y Excel. El análisis se llevó a cabo en diferentes niveles: se construyó un conjunto de datos consolidado, se identificaron los autores más relevantes, se clasificaron

los tipos de documentos, y se elaboró una estructura conceptual a partir del análisis de palabras clave, temas emergentes y redes de co-ocurrencia, lo que permitió detectar tendencias temáticas predominantes y vacíos de conocimiento en el campo.

Los datos de importación se organizaron en distintos componentes para facilitar su tratamiento: una sección de importación estructurada, un archivo Raw con los datos sin procesar, un archivo bibliométrico con metadatos relevantes, una colección sencilla con documentos clave para revisión cualitativa, y la selección final de los 620 documentos que conformaron el corpus definitivo del análisis.

Cabe destacar que, además de los artículos académicos seleccionados, se integró documentación externa, como trabajos de grado y artículos especializados, los cuales sirvieron como soporte bibliográfico complementario para fortalecer la argumentación teórica y contextual del estudio.

Este proceso permitió mapear el estado actual de la investigación en el tema de interés, sino que también contribuyó a la construcción de marcos teóricos sólidos, a la identificación de autores influyentes y a la orientación de futuras investigaciones, aportando evidencia clara sobre la evolución y concentración del conocimiento en el área analizada.

6.2 Ensayos experimentales a escala de laboratorio

Los ensayos experimentales se desarrollaron en dos fases utilizando tres muestras de agua cruda recolectadas del río Meléndez, seleccionadas de manera que representaran la variabilidad de la turbiedad de la fuente (26 UNT, 140 UNT y 300 UNT). Previo a su tratamiento, el agua fue caracterizada siguiendo los lineamientos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2023), determinándose la turbiedad mediante el método SM 2130 con un turbidímetro HACH modelo 2100N, el pH mediante el método SM 4500 H+B con un potenciómetro HANNA modelo HI98190 y la alcalinidad total mediante el método SM 2320 B.

Fase 1 – Evaluación preliminar: Se realizaron pruebas de jarras con el propósito de explorar el desempeño de la MO como coagulante natural. Para ello, se evaluaron tres formas de aplicación definidas a partir del análisis bibliométrico: (i) solución de polvo de semillas de MO en agua destilada, (ii) solución de polvo de semillas de MO en solución salina (1M) y (iii) aplicación directa del polvo de semillas de MO, destacando que, las soluciones líquidas (i y ii) se prepararon en tres concentraciones (2, 3 y 5%). En esta fase se consideró un tiempo de sedimentación de 10 minutos, y los ensayos se orientaron a determinar la capacidad de remoción de turbiedad, así como la influencia de la MO en parámetros clave del proceso de coagulación, como el pH y la alcalinidad. A través del análisis estadístico se verificó la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones y formas de aplicación, lo que permitió identificar las condiciones con mayor potencial de eficiencia.

Fase 2 – Evaluación final: Con base en los resultados preliminares, se seleccionaron las dos formas de aplicación con mejor desempeño, incorporando además un segundo tiempo de sedimentación (30 minutos) para contrastar su efecto. En esta etapa, se realizaron correcciones en la preparación del coagulante y en las condiciones de almacenamiento de la solución, se omitió la filtración final con el propósito de preservar el material activo en suspensión. Asimismo, se ampliaron las variables de análisis mediante la inclusión de la estimación del volumen de lodos a través de la prueba de conos Imhoff, y se fortaleció el seguimiento de parámetros fisicoquímicos como pH y alcalinidad, a fin de determinar su influencia en la sedimentabilidad y en la cantidad de lodos generados. Todo el proceso se desarrolló mediante pruebas de jarras, lo que permitió consolidar las condiciones más favorables para la aplicación del coagulante de MO en la remoción de turbiedad.

6.2.1. Obtención y preparación del polvo de semillas de MO en su aplicación de ensayos de jarras como coagulante orgánico

6.2.1.1 Fase 1: Evaluación preliminar

La obtención del polvo de semillas de MO fue realizada con apoyo de un proveedor comercial especializado en el procesamiento y comercialización de insumos derivados de esta especie vegetal, quien llevó a cabo el proceso primario para la obtención del coagulante: descascarillado, molienda y tamizado de las semillas (ver figura 7). El proceso secundario (extracción) y el proceso terciario (filtración) fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Química ambiental del área de ingeniería sanitaria y ambiental de la Universidad del Valle. Cabe resaltar que el proceso terciario de filtración solo se empleó para la fase 1 (evaluación preliminar).

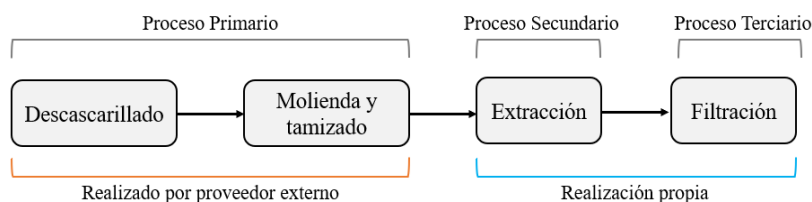


Figura 7. Ruta metodológica para la obtención del coagulante.

Fuente : (Yin & Pritchard et al., 2010).

Descascarillado: según lo indicado por el proveedor, las semillas se seleccionaron visualmente para verificar que estuvieran en buen estado. Luego se secaron en un horno industrial durante 1 hora a 105 °C, lo que facilitó el retiro de las vainas, dejándolas listas para el proceso de molienda.

Molienda y tamizado: las semillas descascarilladas se pulverizaron en un molino manual y el polvo obtenido se tamizó con un cedazo Tyler de 100 µm, hasta obtener partículas finas, que facilitarían su dilución y aumentarían el área de contacto en los pasos posteriores.

El proveedor caracterizó el polvo de MO empleando métodos estandarizados: el tamaño de partícula se verificó por tamizado (100 μm), la densidad mediante picnómetro, la humedad por método gravimétrico y el pH siguiendo el método 4500-H⁺ B. El material presentó un tamaño de partícula inferior a 100 micras, densidad de 1.4 g/cm³, humedad del 10% y pH de 6.5 unidades.

La literatura indica que la granulometría óptima del polvo de MO se encuentra hasta los 150 a 200 entre 100 μm , rango que favorece la exposición de los compuestos activos y mejora su eficiencia coagulante (Yin & Pritchard et al., 2010). Así mismo, el pH del agua influye en el desempeño de las proteínas de MO, cuya efectividad es mayor entre pH 4 y 7, intervalo en el que conservan una carga positiva óptima.

Extracción: Con el polvo de semillas de MO, previamente tamizado hasta obtener una granulometría óptima entre 0,25 y 0,50 mm, se realizó la fase de extracción del coagulante natural en el Laboratorio de Química Ambiental, con base en concentraciones reportadas entre 1 % y 5 % (Restrepo et al., 2017; Salamanca et al., 2018; Gutiérrez et al., 2019). Se prepararon soluciones al 2 %, 3 % y 5 %, empleando dos métodos de extracción comúnmente citados en la literatura: uno con agua destilada y otro con solución salina (Pritchard et al., 2009). En el primer caso, el polvo de semillas se adicionó gradualmente al solvente hasta completar 1 litro de solución con concentraciones equivalentes a 20 g/L (2 %), 30 g/L (3 %) y 50 g/L (5 %). En el segundo método, la solución salina se elaboró disolviendo 58,44 g de NaCl (99 % de pureza) en agua destilada para obtener una concentración 1 M (Oliveira et al., 2022); posteriormente, el polvo de MO se incorporó siguiendo el mismo procedimiento hasta completar un litro de cada solución en las concentraciones señaladas (ver Figura 8).

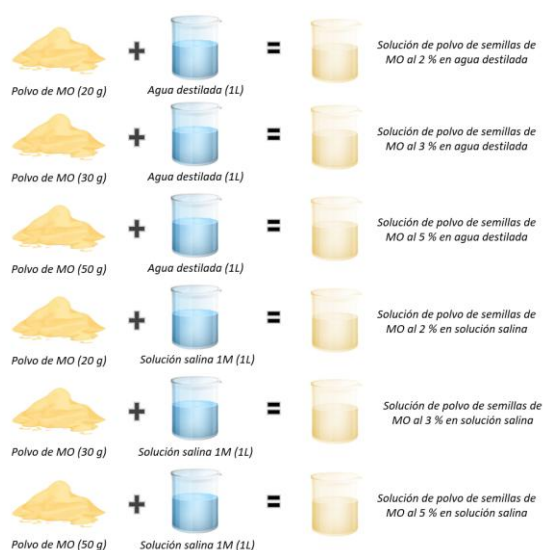


Figura 8. Soluciones realizadas para la obtención del coagulante.

Fuente: Elaboración propia.

Para favorecer la disolución del polvo de MO, cada solución se sometió a agitación con agitador magnético a 250 rpm durante 30 minutos. Sin embargo, las soluciones obtenidas presentaron una composición heterogénea, con un porcentaje de insolubilidad estimado entre 20% y 30% de acuerdo con lo reportado por Sandoval (2013), dependiendo del solvente empleado. En agua destilada, la insolubilidad fue mayor debido a la ausencia de iones que promuevan la interacción con las proteínas activas del coagulante; en contraste, en la solución salina la presencia de iones favoreció una mayor solubilización del material y redujo el grado de insolubilidad.

Filtración: Para la fase de la evaluación preliminar, con el propósito de reducir la presencia de material no disuelto en las soluciones coagulantes, se realizó una primera filtración con papel Whatman de 16 μm . Posteriormente, las soluciones se sometieron a una segunda filtración con papel Whatman de 8 μm , obteniendo un extracto más claro y libre de partículas sólidas.

Al obtener el coagulante en las diferentes formas de aplicación previamente descritas, se llevaron a cabo ensayos de jarras empleando recipientes acrílicos de geometría cuadrada con capacidad de 2 L, utilizando un equipo de agitación marca Phipps & Birds. Las condiciones operativas consideradas en la evaluación preliminar se presentan en la Tabla 6, mientras que en el Anexo 1 se incluye el registro fotográfico correspondiente.

Tabla 6. Condiciones operativas de las pruebas de jarras preliminares para simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.

Tipo de mezcla	Velocidad (RPM)	Tiempo (min)
Mezcla Rápida	300	1
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	0	10

Fuente: Di Bernardo & Sabogal. (2008); Mendoza, & Fernández, (2012).

Las diferentes formas de aplicación de la MO se evaluaron en 12 dosis de coagulante, entre 25 y 300 mg/L, seleccionadas con base en los hallazgos del análisis bibliométrico, de modo que se cubriera un rango representativo de las dosis más empleadas en estudios de este tipo. La Figura 9 esquematiza el diseño del experimento, resaltando que cada ensayo fue realizado por duplicado.

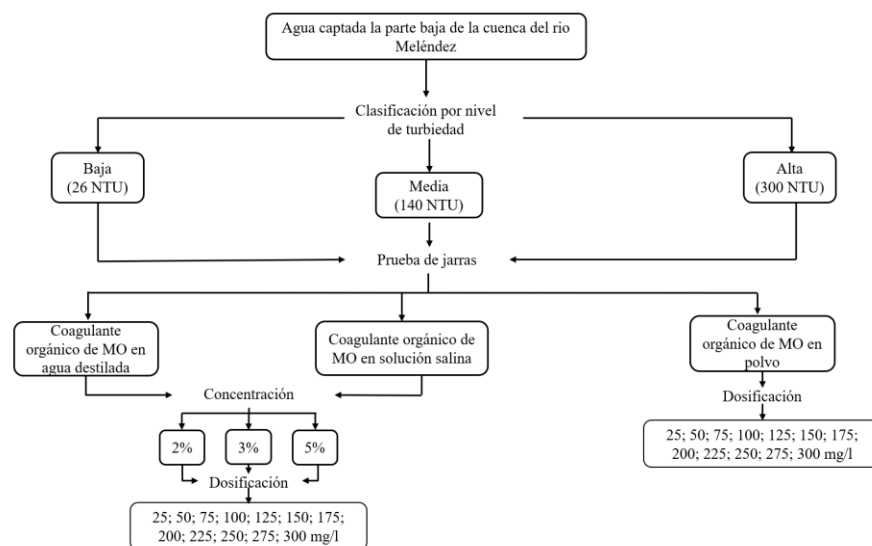


Figura 9. Esquema del diseño experimental para la evaluación preliminar.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la aplicación del coagulante de MO en polvo se realizó estimando la masa correspondiente a cada dosis evaluada mediante la Ecuación 1. Por lo tanto, las cantidades adicionadas variaron entre 50 y 600 mg y al no realizarse ninguna dilución la concentración aplicada fue del 100% (ver tabla 7).

$$m = C * v \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

C = Dosis de coagulante de MO en polvo (mg/L) = 25 a 300 mg/L

m = Masa de coagulante de MO en polvo (mg)

v = Volumen de agua cruda (L) = 2 L

Tabla 7. Cantidad de coagulante de MO en polvo aplicado directamente en la prueba de jarras y su equivalencia en dosis de mg/L.

Dosis de coagulante de MO en polvo (C: mg/L)	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
Masa (m: mg)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis gráfico y herramientas estadísticas como Análisis de varianza (ANOVA) en el Software Excel, para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre las concentraciones evaluadas de los coagulantes de MO, así como los resultados de los ensayos con la aplicación directa de polvo de MO. Para esto, fueron establecidos varios grupos de experimentación con distintos porcentajes de concentración. Cada grupo contó con nueve observaciones, y se analizó tanto

el promedio como la varianza de cada uno con el fin de analizar la variabilidad entre y dentro de los grupos experimentales

Se realizó también un análisis específico de las variaciones de los valores de pH, alcalinidad y turbiedad al inicio y final de las pruebas. Para ello se utilizó la *Ecuación 2* y *3*, con el fin de conocer la magnitud de dicha variación.

$$\% \text{ de variación unidad pH/Alcalinidad} = \frac{\text{Valor inicial} - \text{Valor final}}{\text{Valor inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\% \text{ remoción de turbiedad} = \frac{\text{Turbiedad inicial} - \text{Turbiedad final}}{\text{Turbiedad inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

6.2.1.2 Fase 2: Evaluación final

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación preliminar, se seleccionaron dos formas de aplicación para la fase complementaria: la solución de polvo de semillas de MO al 2 % en agua destilada y la aplicación directa del polvo de semillas, por ser las que mostraron un desempeño más favorable frente a las demás alternativas evaluadas.

A diferencia del procedimiento aplicado en la fase 1, en esta ocasión se omitió la filtración final (Figura 10), considerando que este paso elimina una fracción importante de material no disuelto que influye directamente en la concentración efectiva de la solución, lo que podría generar subestimaciones críticas en la dosificación del coagulante. Paralelamente, se ajustaron las condiciones de almacenamiento, preservando las soluciones bajo refrigeración a 4 °C, con el propósito de mantener su estabilidad y funcionalidad, en concordancia con reportes que advierten sobre la limitada vida útil de estos extractos (48 a 72 horas) debido a la degradación de las proteínas coagulantes (MOCPs) y a la proliferación microbiana (Ndabigengesere et al., 1995; Ghebremichael et al., 2005; Salamanca et al., 2018).

Con base en estas correcciones y en las observaciones de las pruebas preliminares, así como en la información obtenida de la revisión bibliométrica complementaria, en esta fase se realizaron ajustes para mejorar los procesos de coagulación y clarificación, con el fin de alcanzar turbiedades en el efluente clarificado inferiores a 5 UNT (AWWA, 2019). se amplió el rango de dosificación de 15 a 300 mg/L, manteniendo las concentraciones previamente evaluadas e incorporando dosis intermedias, lo que permitió ensayar un total de 24 dosificaciones para cada forma de aplicación del coagulante, y se amplió el tiempo de sedimentación. La turbiedad se midió a los 10 y 30 minutos, para cada uno de los niveles de turbiedad estudiados (26, 140 y 300 UNT). Esto se consideró necesario debido a que, al tratarse de un coagulante de origen natural, los flóculos tienden a ser menos densos y requieren más tiempo para sedimentar de manera efectiva (Katayon et al., 2006; Melaku, 2020).

El resto de los parámetros operativos, como los tiempos y gradientes de mezcla rápida (1 min y 300 r.p.m) y lenta (20 min y 40 r.p.m), se mantuvieron iguales a los establecidos en la evaluación preliminar. En el presente estudio, la velocidad de sedimentación (V_s) se estimó a partir de ensayos de jarras con un volumen de 2 L, aplicando la relación correspondiente entre altura de columna y tiempo de sedimentación. Los tiempos de 10 min (600 s) y 30 min (1800 s) arrojaron velocidades promedio de $\approx 2,55 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ y $\approx 0,85 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente. Considerando que el rango recomendado para la semilla de Moringa oleífera oscila entre 0,10 y 1,00 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$, se observa que el valor obtenido a 30 min se encuentra dentro del intervalo reportado en la literatura, mientras que el de 10 min resulta notablemente superior. Esto sugiere que trabajar con tiempos de sedimentación reducidos puede sobreestimar la eficiencia del proceso y conducir a diseños subdimensionados de unidades de sedimentación o a pérdidas en la remoción de sólidos bajo condiciones reales de operación. En contraste, el tiempo de 30 min representa un valor más realista y ajustado al comportamiento hidráulico y a las características de los flóculos formados, por lo que se adoptó como referencia metodológica en los ensayos finales (Ribeiro et al., 2019).

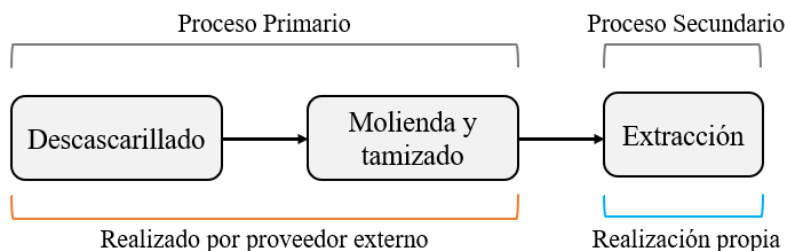


Figura 10. Ruta metodológica para la obtención del coagulante en la evaluación final.

Fuente : (Yin & Pritchard et al., 2010).

En el caso del coagulante de MO en polvo, se estimó la masa correspondiente para cada dosis evaluada con base en la Ecuación 1. Las cantidades de coagulante en polvo añadidas en cada ensayo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Cantidad de coagulante de MO en polvo aplicado directamente en la prueba de jarras finales y su equivalencia en dosis de mg/L.

Dosis de coagulante de MO en polvo (C: mg/L)	Masa (m: mg)	Dosis de coagulante de MO en polvo (C: mg/L)	Masa (m: mg)
15	30	160	320
25	50	175	350
35	70	185	370
50	100	200	400
60	120	210	420
75	150	225	450
85	170	235	470
100	200	250	500
115	230	260	520
125	250	275	550
135	270	285	570
150	300	300	600

Las pruebas de jarras se realizaron por duplicado, midiendo turbiedad residual, pH y alcalinidad a los 10 y 30 minutos de sedimentación. En un segundo conjunto de pruebas complementarias, el contenido de las jarras con agua floculada se transfirió a conos Imhoff con el fin de evaluar la velocidad de sedimentación, el volumen de lodos generados y las características de los flóculos. El diseño experimental utilizado en las pruebas de jarras finales se presenta en la Figura 11.

El diseño experimental utilizado en las pruebas de jarras finales se presenta a continuación.

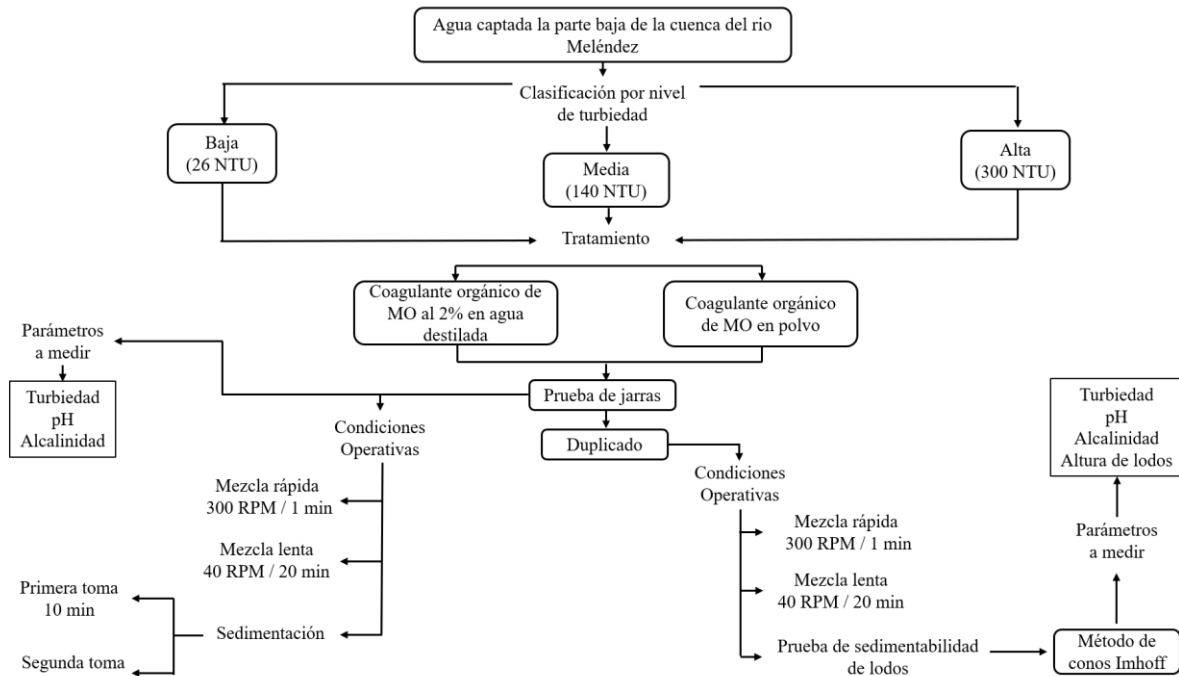


Figura 11. Esquema del diseño experimental para pruebas finales.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se realizó un análisis estadístico con el fin de identificar la variabilidad de los datos obtenidos en el primer ensayo y sus respectivos duplicados. Para ello, se aplicaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA), lo que permitió evaluar las diferencias significativas tanto entre los grupos de comparación (agua destilada MO y aplicación directa de polvo de MO) como entre las diferentes dosis aplicadas. Este procedimiento facilitó determinar si las variaciones observadas en los resultados responden a efectos reales de los tratamientos o si corresponden a variaciones aleatorias propias de la repetición experimental.

7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Análisis bibliométrico

7.1.1 Caracterización de la Producción Científica: Áreas Temáticas y Tipología Documental (1995-2025)

Se identificaron 620 documentos en el campo de ingeniería y medio ambiente, de los cuales 411 provienen del sistema de información Scopus, 152 del sistema Web of Science de Clarivate y 57 de SciELO. El 78,80% de los documentos correspondió a artículos de investigación, 13,70% artículos de revisión y 1,00% capítulos de libros y el 6,50% restante entre libros, capítulos de libros y reseñas.

Desde el punto de vista de áreas del conocimiento, las principales identificadas en los documentos analizados (Figura 12), son el área de ciencias ambientales (40,20%), seguida del área de ingeniería (13,80%).

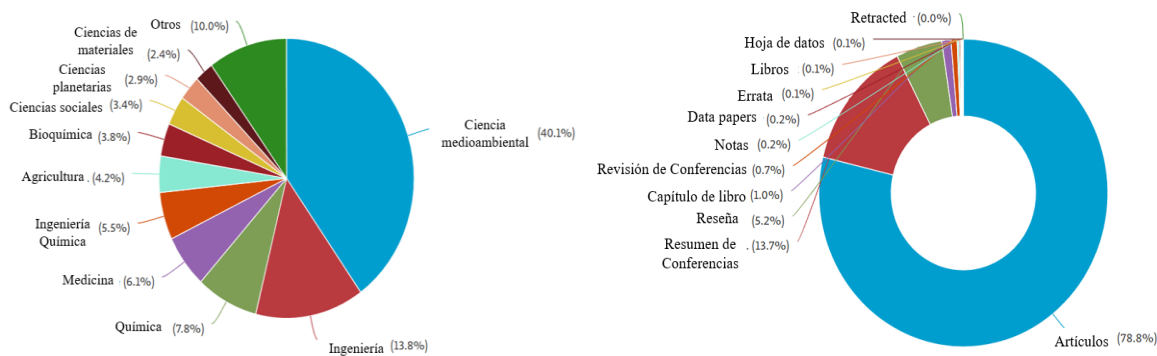
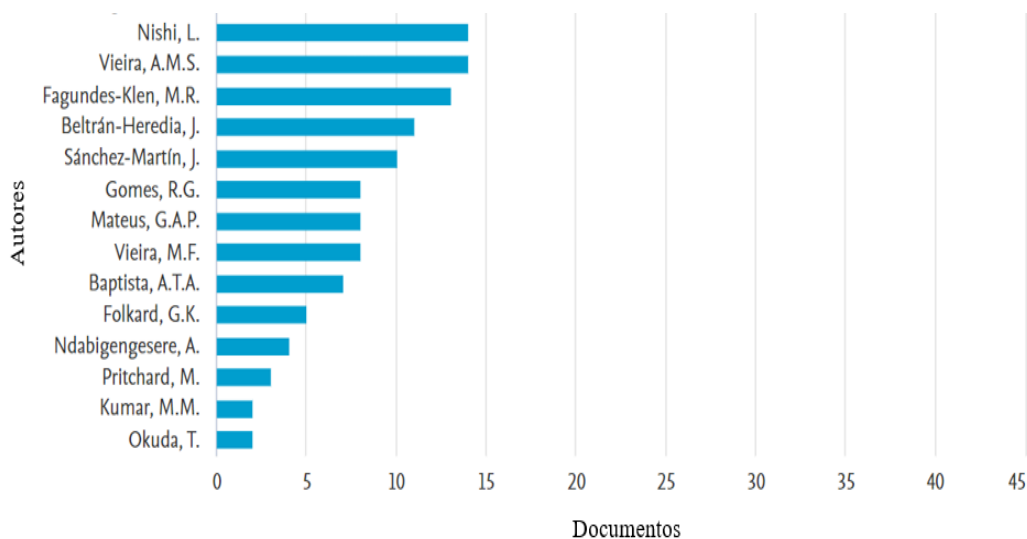


Figura 12. Áreas de conocimiento relacionadas con los estudios de MO entre 1995 y 2025.
Fuente: bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO.

Respecto a estudios relacionados con MO para el tratamiento de agua, diversos autores han contribuido significativamente al entendimiento de los mecanismos de acción de MO como coagulante (ver Figura 13). Se destacan los aportes de autores como Bergamasco, (2008), Nishi & Vieira, (2016), Kumar et al., (2022) y Pritchard et al., (2010), quienes tienen una importante trayectoria investigativa en la temática.



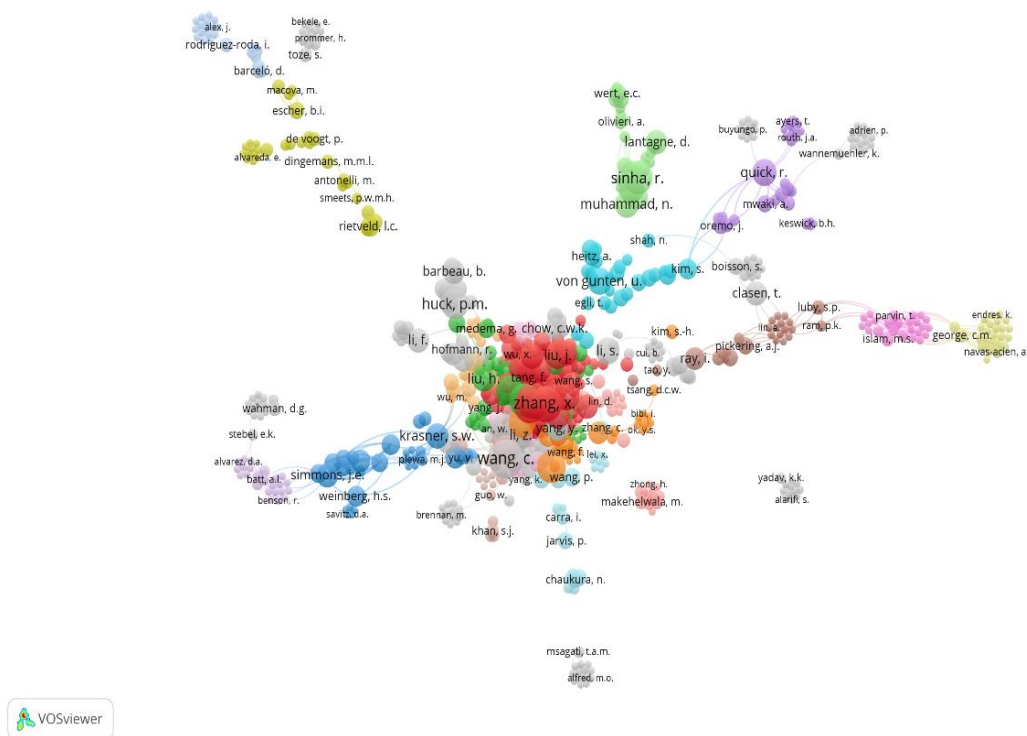


Figura 13. Gráfico de barras y mapeo de influencia de investigación por autores.
Fuente: bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y VOSviewer 1.6.2.

En el mapa de la Figura 13 se representan las redes de coautoría e interconexión temática entre los principales investigadores en MO. El tamaño de los nodos indica el número de publicaciones, mientras que los colores agrupan comunidades de colaboración. Los autores más productivos, como Ndhlala, N., Vieira, A.M.S. y Ndabigengesere, se integran en clústeres temáticos diferenciados, enfocados en áreas como tratamiento y potabilización de agua, propiedades antimicrobianas, eliminación de contaminantes, aplicaciones agrícolas y nutricionales, así como estudios fitoquímicos. Las conexiones más densas corresponden a investigaciones sobre procesos de tratamiento de agua y caracterización química de las semillas, lo cual coincide con las tendencias descritas en la literatura (Teklehaimanot & Melaku, 2020).

La coagulación inducida por extractos de MO se fundamenta en la acción sinérgica de dos mecanismos principales: (i) adsorción y neutralización de cargas y (ii) formación de puentes interpartículas, siendo el mecanismo más documentado y aceptado la adsorción y neutralización de carga, que generalmente oscila entre el rango de pH 6,5–8,5, y con dosis óptimas generalmente comprendidas entre 25 y 300 mg/L, dependiendo de la calidad del agua y la concentración inicial de turbiedad. En este proceso, las proteínas catiónicas presentes en el extracto (MOCP), caracterizadas por su elevada carga positiva, se adsorben sobre las superficies de las partículas coloidales cargadas negativamente como arcillas, limos

y microorganismos, neutralizando la carga superficial, reduciendo drásticamente el potencial zeta y colapsando la doble capa eléctrica. Esto elimina la repulsión electrostática y favorece la agregación mediante fuerzas atractivas de corto alcance, como las de van der Waals, lo que facilita la aglomeración y posterior sedimentación (Ndabigengesere et al., 1995).

El segundo mecanismo, la formación de puentes interpartículas, tiene una prevalencia menor como mecanismo dominante en la MOCP debido a su bajo peso molecular (6,5–30 kDa), insuficiente para generar puentes efectivos entre partículas distantes, como sucede con polímeros sintéticos de alto peso molecular. No obstante, es posible que actúe de manera complementaria como “puente de corta distancia” o parche electrostático, fortaleciendo la cohesión de los flóculos generados por neutralización de carga. De este modo, la neutralización de carga sería el mecanismo principal, mientras que el puente polimérico aportaría estabilidad mecánica y resistencia a la ruptura de los flóculos durante el crecimiento, sedimentación y consolidación (Santos et al., 2012).

El interés científico por comprender y optimizar estos mecanismos ha impulsado un incremento sostenido en la investigación sobre la MO aplicada al tratamiento de agua, tal como se refleja en la evolución de publicaciones mostrada en la Figura 14, la cual muestra la evolución anual de publicaciones incluyendo artículos de revisión e investigación sobre tratamiento de agua, evidenciando un crecimiento exponencial desde 1995 hasta el primer semestre de 2025. A partir de 2010 se observa un incremento sostenido en el número de estudios (Alves et al., 2018), con un promedio de 15 a 20 publicaciones anuales en los primeros años y un crecimiento más notable a partir de 2013. Desde 2015, la participación autorial ha superado los 100 autores por año, alcanzando un máximo cercano a 160 en 2024. Aunque hubo descensos puntuales en 2018 y 2022, la tendencia general entre 2013 y 2023 muestra una intensificación de la producción científica y colaboración entre autores. La aparente caída en 2025 se atribuye a la parcialidad de los datos, ya que reflejan solo la producción registrada hasta la fecha de corte.

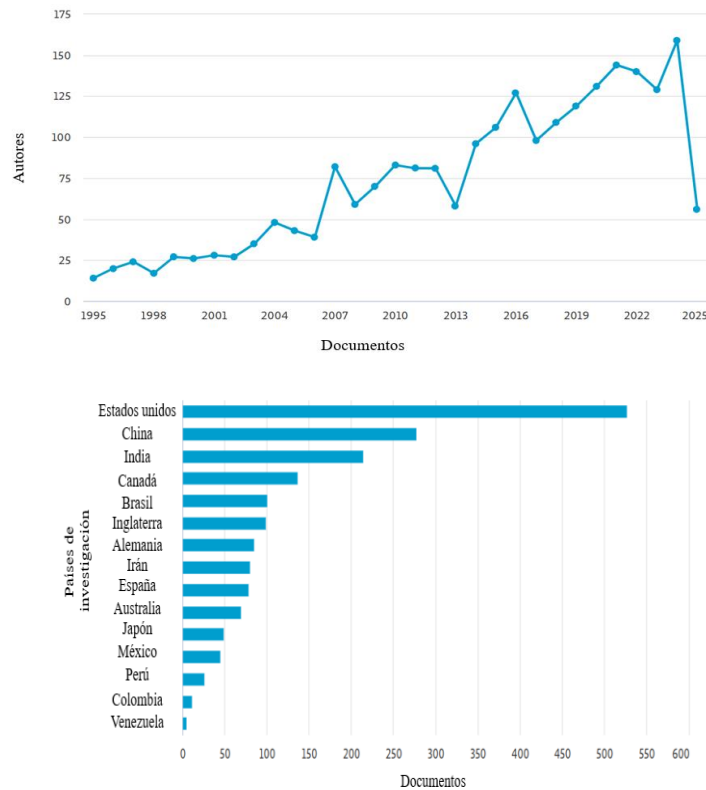


Figura 14. Evolución del número de publicaciones y regiones relacionadas con el uso de la MO como coagulante entre 1995 y 2025.

Fuente: bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO.

La investigación sobre la MO como coagulante presenta una distribución geográfica desigual, concentrándose en regiones específicas que reflejan dinámicas particulares de generación y circulación del conocimiento científico. A nivel de países, Estados Unidos e India lideran ampliamente tanto en volumen de publicaciones como en impacto de citas (8.896), seguida por Brasil (237), Nigeria (220).

En este contexto, el análisis bibliométrico permitió identificar patrones temáticos a través de mapas de ocurrencia de palabras clave (Figura 15) en que se identificaron 4 clúster. Para la primera figura el clúster 1 (color rojo) corresponde al más grande y denso, representando la mayor frecuencia de ocurrencia, está encabezado por palabras clave como “Moringa Oleífera” (287 ocurrencias) y “Coagulación-Floculación” (90 ocurrencias) las cuales se encuentran relacionadas con “Eficiencia de remoción” (12 ocurrencias) y con “Efectos de pH” (9 ocurrencias). El clúster 2 (color azul) estuvo liderado por las palabras “Coagulante natural” (47 ocurrencias), “Semilla de planta” (55 ocurrencias) y “Extracción” (38 ocurrencias). En el clúster 3 (Color verde) se identificaron palabras como “Tratamiento de agua” (165 ocurrencias) y “Calidad de agua” (56 ocurrencias). Finalmente, en el clúster 4 (Color amarillo) se identificaron palabras como “Turbiedad” (153 ocurrencias).

Para la segunda figura se identificaron cinco clústeres principales, el clúster 1 (color rojo) corresponde al más estudiado, representando la mayor frecuencia de ocurrencia, encabezado por términos como “disinfection, antimicrobial activity, Escherichia coli y chlorine”, asociados a investigaciones sobre el control microbiológico y la reducción de patógenos en el agua. El clúster 2 (color verde) se relaciona con procesos fisicoquímicos de tratamiento, liderado por palabras como “coagulation, flocculation, turbidity removal y adsorption”, asociados a la eliminación de metales pesados y contaminantes orgánicos. El clúster 3 (color azul) está conformado por conceptos como “groundwater, pH, water quality y sanitation”, que reflejan el interés en la calidad del agua, parámetros fisicoquímicos y enfermedades hídricas, además de su conexión con la sostenibilidad. El clúster 4 (color amarillo) integra términos como “water supply, human, hygiene y hand washing”, que enfatizan el acceso al agua, la salud pública y las condiciones en comunidades rurales y países en desarrollo. Finalmente, el clúster 5 (color morado) agrupa palabras como “organization, World Health Organization (WHO), policy y water management”, centradas en la regulación y lineamientos internacionales.

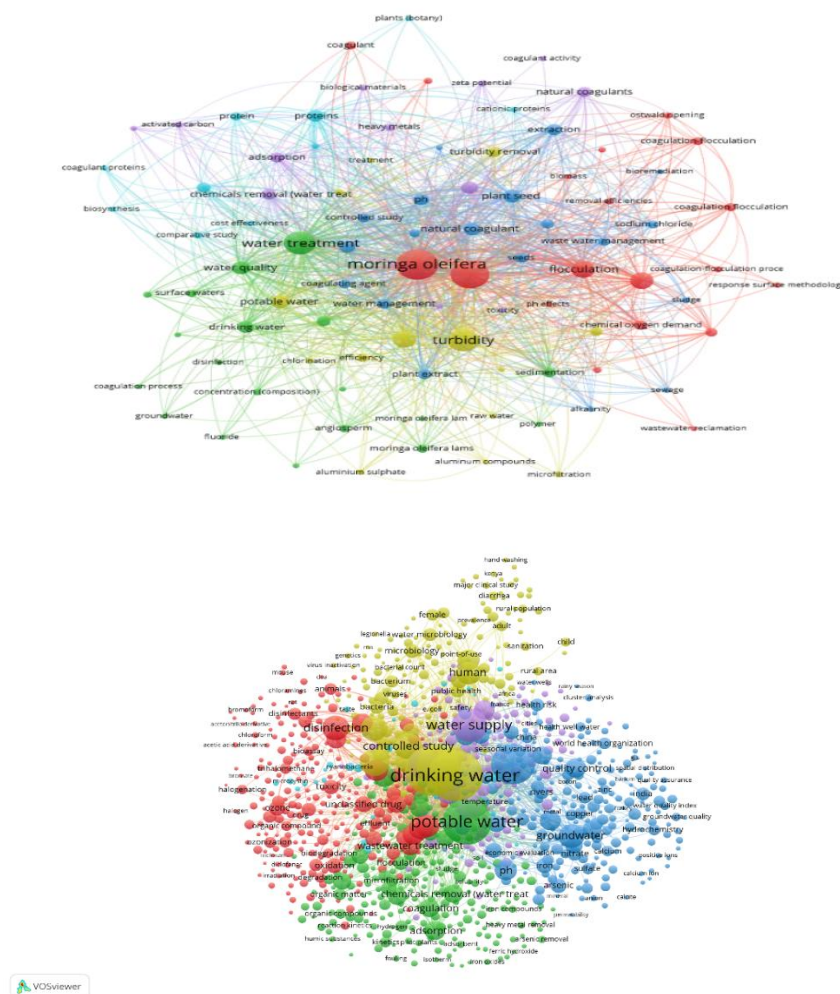


Figura 15. Visualización en red del mapa de palabras clave de investigación de estudios relacionados con MO. **Fuente:** VOSviewer 1.6.2.

La investigación sobre la aplicabilidad de la MO como coagulante ha avanzado en la comprensión de sus mecanismos de acción, pero persisten brechas críticas que limitan su estandarización y escalabilidad. Una de las controversias más relevantes radica en la identidad del agente coagulante: la hipótesis predominante atribuye la actividad a una proteína catiónica soluble en agua, con un peso molecular entre 6,50 y 30 kDa y un punto isoeléctrico elevado (pH 10–11) (Alazaiza et al., 2025), mientras que la hipótesis alternativa, respaldada por Okuda et al. (2001), propone un polielectrolito no proteico de menor peso molecular (~3,00 kDa).

Esta discrepancia posiblemente asociada a la forma de extracción (Proceso secundario), sugiere que el método de extracción (Agua destilada vs. salina) podría aislar componentes activos distintos, generando variabilidad en los resultados y constituyendo una de las principales brechas de conocimiento (Alam et al., 2020). Aunque existen numerosos estudios sobre los mecanismos y composiciones químicas potenciales, todavía se requieren investigaciones sistemáticas que correlacionen la naturaleza química del agente activo con el método de extracción, las condiciones del agua y el rendimiento final, para avanzar hacia un consenso científico sólido (Ndabigengesere et al., 2015; Jahn, 1988). En la literatura se encuentran estudios sobre la evaluación de métodos de preparación del coagulante (polvo de semilla cruda, Soluciones acuosas, Soluciones salinas, proteínas purificadas), siendo el uso de Soluciones salinas una de las líneas más exploradas por su mayor eficiencia (Alazaiza et al., 2025). Sin embargo, aspectos como el impacto del desengrasado previo de la semilla y su influencia en la reducción de materia orgánica residual y citotoxicidad, aunque reportados, presentan resultados contradictorios y menos evidencia sistemática (Nishi et al., 2012).

En paralelo, las tendencias investigativas se han concentrado en la optimización de parámetros operativos como turbiedad inicial, dosis de coagulante, pH de coagulación, y tiempos de mezcla-sedimentación. Áreas como el tratamiento de aguas de baja turbiedad, la reducción de tiempos de sedimentación y la mitigación de efectos secundarios (p. ej., aumento de DQO) son menos estudiadas y representan oportunidades clave para la investigación aplicada (George et al., 2021). En conjunto, la literatura revela un panorama interdependiente, donde la eficacia del coagulante depende de una matriz compleja de variables fisicoquímicas y operativas, lo que exige estudios más integrales y comparativos para traducir el potencial de MO en aplicaciones consistentes y escalables.

Otra tendencia emergente en la investigación sobre la MO es el cambio de enfoque que la posiciona no solo como un coagulante, sino como un biosorbente multifuncional capaz de remover una amplia gama de contaminantes mediante interacciones de adsorción. Este potencial se atribuye a la presencia de grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos en las proteínas y polisacáridos de la semilla, que facilitan la unión con diversos compuestos (Gold et al., 2023). La remoción de metales pesados (Fe, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr) ha sido ampliamente documentada, alcanzando eficiencias del 68 % al 98 %, mientras que investigaciones más recientes se orientan hacia microcontaminantes orgánicos como

colorantes sintéticos, pesticidas y fármacos y a la eliminación de aniones como fosfato y fluoruro. Sin embargo, aunque la evidencia inicial es prometedora, la mayoría de los estudios se han desarrollado a escala de laboratorio y bajo condiciones controladas, lo que deja abierta la brecha de conocimiento sobre su eficacia en matrices reales de agua, su capacidad de regeneración como bioadsorbente y la evaluación comparativa frente a materiales adsorbentes convencionales en términos de costo, estabilidad y sostenibilidad operativa (Villar et al., 2024).

Otra línea de investigación en rápido crecimiento es la integración de la MO en sistemas híbridos de tratamiento de agua, buscando potenciar sus ventajas y compensar sus limitaciones. Como ayudante de coagulación, su uso combinado con coagulantes inorgánicos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, PAC, FeCl_3) ha mostrado reducir significativamente la dosis requerida de estos últimos, disminuyendo costos, riesgos por residuos metálicos y volumen de lodos, mientras mejora la densidad y velocidad de sedimentación de los flóculos. La incorporación de etapas posteriores de filtración rápida hasta tecnologías avanzadas como ultrafiltración y nanofiltración ha demostrado ser eficaz para remover materia orgánica residual y partículas finas, superando una de las debilidades recurrentes de MO (Kenea et al., 2023). Además, la investigación de frontera explora su funcionalización con nanopartículas (ZnO , Ag) para conferir propiedades antimicrobianas, o con nanopartículas magnéticas para facilitar la separación post-tratamiento (Villar et al., 2024).

No obstante, la gran mayoría de la investigación sobre MO se ha realizado a escala de laboratorio, utilizando pruebas de jarras, existiendo una brecha crítica en la literatura con respecto a estudios a escala piloto y, sobre todo, a escala real. Aunque existen algunos estudios piloto, son escasos. Las pruebas a escala real, donde MO reemplaza por completo al sulfato de aluminio como coagulante primario en una planta municipal, son excepcionalmente raras, con una de las pocas documentadas en Malawi (País en África Oriental). Esta falta de validación a mayor escala deja sin respuesta preguntas cruciales sobre los desafíos de ingeniería práctica, como la logística de la preparación de soluciones frescas *in situ* (que tienen una vida útil corta, de unos pocos días), los requisitos de los equipos de dosificación y la estabilidad operativa a largo plazo (George et al., 2021).

7.1.2 Caracterización Fisicoquímica y Proteica de la MO.

El análisis químico de las semillas de MO revela una composición con 6,2% de humedad, 36% de grasas y 5,6% de cenizas. Aproximadamente el 40% del peso de la semilla corresponde a aceites y grasas sin función coagulante, lo que influye negativamente en la eficiencia del coagulante y en el control de la carga orgánica (Folkard & Sutherland, 1996; Mendoza et al., 2000). Estudios como los de Campos et al. (2003) han identificado 17 aminoácidos en el perfil activo de MO, incluyendo ácido glutámico, aspártico, arginina, lisina e histidina. La presencia significativa de aminoácidos polares e hidrofílicos, con un contenido total del 4,135% en peso, indica que los compuestos coagulantes activos son principalmente proteínas o cadenas polipeptídicas solubles en agua (Ndabigengesere et al., 1995). El ácido

glutámico (1,68%) y la arginina (0,69%) destacan por su abundancia, mientras que la tirosina es la menos representada (0,11%). Sin embargo, debido a que solo una pequeña fracción de la semilla contiene estos compuestos activos, se requieren dosis relativamente altas para lograr resultados eficaces en el tratamiento del agua. En este contexto, la alta proporción de grasas sin función coagulante hace que un proceso de desgrasado previo sea altamente recomendable para optimizar la concentración del principio activo y maximizar la eficiencia del tratamiento.

Si las grasas presentes en las semillas de MO no se eliminan, actúan como material inerte que diluye las proteínas coagulantes activas, lo que obliga a emplear una mayor cantidad de materia prima para alcanzar el mismo efecto coagulante. Esto no solo incrementa el costo del tratamiento, sino que también introduce cantidades significativas de materia orgánica disuelta y suspendida (COD/COT) en el agua tratada. Dicho aporte orgánico puede servir como fuente de nutrientes para el recrecimiento microbiano en las redes de distribución y actuar como precursor de subproductos de desinfección (SPD) potencialmente nocivos si el agua se somete posteriormente a cloración (Mendoza et al., 2000). Además, el uso de MO enfrenta otros desafíos operativos, como la variabilidad en la calidad de las semillas, la escalabilidad del proceso de extracción y la estabilidad del coagulante bajo condiciones de almacenamiento cálidas y húmedas. A nivel composicional, Campos et al. (2003) identificaron (Figura 16) que ocho de los 17 aminoácidos presentes en el agente activo de las semillas son no polares o hidrofóbicos, mientras que los restantes presentan grupos radicales polares e hidrofílicos, con un contenido total del 4,135% en peso. Esta combinación de características químicas, junto con las limitaciones técnicas mencionadas, resalta la importancia de procesos previos como el desgrasado y el control de calidad para optimizar la eficiencia y seguridad del coagulante.

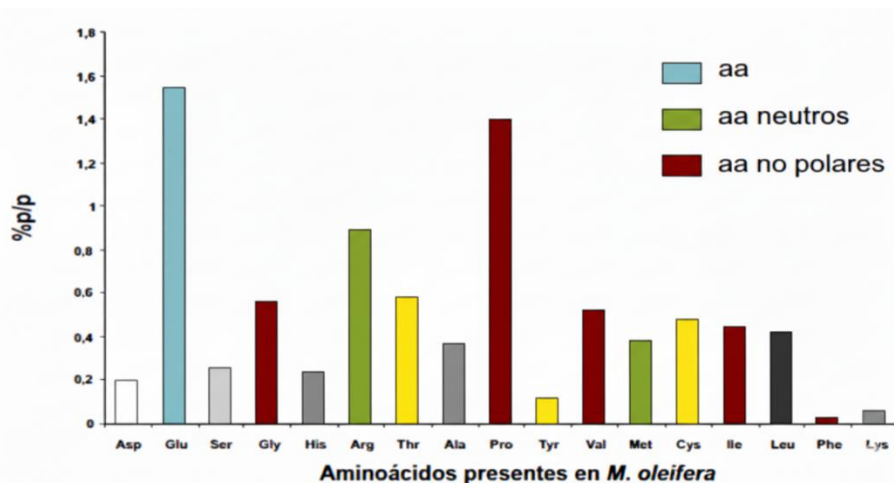


Figura 16. Clasificación y porcentaje en peso de los aminoácidos que componen la proteína activa de MO. **Fuente:** Campos, J et al. (2003)

Nota: Nomenclatura aa significa grupo de “Aminoácidos”

La caracterización proteica de las semillas de MO destaca su naturaleza como polielectrolito, con aminoácidos aniónicos (Glu, Asp) y catiónicos (His, Arg, Lis) presentes en su superficie. Estos aminoácidos facilitan interacciones con partículas coloidales, esenciales para la coagulación-floculación y la remoción de turbiedad en el agua (Campos et al., 2003).

Los grupos radicales de aminoácidos como Asp, Glu, His, Arg y Lis pueden reaccionar químicamente con las partículas coloidales responsables de la turbiedad y el color, formando puentes químicos que aumentan el tamaño de las partículas y promueven su eventual precipitación (Campos et al., 2003).

En particular, la proteína MO 2.1, con un peso molecular de aproximadamente 6.50 kDa y compuesta por 60 aminoácidos, exhibe una carga positiva notable, representada por el 14.70% de aminoácidos cargados positivamente, incluyendo 7 argininas y 1 histidina. En contraste, solo un 1.6% de los aminoácidos tienen carga negativa, siendo el ácido aspártico el responsable (Broin et al., 2002). Esta composición resulta en una carga global positiva para la proteína, evidenciada por un punto isoeléctrico de 12.60 en solución (Broin et al., 2002).

En el campo del tratamiento de agua, la eficacia del coagulante depende de la extracción, procesamiento y dosificación, asegurando una pureza adecuada sin desperdicio de recursos. La apariencia del coagulante debe ser homogénea, con partículas menores de 100 micras, densidad de 1.20 a 1.40 g/cm³ y un color que varía entre verde amarillento y marrón claro. Las soluciones coagulantes de MO presentan densidades ajustadas según su concentración (1%: 1.01 g/mL; 5%: 1.05 g/mL) y mantienen efectividad entre 2 y 7 días bajo condiciones óptimas. La calidad se evalúa mediante el método Kjeldahl para la proteína total y análisis de cenizas tras incineración a 550 °C (Ndamitso & Bello, 2018; Fera et al., 2014).

La Tabla 9 sintetiza los principales parámetros de calidad de la semilla para la solución de coagulante a base de MO.

Tabla 9. Criterios de calidad para la solución de Moringa Oleífera (MO).

Criterio	Explicación	Valor	Referencia
Pureza	*Concentra mayor cantidad de componentes activos *Favorece neutralización de cargas negativas *Suministro correcto del producto	95%	Restrepo et al., (2017) Salamanca, J. D et al., (2018)
Proteína catiónica	*Favorecen la coagulación *Propiedades antimicrobianas *Fortalecimiento de estructura de flóculos	5 - 10 %	Faizi et al., (1998)
Aminoácidos polares		~4.135 % del peso total	
Aminoácidos hidrofóbicos		Fracción relevante (8 de 17 aa)	
Péptidos		0,2 - 0,5 %	
Alcaloides		10 % (máx.)	
pH	Componentes inertes que “diluyen” las proteínas activas e incrementan la carga orgánica residual (DOC, COD). Son estándares químicos que permiten comparar el coagulante de MO con otras opciones de tratamiento	7-9 unds	Restrepo et al., (2017)
Carga orgánica residual (DOC)		< 20 %	
Grasas		25% (máx.)	
Aceites		0,5% (máx.)	
Humedad		< 10 %	
Polvo fino		-	
Homogéneo		-	
Sin grumos	Características físicas	-	
Color		Marrón claro	
Olor		Propio no desagradable	

7.1.3 Métodos de Preparación y Extracción en el Rendimiento del Coagulante

La preparación de coagulantes a partir de semillas de MO involucra un conjunto de metodologías cuya elección influye de manera directa en la eficiencia del tratamiento y en la viabilidad de su implementación. Estas metodologías se pueden estructurar, siguiendo el esquema planteado por Yin (2010), en tres fases: preparación de la semilla (proceso primario), extracción del coagulante (proceso secundario) y purificación (proceso terciario) (Ver figura 17).

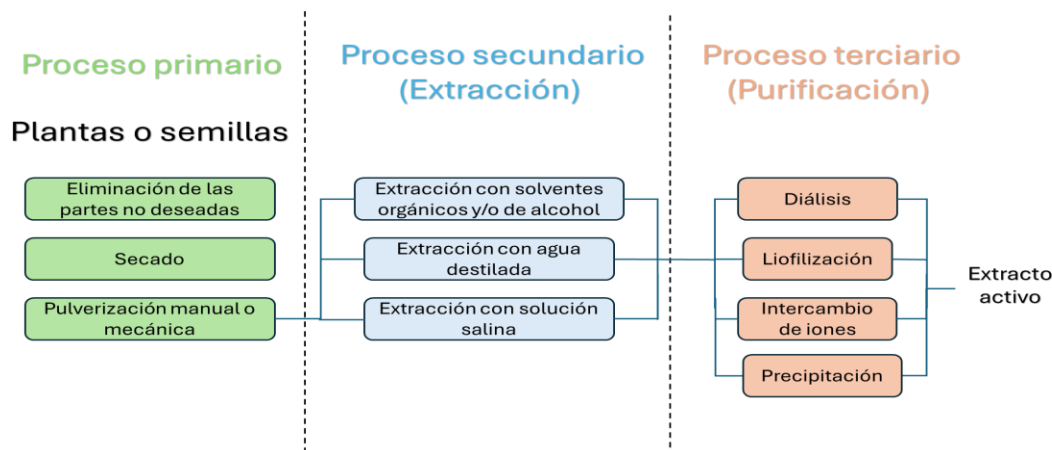


Figura 17. Procesos para la preparación del coagulante orgánico.
Fuente: adaptado de Yin (2010).

Proceso primario: preparación del material

La literatura especializada establece que la preparación del coagulante orgánico derivado de semillas de MO requiere prácticas estandarizadas que garanticen la estabilidad, calidad y reproducibilidad del producto. Investigaciones de Pritchard et al. (2010) y Asrafuzzaman et al. (2011) coinciden en que se deben emplear únicamente semillas maduras, procedentes de vainas completamente secas, las cuales deben ser lavadas para eliminar impurezas y posteriormente secadas al sol durante un periodo de 2 a 3 días antes de su tritución. Estudios más recientes (Hoyos et al., 2017; Gutiérrez, 2022) destacan la importancia del control higiénico durante la manipulación, así como la uniformidad en los procesos de molienda y tamizado para reducir la variabilidad y asegurar la obtención de un polvo fino, condición que favorece la eficiencia del coagulante.

Sin embargo, la disponibilidad de semillas puede verse condicionada por la estacionalidad de la cosecha y por factores climáticos que dificultan su secado. En entornos rurales, la ausencia de equipos especializados para molienda y tamizado, junto con el acceso limitado a electricidad, representan barreras técnicas relevantes (Rojas & Castaño, 2022).

El proceso de preparación del coagulante comprende varias etapas clave (Cardoso et al, 2013):

Cosecha y secado: La recolección debe realizarse directamente del árbol, seleccionando únicamente semillas maduras y completamente secas, ya que las semillas verdes o inmaduras presentan baja o nula actividad coagulante. El secado puede realizarse mediante exposición solar o utilizando hornos a temperaturas controladas (40 °C, 60 °C o 105 °C), lo que permite eliminar la humedad residual, prevenir la degradación microbiana y preservar las proteínas activas responsables de la coagulación.

Descascarillado: Consiste en la remoción manual o mecánica de la cáscara y las alas de la semilla para aislar el núcleo. Este paso es crítico, dado que extractos obtenidos de núcleos descascarillados presentan una eficiencia de remoción de turbiedad superior (>90%) y requieren dosis más bajas en comparación con extractos de semillas enteras.

Molienda y tamizado: La reducción del tamaño de partícula del núcleo incrementa la superficie de contacto y, por tanto, la eficiencia de la extracción de compuestos activos. Métodos de bajo costo, como el uso de mortero y mano, son comunes en zonas rurales y han demostrado producir coagulantes con elevada eficacia en la remoción de turbiedad, siendo comparables e incluso superiores a métodos mecánicos como licuadoras domésticas. El polvo resultante suele ser tamizado para obtener partículas de tamaño uniforme (p. ej., <210 μm , 250 μm , 710 μm), lo que asegura la consistencia del producto final y facilita la dosificación.

El pretratamiento de las semillas de MO constituye un factor determinante en el rendimiento y la calidad del coagulante obtenido para el tratamiento de agua. Entre estos, el desengrasado que puede incrementar significativamente su poder coagulante, aunque no es un paso obligatorio. Su implementación requiere sistemas y métodos de laboratorio especializados, por lo que su aplicación a gran escala en contextos rurales o de bajos recursos puede resultar limitada.

Las semillas de MO contienen aproximadamente un 40% de aceite en peso, compuesto que no contribuye a la coagulación y que, por el contrario, puede formar emulsiones que interfieren con la actividad superficial de las proteínas coagulantes, disminuyendo la formación de flóculos. Además, el aceite residual aumenta el Carbono Orgánico Disuelto (COD) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el agua tratada, lo que resulta indeseable desde el punto de vista de la calidad final del efluente.

En cuanto a los métodos de desengrasado, el más utilizado a nivel de laboratorio es la extracción por solvente tipo Soxhlet, empleando disolventes como *n*-hexano o éter de petróleo, que logran una alta eficiencia en la remoción de aceite. Alternativamente, el etanol se utiliza como opción más sostenible, debido a su menor toxicidad y origen renovable. Otra técnica disponible es el prensado en frío, que evita el uso de solventes químicos, aunque generalmente presenta un menor rendimiento de extracción de aceite.

Estudios como el de García-Fayos et al. (2010) reportaron mejoras de hasta un 30% en la remoción de turbiedad en aguas de alta carga (200 UNT) al emplear semillas desgrasadas. Sin embargo, otros trabajos, como el de Skaf et al. (2021), no encontraron diferencias significativas respecto al uso de semillas enteras, lo que sugiere que el beneficio del pretratamiento depende de las características fisicoquímicas del agua tratada. En este contexto, técnicas de extracción más específicas del proceso secundario como el uso de solventes polares (etanol, acetato de etilo) o soluciones salinas, han demostrado mejorar la solubilidad y el aislamiento de las proteínas coagulantes (Adel et al., 2023).

Proceso secundario: métodos de extracción

En esta fase, el polvo de semilla se somete a medios extractores para liberar las proteínas, y carbohidratos responsables de la coagulación. Los métodos más documentados incluyen:

- **Extracción acuosa:** simple y de bajo costo, consiste en suspender el polvo en agua destilada o deionizada, agitar y filtrar. Estudios como los de Rao et al. (2015) y Pandey et al. (2014) reportan eficiencias de remoción de turbiedad del 80–90% con concentraciones del 1–5% de coagulante. Es inocuo y no genera residuos secundarios, aunque la eficiencia puede verse limitada por la presencia de lípidos.
- **Extracción salina:** emplea soluciones de NaCl (0,50–1 M) para incrementar la solubilidad de las proteínas coagulantes mediante el efecto “salting-in”. Según Okuda et al. (2001) y Restrepo et al. (2017), alcanza remociones de hasta 95% con dosis hasta 7,4 veces menores que el método acuoso. Sin embargo, requiere control riguroso para evitar acumulación de sales en el agua tratada y acceso a sal de calidad, lo que limita su aplicabilidad en algunas zonas rurales.
- **Aplicación directa de polvo:** método de bajo costo que no requiere solventes ni equipos especializados. El polvo tamizado se dosifica directamente en el agua y se agita para dispersar las proteínas. Aunque es práctico en contextos de emergencia o infraestructura limitada, su eficiencia puede ser menor y genera turbiedad residual por partículas no disueltas, lo que obliga a considerar filtraciones posteriores (Caldera et al., 2017; Lugo et al., 2020). Se recomienda ajustar dosis entre 150 y 500 mg/L según la turbiedad inicial.
- **Métodos avanzados:** incluyen extracción asistida por ultrasonido, microondas o CO₂ supercrítico, así como solventes como etanol o acetato de etilo. Estos incrementan la pureza del extracto y, en algunos casos, mejoran la eficiencia hasta un 98% (Bergamasco et al., 2008), pero implican mayores costos y equipos especializados (Kumar et al., 2022).

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) y la extracción asistida por microondas (EAM) son técnicas avanzadas que mejoran el rendimiento y la eficiencia en la obtención de coagulantes a partir de semillas de MO. La EAU utiliza cavitación acústica para romper las paredes celulares mediante microchorros de alta energía, mientras que la EAM aplica calentamiento rápido y selectivo para generar presión interna que libera los compuestos activos. Ambas reducen significativamente el tiempo de proceso y el consumo de solventes, aunque la EAM presenta riesgo de degradación térmica si se excede el tiempo de exposición. Estudios han establecido condiciones óptimas para maximizar la extracción y preservar la integridad de las proteínas coagulantes, con parámetros específicos de concentración, temperatura, tiempo y relación sólido–solventes adaptados a cada método.

La Tabla 10 compara las distintas alternativas de extracción, sus ventajas, desventajas y eficacia según diferentes estudios.

Tabla 10. Comparación de métodos de extracción de la MO.

Método	Descripción / proceso	Turbiedad Inicial (UNT)	Rango de dosis (mg/L)	Dosis Óptima (mg/L)	Eficiencia (%)	pH Óptimo	Turbiedad Final (UNT)	Ventajas	Desventajas	Referencia
Extracción con agua	Pulverizar semilla, luego suspender en agua destilada, agitar y filtrar	370	100–500	100	97.6	6.5	8	Accesible, bajo costo, no tóxica	Variabilidad en rendimiento, lípidos pueden reducir eficacia, lodo mayor	Mohammed et al. (2021)
Extracción salina (NaCl 0.5–1 M)	Añadir sal para precipitar proteínas y recolectarlas	450	100–300	250	85–99	7.1	<1–5	Mayor eficiencia con dosis menores	Puede generar subproductos que requieren tratamiento	Okuda et al. (1999); Ghebremichael et al. (2001)
Aplicación directa de polvo(semilla molida)	Molienda y dosificación directa en jar-test	40–500	150–500	275–300	95	6.9	<5	Accesible, no requiere maquinaria especializada	Turbiedad residual	Vega Andrade et al. (2021)
Extracto por precipitación con sales (p. ej. sulfato/amónico)	Añadir sal para precipitar proteínas y recolectarlas	50–300	50–300	No indicado	80–95	6.7	<3	Buena concentración proteica	Posibles subproductos, tratamiento del precipitado	Bhatia et al. (2007)
Extracción con solventes (etanol, acetato de etilo)	Solvente polar/apolar para fraccionar proteínas	30–400	50–200	125	90–98	No indicado	<3	Alta pureza del extracto, eficaz	Costoso, solventes tóxicos, requiere manejo seguro	Bergamasco et al. (2008); Adel et al. (2023)
Extracción enzimática	Enzimas que catalizan la liberación de compuestos con ruptura de enlaces químicos	40–350	50–300	No indicado	80–95	6.9	<2	Alta eficiencia, baja energía, amigable con el ambiente	Proceso complejo, mayor tiempo de extracción	Bhatia et al. (2007)
Microencapsulación	Encapsular proteínas para estabilidad y almacenamiento	50–600	20–100	75	90–98	6.5	<2	Mayor estabilidad	Costoso y complejo, relevancia para la industria	Jana & Pal (2014)
Extracción ultrasónica	Cavitación acústica rompe células generando menor solvente	20–500	50–250	150	98	7.2	<1	Rápido, mayor rendimiento, ahorro solvente	Requiere equipo ultrasónico	Khan et al. (2024)
CO ₂ supercrítico (SFE)	Extracción selectiva de aceite; deja pastel proteico	32–450	20–100	50–75	99	No indicado	<1	Alta selectividad, alta actividad coagulante	Costoso, alta presión y operadores expertos	Kumar & Sharma (2024)

Proceso terciario: Purificación y optimización

La fase terciaria del proceso se centra en la purificación del extracto, con el objetivo de optimizar su rendimiento y remover compuestos indeseados que puedan interferir con el tratamiento del agua. Según Yin (2010), esta etapa puede incorporar operaciones como precipitación, sedimentación, filtración e intercambio iónico. La precipitación se logra ajustando el pH al punto isoeléctrico de las proteínas (pH 10–11), lo que favorece la formación de agregados y su separación. La sedimentación permite eliminar sólidos sedimentables por acción de la gravedad, mientras que la filtración utiliza medios porosos para retener partículas no disueltas. Por último, el intercambio iónico, mediante el uso de resinas selectivas, facilita la remoción de iones metálicos y otros contaminantes residuales, incrementando la pureza y estabilidad del coagulante.

7.1.4 Parámetros clave para el uso eficiente de la MO como coagulante orgánico

La MO se ha consolidado como un coagulante orgánico de interés creciente debido a su eficacia en la remoción de turbiedad, color y sólidos suspendidos, junto con ventajas ambientales frente a coagulantes inorgánicos tradicionales. Sin embargo, su desempeño no es uniforme y depende de una serie de variables operativas y de conservación que influyen directamente en la eficiencia de coagulación, la estabilidad de sus proteínas activas y el comportamiento sedimentológico de los flóculos generados. Identificar y controlar estos factores resulta esencial para optimizar su uso en plantas de tratamiento de agua, garantizar la reproducibilidad de los resultados y minimizar posibles efectos adversos. A partir de la revisión bibliométrica, se reconocen los siguientes parámetros críticos para su implementación:

Procesamiento y conservación del extracto

Los extractos líquidos presentan ventajas en la facilidad de preparación, pero adolecen de una vida útil muy limitada, mientras que las formulaciones en polvo muestran una estabilidad significativamente mayor.

En el caso de extractos líquidos, múltiples estudios han confirmado que su actividad coagulante disminuye rápidamente cuando se almacenan a temperatura ambiente. Por ejemplo, extractos acuosos mantenidos a 28 °C han perdido eficacia en tan solo dos días, mientras que otros ensayos reportan disminuciones significativas a partir del tercer día. Esta rápida degradación se atribuye a la desnaturalización de las proteínas activas y al desarrollo microbiano en un medio rico en nutrientes. La refrigeración (3–4 °C) se presenta como la medida más efectiva para prolongar su estabilidad, permitiendo mantener la actividad coagulante durante 4 a 5 días en extractos de agua destilada y hasta 7 días en extractos salinos. Esto hace que la cadena de frío sea un requisito indispensable cuando se planifica su uso en procesos continuos min (Valencia et al., 2016; Kurniawan et al., 2020).

Por otro lado, la producción de coagulantes en polvo ha surgido como una estrategia para superar las limitaciones de almacenamiento de las soluciones líquidas. El polvo de semilla,

obtenido tras la extracción de aceite, presenta una estabilidad sobresaliente: investigaciones demuestran que, almacenado en bolsas de polietileno, conserva eficiencias de remoción de turbiedad del 92–100 % durante períodos de 3 a 6 meses. Aunque las condiciones de almacenamiento (interior vs. exterior) pueden influir levemente en el rendimiento, su estabilidad a mediano plazo lo convierte en una alternativa más robusta y logísticamente viable para aplicaciones a gran escala (Kurniawan et al., 2020).

Condiciones del agua: pH, temperatura y alcalinidad

El pH del medio es un parámetro determinante en la eficiencia de coagulación con la MO. Sus proteínas coagulantes muestran máxima actividad generalmente entre pH 4 y 7, aunque, según la calidad y el origen del agua, pueden alcanzarse valores óptimos entre pH 6 y 9 (Megat Johari, 2004). Cuando el pH se aproxima al punto isoeléctrico de las proteínas (10–11), la carga superficial disminuye y se reduce la eficacia del tratamiento. La temperatura y la alcalinidad también influyen de forma directa: condiciones de temperatura moderada y alcalinidad estable favorecen la estabilidad de las proteínas, evitando su desnaturalización y contribuyendo a preservar la alcalinidad del agua, lo que representa una ventaja operativa en sistemas donde se busca minimizar riesgos de corrosión en la red de distribución (Jung et al., 2018). Si bien a temperaturas cercanas a 3 °C se mantiene una alta eficiencia en la remoción de turbiedad, a temperatura ambiente (~28 °C) la actividad coagulante puede disminuir drásticamente en un solo día si la solución no se refrigera. En el contexto de una PTAP, la variabilidad estacional de estos parámetros debe considerarse dentro de los protocolos operativos para asegurar un desempeño consistente (Ndabigengesere & Narasiah, 2015).

Tiempo de sedimentación y estructura de flóculos

Los flóculos generados por las proteínas catiónicas de MO presentan, en general, dimensiones fractales (D_f) menores que las de los coagulantes inorgánicos, lo que se traduce en menor densidad y compactación (Oliveira et al., 2022). Esta estructura menos compacta provoca velocidades de sedimentación más bajas y, en consecuencia, la necesidad de tiempos de sedimentación más prolongados para lograr una clarificación equivalente (Valdivieso et al., 2024).

El análisis bibliométrico muestra que los tiempos de sedimentación reportados en la literatura varían considerablemente, desde 5 minutos hasta 228 minutos, e incluso 24 horas en ciertos ensayos de laboratorio. No obstante, tres valores se presentan con mayor frecuencia: 30, 60 y 120 minutos, siendo los 30 minutos el estándar predominante en ensayos de jarras. Esta elección responde a una combinación de factores (Desta & Bote, 2021):

- Compatibilidad experimental, ya que permite comparar los resultados obtenidos con MO frente a coagulantes inorgánicos siguiendo protocolos estandarizados, como los descritos en el Standard Methods.

- Equilibrio entre eficiencia y viabilidad operativa, dado que tiempos más prolongados pueden mejorar la sedimentación de flóculos poco densos, pero también implican un incremento en el volumen y el costo de infraestructura, lo que limita su implementación a gran escala en plantas de tratamiento.

En el caso particular de la MO sus flóculos menos densos requieren tiempos adicionales para alcanzar su máxima compactación; sin embargo, prolongar excesivamente la sedimentación puede generar re-suspensión por microcorrientes internas o degradación estructural de los flóculos. Por ello, los 30 minutos suelen representar una “ventana operativa” que maximiza la remoción de partículas sin que la inestabilidad flocular comience a afectar los resultados, ofreciendo un balance aceptable entre rendimiento, comparabilidad y factibilidad de aplicación (Valdivieso et al., 2024).

Velocidad de sedimentación

La bibliometría de estudios sobre la MO como coagulante orgánico evidencia que la mayoría de los ensayos de laboratorio reporta velocidades de sedimentación (V_s) en el rango de 0,1 a 1,0 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, con valores frecuentes alrededor de 0,16–0,41 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ y casos optimizados que alcanzan aproximadamente 0,90–1,00 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$, dependiendo de la dosis, el método de extracción y la calidad del agua tratada. Estos datos confirman que los flóculos generados por la MO, al ser más porosos y de menor densidad que los formados con coagulantes inorgánicos, presentan una sedimentación más lenta y variable, lo que explica por qué el tiempo estándar de 30 minutos utilizado en la mayoría de los jar-test resulta útil para comparación, pero no necesariamente representa condiciones reales de planta (Ribeiro et al., 2019).

En el presente estudio, se determinó la velocidad de sedimentación (V_s) a partir de ensayos de jarras con un volumen total de 2 L, aplicando la relación, los tiempos de sedimentación de 10 min (600 s) y 30 min (1800 s) correspondieron a velocidades promedio de $\approx 2,55 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ y $\approx 0,85 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, respectivamente. Al compararlos con el rango bibliométrico reportado para la MO (0,10–1,00 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$), se observa que el valor de 30 min se encuentra dentro del intervalo típico, mientras que el de 10 min es significativamente superior, lo que indicaría una sobreestimación de la eficiencia de sedimentación si se extrapolan estos resultados a condiciones reales de planta. Este hallazgo implica que reducir el tiempo de sedimentación a 10 min podría conducir a un diseño subdimensionado de unidades de sedimentación o a la pérdida de remoción de partículas en operación continua, mientras que el tiempo de 30 min ofrece una estimación más representativa del comportamiento hidráulico y del tamaño–densidad de los flóculos formados (Ribeiro et al., 2019).

Caracterización y manejo de lodos

Durante el tratamiento de agua con MO como coagulante orgánico revela que, aunque estos son biodegradables, su manejo sigue siendo un aspecto crítico del proceso. Los valores del Índice Volumétrico de Lodos (SVI) reportados para la MO están entre 24,7 y 63,4 mL/g , lo

que indica una buena capacidad de asentamiento y una floculación estable. Sin embargo, estudios comparativos demuestran que el volumen total de lodo generado no difiere significativamente del producido con coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico o el policloruro de aluminio (PAC) (Valencia et al., 2016).

La diferencia principal radica en la naturaleza del material sedimentado:

- Con sulfato de aluminio, el lodo está compuesto mayoritariamente por hidróxido de aluminio $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, un precipitado inorgánico denso y de alta compactación, con volúmenes de lodo relativamente bajos pero alta masa seca.
- Con cloruro férrico, se forma principalmente hidróxido férrico $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, que genera lodos más pesados y voluminosos que el sulfato de aluminio, pero con una sedimentación rápida y estable.
- Con PAC, el precipitado presenta una estructura más compacta que el de sulfato de aluminio, lo que reduce el volumen de lodo y acelera su consolidación, aunque con la misma naturaleza inorgánica.

En contraste, la MO produce flóculos de origen orgánico, menos densos y más porosos (Alam et al., 2020). Esto explica que, aunque la masa seca de sólidos con MO sea generalmente menor, el volumen final de lodo puede ser comparable o incluso ligeramente mayor debido a la menor compactación y mayor retención de agua en los flóculos orgánicos.

El método de preparación del coagulante influye directamente en la composición y el comportamiento del lodo. Extractos acuosos tienden a producir lodos con mayor contenido de materia orgánica y retención de humedad, mientras que el uso de extractos salinos o semillas desgrasadas puede modificar la densidad, el contenido de sólidos y el tiempo de consolidación (Ndabigengesere & Narasiah, 2015).

En términos operativos, la sustitución de coagulantes inorgánicos como sulfato de aluminio, cloruro férrico o PAC por MO no supone una reducción significativa en la infraestructura requerida para el manejo de lodos, pero sí aporta ventajas ambientales: ausencia de residuos metálicos potencialmente tóxicos, mayor biodegradabilidad y posibilidad de valorización del lodo en compostaje (Ndabigengesere & Narasiah, 2015).

7.1.5 Decisiones derivadas del análisis bibliométrico para la fase experimental

Tras analizar las distintas formas de preparación, extracción del coagulante de MO, en el presente estudio se seleccionaron tres métodos de preparación/extracción: extracción acuosa (en agua destilada), extracción salina (con NaCl a 1 M) y aplicación directa del polvo de semilla. Esta elección respondió a la necesidad de equilibrar la eficiencia de clarificación con la viabilidad operativa y la aplicabilidad en contextos comunitarios, priorizando alternativas que combinaran buen rendimiento, facilidad de implementación y adaptabilidad a diferentes escenarios de tratamiento de agua.

La extracción de solución salina fue seleccionada debido a su eficiencia en la remoción de turbiedad, reportada en hasta un 95 %, con dosis de coagulante considerablemente menores en comparación con el método de agua destilada (Okuda et al., 1999). Este rendimiento se atribuye al efecto “salting-in”, que mejora la solubilización de las proteínas coagulantes activas, aumentando su disponibilidad y capacidad de neutralizar partículas coloidales (Santos et al., 2016).

La extracción de solución acuosa en agua destilada, aunque menos eficiente que la salina, fue incluida por su simplicidad, bajo costo y estabilidad en parámetros como pH y conductividad, lo que la hace segura y replicable en comunidades rurales sin necesidad de reactivos adicionales (dos Reis et al., 2022).

Finalmente, la aplicación directa del polvo de semilla molida se consideró como método de mínima infraestructura, útil en contextos de emergencia o en áreas con recursos extremadamente limitados. Si bien su eficiencia puede ser más variable, estudios han reportado remociones de turbiedad cercanas al 93 % en condiciones controladas (Madrona et al., 2010), lo que lo posiciona como una opción práctica para intervención inmediata.

Posterior a la selección de los métodos de extracción en solución salina, agua destilada y aplicación directa del polvo de semilla se procedió a examinar los rangos de dosis óptimos reportados para la MO en función de su forma de aplicación, con el fin de establecer la concentración operativa más adecuada para el estudio (Ali et al., 2004; Sharma y Chaudhary, 2015). La literatura indica que, en solución salina, las dosis efectivas se encuentran entre las concentraciones de 1–3% a 150–300 mg/L alcanzando eficiencias de remoción de turbiedad de hasta el 97 %, mientras que en agua destilada se emplean concentraciones de 1–5 % con eficiencias del 80–95 %. Por su parte, la aplicación directa del polvo presenta un rango más amplio, entre 150–500 mg/L, con variabilidad asociada a las características fisicoquímicas del agua.

Reportes previos señalan valores óptimos dependientes de la calidad del agua: desde 50–100 mg/L en aguas turbias con pocos sólidos disueltos hasta más de 2000 mg/L en aguas residuales con alta carga orgánica (Abiyu et al., 2021). Considerando esta variabilidad, y con el objetivo de evaluar la respuesta en un rango amplio de condiciones, en el presente estudio se estableció un intervalo de trabajo de 25 a 300 mg/L.

Este rango se basa mediante la revisión realizada en la cual constituye el rango de dosis más efectivo para la clarificación de agua con coagulante derivado de MO, independientemente del método de preparación: aplicación directa del polvo, extracción en solución de agua destilada o extracción en solución salina. Este rango se fundamenta en la capacidad de las proteínas catiónicas presentes en la semilla para neutralizar la carga negativa de las partículas coloidales, favoreciendo la floculación y sedimentación.

En extracciones salinas, la mayor disponibilidad de proteínas activas debido al efecto salting-in permite operar eficazmente en la franja baja (25–150 mg/L), alcanzando reducciones de turbiedad >90 % con dosis cercanas a 80–125 mg/L en aguas de turbiedad media (Madrona et al., 2010). En cambio, las extracciones en agua destilada y el uso de polvo requieren dosis intermedias-altas dentro del mismo intervalo (150–300 mg/L) para lograr eficiencias comparables, debido a su menor capacidad de solubilizar las proteínas activas. Este rango, además, es suficientemente amplio para evaluar variaciones de eficiencia en función de la calidad inicial del agua (p. ej., turbiedad, contenido de materia orgánica disuelta) y para optimizar recursos en contextos comunitarios y de laboratorio (Santos et al., 2016).

La elección de no ampliar el rango más allá de 300 mg/L responde a consideraciones científicas y operativas, puesto que diversos estudios han documentado que dosis superiores generan fenómenos de restabilización coloidal por inversión de carga superficial, reduciendo la eficiencia de remoción de turbiedad y, en algunos casos, aumentándola, aportando sólidos al medio.

Asimismo, la sobredosificación incrementa la materia orgánica disuelta y la demanda química de oxígeno, lo que puede favorecer el recrecimiento bacteriano y la formación de subproductos de desinfección potencialmente nocivos tras la cloración. En el caso de extractos salinos, las dosis altas elevan la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos, mientras que en cualquier método incrementan el volumen y la carga orgánica de los lodos generados, dificultando su manejo. Adicionalmente, existen reportes de citotoxicidad asociada a concentraciones elevadas de extractos crudos, lo que refuerza la necesidad de evitar sobredosis. Por lo tanto, el intervalo de 25–300 mg/L ofrece una ventana experimental óptima que maximiza la eficiencia y la seguridad del tratamiento, minimizando al mismo tiempo los riesgos técnicos, ambientales y sanitarios (Mejia et al., 2020).

En paralelo al análisis bibliométrico, se llevó a cabo una fase de evaluación preliminar que permitió contrastar la información teórica con la práctica experimental. En esta fase se identificaron limitaciones importantes en el diseño inicial, particularmente relacionadas con el tiempo de sedimentación y el manejo del extracto coagulante.

Por un lado, se evidenció que un tiempo de 10 minutos no era suficiente para obtener turbiedades finales representativas, lo que conducía a sobreestimar la eficiencia del proceso; en consecuencia, se extendió a 30 minutos, logrando valores más coherentes con los rangos reportados en la literatura. De igual manera, se detectó que el procesamiento y la conservación del extracto no habían sido aplicados con precisión en la evaluación preliminar, lo que pudo afectar la estabilidad y efectividad del coagulante; por ello, se realizaron ajustes en la preparación y almacenamiento para garantizar resultados reproducibles. Con base en estas observaciones y en los insumos obtenidos del análisis bibliométrico, se diseñó la evaluación final, descrita en la metodología, integrando tanto la evidencia experimental como el respaldo teórico para obtener condiciones más realistas y representativas del sistema.

7.2. Ensayos experimentales a escala de laboratorio

7.2.1 Fase 1: Evaluación preliminar

Los resultados de la evaluación preliminar se muestran en las Figuras 18, 19 y 20. En ellas se muestra la variación de la turbiedad del efluente clarificado en función de las dosis aplicadas de coagulante orgánico de semillas de MO (Anexo 2 Tabla A y B), diferenciadas según su forma de aplicación (solución de MO en agua destilada, solución salina de MO y aplicación directa del polvo de semillas de MO), las concentraciones evaluadas (2 %, 3 % y 5 %) y la calidad de agua evaluada (26 UNT, 140 UNT y 300 UNT). Adicionalmente, la línea punteada (horizontal) indica el límite máximo recomendado (5 UNT) para el efluente clarificado (AWWA, 2019)

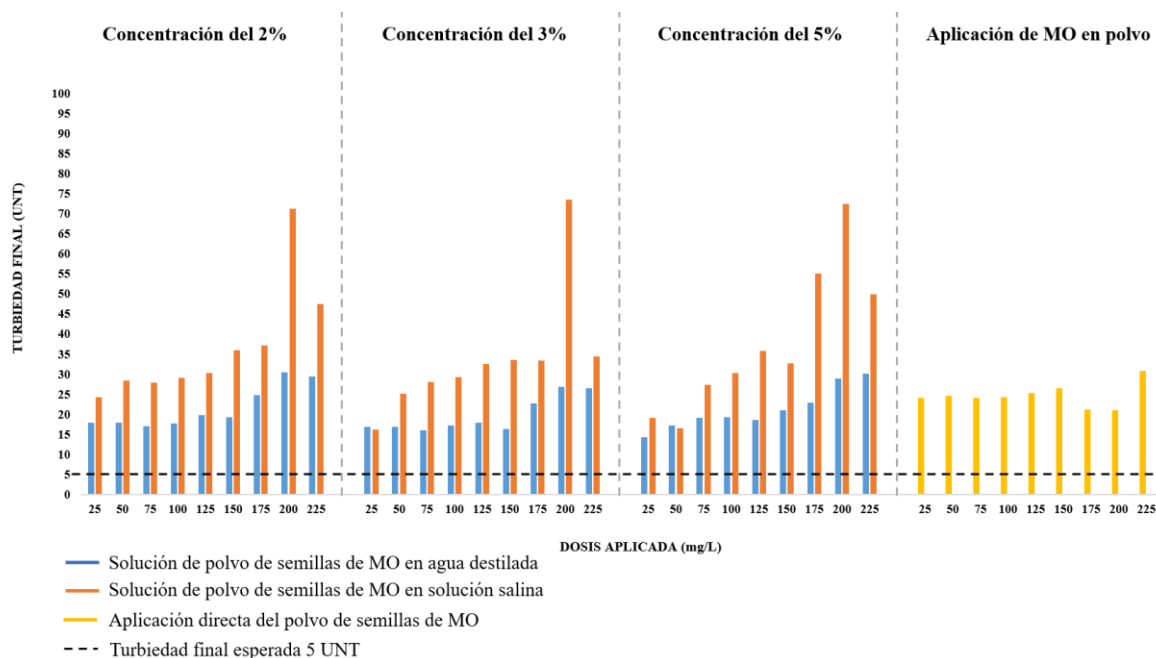


Figura 18. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 26 UNT.

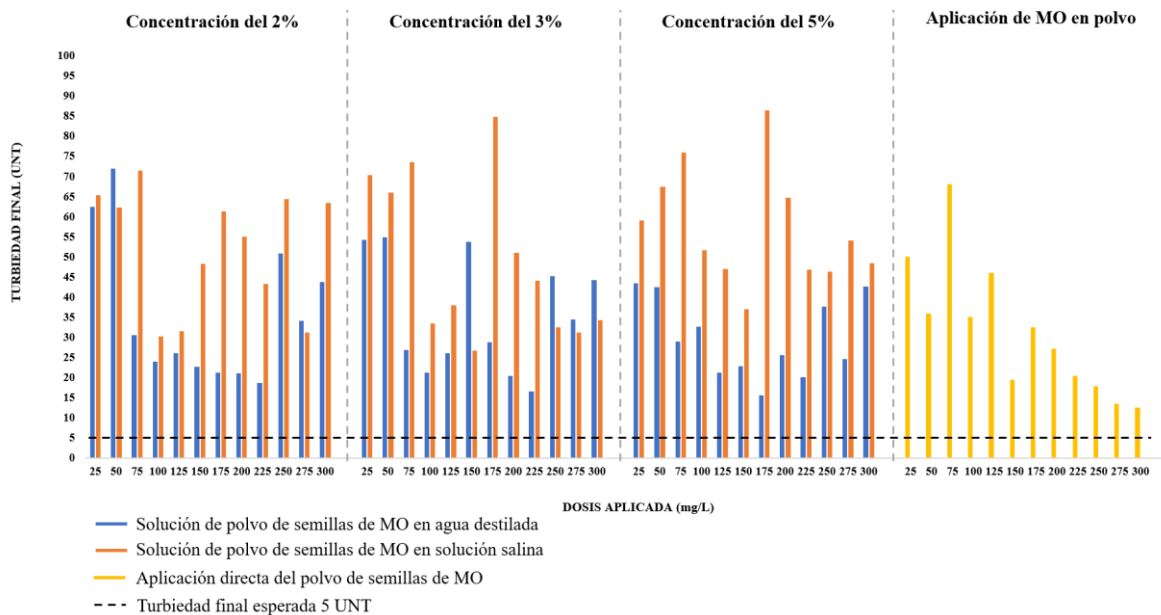


Figura 19. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 140 UNT.

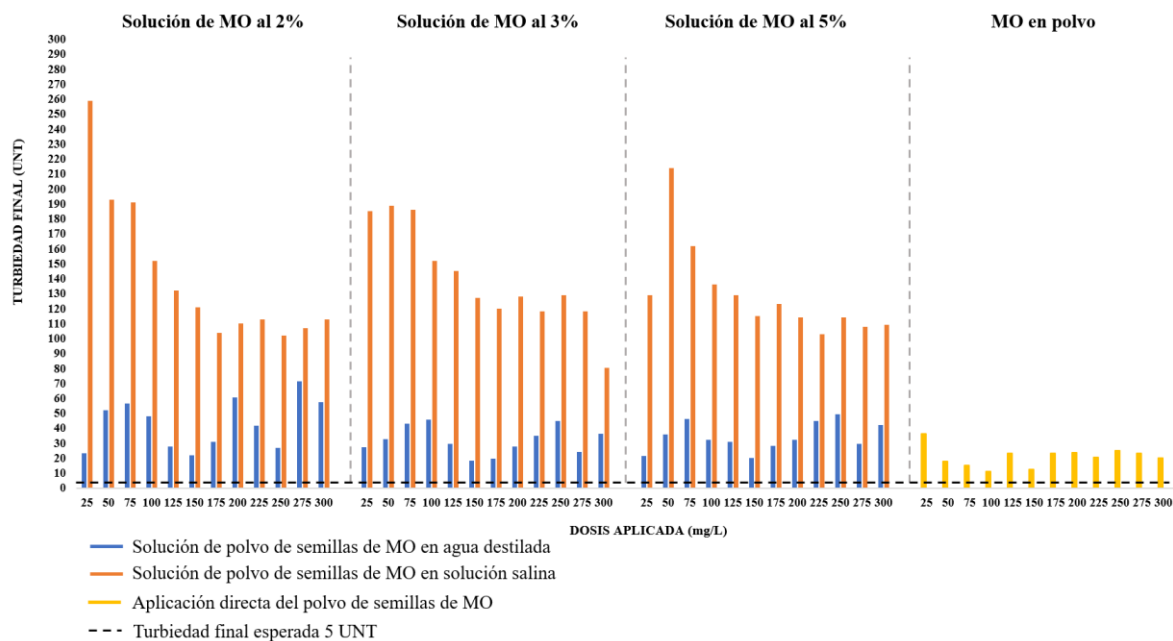


Figura 20. Turbiedad remanente vs dosis de coagulante orgánico de MO para agua cruda con turbiedad de 300 UNT.

De las figuras anteriores se observa que en ninguno de los casos se alcanzó el valor de turbiedad recomendado por la AWWA (2019) (1 a 5 UNT), lo que evidenció limitaciones en el desempeño del coagulante bajo las condiciones de trabajo iniciales. Un efluente clarificado deficiente no solo compromete la eficiencia de las etapas posteriores de filtración, sino que

además incrementa el riesgo sanitario. En este aspecto, es especialmente crítico la presencia de *Cryptosporidium*, un patógeno resistente al cloro que puede permanecer viable tras la desinfección y cuya supervivencia se ve favorecida cuando las partículas en suspensión lo protegen. En consecuencia, la insuficiencia del coagulante natural para lograr una calificación adecuada puede constituir un factor de preocupación para la seguridad del agua potable (Freitas et al., 2016).

Para el agua de baja turbiedad (26 UNT), se observó que el coagulante orgánico de MO en cualquiera de sus formas de aplicación no fue efectivo, ya que en la mayoría de las dosis evaluadas la turbiedad final resultó superior a la inicial, situación atribuible al aporte de sólidos propios de la MO.

En condiciones de turbiedad media (140 UNT) el coagulante redujo los niveles de turbiedad en leve magnitud, especialmente al ser aplicado en solución con agua destilada en dosis elevadas (entre 100 y 225 mg/L) donde alcanzó eficiencias de remoción superiores al 80%, destacando la dosis de 175 mg/L en la concentración del 5% que logró una turbiedad final de 15.6 UNT. Con la aplicación directa del polvo de semillas de MO, se evidenció mayor remoción de turbiedad con las dosis más elevadas, logrando una turbiedad final de 12.5 UNT correspondientes a una eficiencia del 91% con la dosis de 300mg/L. Sin embargo, los valores de turbiedad final siguen siendo elevados en comparación del valor esperado para el efluente clarificado (5 UNT). Por su parte, al aplicar el coagulante en forma de solución salina se presentó un comportamiento más desfavorable en comparación a las otras formas de aplicación mencionadas, pues la turbiedad final lograda es superior a 20 UNT con cada concentración aplicada.

Para aguas de alta turbiedad (300 UNT) se observaron mejores resultados, particularmente con la aplicación directa del polvo de semillas de MO, alcanzando hasta un 96% de remoción con una dosis de 100 mg/L; sin embargo, la turbiedad final (11.15 UNT) continuó fuera del rango aceptable.

Entre las formas de aplicación evaluadas, la aplicación directa del polvo de semillas de MO mostró la mayor eficiencia, seguido por la solución de MO en agua destilada, mientras que la solución salina de MO fue la menos favorable en todas las calidades de agua. El mejor desempeño de la aplicación directa del polvo de semillas de MO puede explicarse porque, al no pasar por procesos de dilución y filtración, conserva las proteínas catiónicas (MOCP). Además, su forma sólida facilita el contacto con las partículas en suspensión y promueve la formación de flóculos más densos y sedimentables mediante el mecanismo de barrido (Ndabigengesere y Narasiah, 1995). Aun así, independientemente de la dosis y la modalidad de aplicación, el coagulante de MO no logró alcanzar los niveles de turbiedad requeridos (< 5 UNT).

Por otro lado, con la aplicación de la solución de MO en agua destilada se identificaron dos rangos de dosis con mayor eficiencia (100–150 mg/L y 225–275 mg/L), lo que muestra que la respuesta del coagulante no es lineal, sino que presenta intervalos de afinidad específicos. El uso de agua destilada como solvente pudo haber favorecido el desempeño al reducir interferencias iónicas, lo que potencia la acción de las proteínas coagulantes de MO, muy solubles en este medio (Uysal & Ar, 2007; Benalia et al., 2024). No obstante, las diluciones también dispersan estas proteínas en un volumen mayor, reduciendo su concentración efectiva y, por ende, la capacidad coagulante (Gómez, 2010; Flores, 2019).

De manera general, se comprobó que el coagulante a base de MO muestra un mejor desempeño en aguas con alta turbiedad, lo cual concuerda con lo reportado por diversos autores (Núñez, 2007; Asrafuzzaman et al., 2011; Acevedo, 2019), quienes señalan que los compuestos activos de las semillas presentan una mayor afinidad y eficacia en condiciones donde predominan niveles elevados de turbiedad.

Cabe mencionar que el bajo desempeño general del coagulante de MO también podría estar influenciado por factores asociados al material y a la preparación del coagulante, como la variabilidad de la composición de las semillas de MO y el proceso de desengrasado utilizado por el proveedor, que no garantizó una calidad uniforme (Ndabigengesere et al., 1995). A ello se suman los posibles efectos del filtrado con papel Whatman de 16 μm , que pudo retener partículas activas (Salamanca J. et al., 2018), y del almacenamiento a temperatura ambiente, donde la oxidación, degradación proteica y proliferación microbiana habrían reducido aún más la eficacia (Zerpa et al., 2025). También se identificó que el tiempo de sedimentación aplicado (10 minutos) pudo haber sido insuficiente, ya que la literatura recomienda entre 15 y 60 minutos para coagulantes naturales, cuyos flóculos suelen ser más ligeros y menos densos (Okuda et al., 2001).

Estas limitaciones metodológicas resaltaron la necesidad de realizar pruebas complementarias, ajustando variables como el tiempo de sedimentación, el método de preparación de la solución (sin filtración) y la modalidad de aplicación, priorizando el uso en polvo y en agua destilada, además de ampliar las dosis a evaluar.

Dado que el desempeño del coagulante de MO varió según la modalidad de aplicación y el rango de dosis, fue necesario complementar el análisis descriptivo con una evaluación estadística que permitiera establecer si estas diferencias eran significativas. Para ello, en las Tablas 11 y 12 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la remoción de turbiedad, considerando las concentraciones evaluadas de 2%, 3% y 5% en las soluciones de coagulante de MO preparadas tanto en agua destilada como en solución salina.

Tabla 11. ANOVA y coeficiente de correlación para el coagulante en solución de MO en agua destilada.

COMPARACIÓN	F	PROBABILIDAD	F CRÍTICO	CONCLUSIÓN
Destilada (entre concentraciones)	1.17	0.32	2.26	No hay diferencias significativas
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN				
COMPARACIÓN	COEFICIENTE R	INTERPRETACIÓN		
Eficiencia de remoción (entre concentraciones)	0.88 – 0.93	Correlación alta → Todas las concentraciones de coagulante tienen eficiencias similares.		
Turbiedad remanente (entre concentraciones)	0.92 - 0.96	Correlación muy alta → 2%, 3% y 5% son similares en términos de turbiedad final.		
Eficiencia vs. Turbiedad remanente	-0.09 a 0.04	Correlación baja y variable → No hay una relación clara entre eficiencia y turbiedad final.		

Tabla 12. ANOVA y coeficiente de correlación para el coagulante de MO en solución salina.

COMPARACIÓN	F	PROBABILIDAD	F CRÍTICO	CONCLUSIÓN
Salina (entre concentraciones)	0,151	0,9794	2,261	No hay diferencias significativas
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN				
COMPARACIÓN	COEFICIENTE R	INTERPRETACIÓN		
Eficiencia de remoción (entre concentraciones)	0.95 - 0.98	Correlación muy alta → Todas las concentraciones de coagulante tienen eficiencias similares.		
Turbiedad remanente (entre concentraciones)	0.60 - 0.87	Correlación moderada-alta → 2%, 3% y 5% son similares en términos de turbiedad final.		
Eficiencia vs. Turbiedad remanente	-0.04 a -0.28	Correlación baja y negativa → No hay una relación clara entre eficiencia y turbiedad final.		

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que no existen diferencias estadísticas significativas entre las concentraciones de la solución salina de MO ni en la solución de MO en agua destilada con respecto a la remoción de turbiedad. En ambos casos, los valores de F (0.15 y 1.17) fueron inferiores al valor crítico (2.2611) y los valores de p (0.9794 y 0.32) superaron el umbral de significancia (0.05). La matriz de correlación confirmó esta tendencia, evidenciando relaciones positivas entre las concentraciones y la eficiencia de remoción de turbiedad (coeficientes > 0.95 en solución salina y > 0.93 en agua destilada), lo que refleja un comportamiento similar entre las tres concentraciones.

En el caso del coagulante de solución salina de MO, la correlación con la turbiedad final fue negativa pero débil (-0,04 y -0,28), lo que indica que, aunque un mayor porcentaje de coagulante tiende a disminuir la turbiedad, este efecto es limitado y solo fue evidente en las pruebas con turbiedad inicial de 300 UNT. En contraste, en agua destilada, las correlaciones fueron altas (> 0.92), lo que confirma que la turbiedad final fue prácticamente la misma en todas las concentraciones.

En síntesis, el ANOVA y los análisis de correlación permiten concluir que las concentraciones de 2%, 3% y 5% presentan un desempeño estadísticamente equivalente, por lo que resulta conveniente utilizar dosis bajas (2%) que ofrecen igual eficiencia y reducen el consumo de coagulante. Adicionalmente, se reducen las limitaciones asociadas a la baja solubilidad del polvo de MO, cuya disolución es heterogénea y puede afectar la homogeneidad del proceso. En cuanto a las variables de pH y alcalinidad, en la tabla 13 se presentan los valores medidos después de la aplicación del coagulante orgánico de MO en sus diferentes formas (agua destilada, solución salina y polvo).

Tabla 13. Valores de pH y Alcalinidad luego de aplicar coagulante de semillas de MO.

Turbiedad	Dosis (mg/L)	MO en Agua destilada						MO en Solución salina						MO en Polvo	
		2%		3%		5%		2%		3%		5%			
		pH	Alc	pH	Alc	pH	Alc	pH	Alc	pH	Alc	pH	Alc	pH	Alc
26 UNT	25	6,82	23,00	6,82	24,80	6,93	26,40	7,10	29,00	6,98	28,40	7,01	28,40	6,88	27,20
	50	6,89	27,60	6,93	25,20	6,87	25,60	7,02	27,20	7,04	25,60	7,05	26,40	6,98	27,60
	75	6,82	27,20	6,83	26,00	6,82	25,20	7,02	29,20	6,85	28,00	6,83	29,20	7,02	28,00
	100	6,70	24,40	6,79	24,80	7,05	25,20	7,00	26,80	6,93	25,60	7,17	26,40	7,12	28,00
	125	6,77	26,00	6,82	25,60	7,05	26,40	7,03	26,40	6,88	26,80	7,16	27,20	6,98	27,60
	150	6,79	28,00	6,77	26,80	6,85	29,20	6,77	26,40	6,93	28,80	7,05	30,40	7,00	28,00
	175	6,78	26,40	6,83	26,40	6,74	28,80	6,84	28,00	6,88	27,20	6,83	29,20	7,00	28,00
	200	7,14	25,60	7,09	26,00	7,06	29,20	7,09	27,20	7,19	28,00	7,16	30,00	6,99	27,60
	225	6,98	24,40	7,06	27,20	7,17	30,00	7,02	25,60	7,12	28,80	7,18	30,40	7,08	28,00
140 UNT	25	6,75	27,60	7,15	27,60	7,25	27,60	6,98	28,40	7,18	27,20	6,59	28,00	6,92	26,80
	50	6,82	27,20	6,98	26,80	6,69	28,40	6,99	28,00	7,20	27,60	6,95	29,00	6,96	27,60
	75	6,78	26,40	6,81	27,60	6,69	26,80	6,98	27,20	6,99	28,00	7,13	28,40	7,10	28,00
	100	6,99	26,40	6,78	28,40	7,12	28,80	7,23	26,80	7,02	28,80	7,20	29,20	7,18	28,00
	125	6,88	26,00	7,20	26,80	7,18	28,40	7,08	26,40	7,19	26,40	7,22	28,80	7,19	28,80
	150	6,95	25,20	7,18	26,40	7,23	27,20	7,13	26,00	7,17	26,80	7,28	28,00	7,00	28,40
	175	6,86	27,20	7,18	25,60	7,02	28,80	6,96	28,80	7,23	27,20	7,18	30,00	6,99	27,20
	200	6,97	28,48	7,01	28,00	7,03	27,60	7,02	29,60	7,12	28,80	7,14	28,40	7,21	29,20
	225	6,83	26,80	7,00	28,00	7,30	28,80	6,92	28,00	7,20	28,40	7,32	29,20	7,12	28,80
	250	6,87	27,48	6,88	27,60	6,92	28,80	6,95	28,40	6,90	28,00	7,02	29,20	6,90	27,20
	275	6,95	27,68	6,85	27,90	6,98	28,92	6,97	28,00	6,94	28,40	7,00	29,20	7,13	28,00
	300	6,93	27,88	6,90	29,20	6,80	29,20	7,00	28,80	6,95	29,60	7,08	29,40	7,18	28,00
300 UNT	25	6,78	28,00	7,12	27,20	7,20	28,00	6,89	28,80	7,19	28,80	6,48	29,20	7,02	28,00
	50	7,30	27,20	7,33	26,80	7,43	29,20	7,42	28,00	7,38	28,80	7,38	29,60	7,14	28,40
	75	7,42	28,80	7,44	29,60	7,42	29,20	7,51	29,20	7,46	30,00	7,51	29,60	7,15	28,80
	100	6,94	26,40	7,17	28,40	7,16	28,40	7,04	28,80	7,20	29,20	7,30	29,60	7,11	28,40
	125	7,11	26,80	7,24	28,00	7,22	28,80	7,18	27,60	7,17	28,40	7,26	29,60	7,04	28,00
	150	6,92	27,20	7,03	27,60	7,02	28,00	6,99	27,60	7,13	28,40	7,00	28,80	7,07	28,00
	175	6,94	28,00	7,03	29,20	7,05	28,00	6,99	28,80	7,10	29,60	7,12	28,40	7,03	28,40
	200	6,89	26,80	7,01	28,00	7,02	28,00	6,98	27,60	6,99	28,80	7,13	28,40	7,06	28,40
	225	7,22	28,80	7,20	28,00	7,23	28,00	7,24	28,80	7,29	28,40	7,35	29,20	7,04	28,00
	250	6,88	27,20	7,02	28,00	7,06	28,00	6,94	28,00	7,11	28,40	7,16	29,20	7,02	28,40
	275	6,98	28,00	7,04	28,00	7,13	28,80	7,08	28,40	7,11	28,80	7,24	29,20	7,04	28,80
	300	6,87	27,60	6,95	28,00	6,98	27,60	6,92	28,00	7,05	28,40	7,07	28,80	7,08	28,40
Unidades de parámetros: PH: (Unidades) , Alcalinidad: (mg/L CaCO ₃) - pH inicial = 6,96 unidades Alcalinidad inicial = 27,6															

En términos generales, el pH mostró variaciones mínimas en todos los ensayos (1,30 % - 6,60 % respecto al valor inicial), sin una tendencia definida ni diferencias atribuibles a la forma de aplicación del coagulante (solución en agua destilada, solución salina o aplicación directa del polvo). De manera similar, la alcalinidad presentó cambios leves sin un patrón claro entre los tratamientos. Este comportamiento indica que la MO no altera la capacidad buffer del agua, lo que preserva su equilibrio químico y disminuye la necesidad de ajustes posteriores en el tratamiento (Valverde et al., 2018). Estos hallazgos refuerzan lo señalado en la literatura sobre las ventajas del coagulante natural de MO al no generar impactos negativos en parámetros de calidad del agua (Yin, 2010; Saleem & Bachmann, 2019; Fuentes et al., 2016; Meza et al., 2018; López et al., 2018).

Para complementar este análisis, se aplicó un ANOVA para determinar si las variaciones observadas en pH y alcalinidad son estadísticamente significativas. Los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen de varianzas para los resultados de pH y alcalinidad según las formas de aplicación del coagulante de MO.

Grupos		Promedio		Varianza	
Coagulante	Concentración	pH (Unidades)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	pH (Unidades)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
MO en agua destilada	2 %	6.92	27.11	0.025	1.45
	3 %	7.01	27.25	0.029	1.50
	5 %	7.05	28.04	0.035	1.44
MO en solución salina	2 %	7.03	27.87	0.021	1.02
	3 %	7.09	28.13	0.021	1.10
	5 %	7.10	28.90	0.043	0.88
MO en Polvo		7.05	28.06	0.007	0.28

El ANOVA evidenció diferencias estadísticas en pH y alcalinidad entre tratamientos, aunque de baja magnitud y sin implicaciones operativas, ya que el pH se mantuvo entre 6.90 y 7.10 y la alcalinidad entre 27 y 29 mg/L de CaCO₃, dentro de los rangos aceptables para potabilización.

La aplicación directa del polvo de semillas de MO mostró la mayor estabilidad en el pH (7,05 ±0,007), seguido por la solución en agua destilada (7,01± 0.029), mientras que el coagulante de MO en solución salina presentó fluctuaciones ligeramente mayores ((7,03–7,10), atribuibles a la presencia de iones Na⁺ y Cl⁻ provenientes del cloruro de sodio, que modifican el equilibrio ácido–base del agua (Katayon et al., 2006). En general, los valores de pH se mantuvieron adecuados para la desinfección con cloro, donde predomina el ácido hipocloroso en pH 6.5–7.5 (Bonilla et al., 2018). En este estudio, la aplicación del coagulante de MO en polvo permitió mayor estabilidad del pH, manteniéndose dentro del rango

recomendado por la AWWA (2019) (7.5 y 9 unidades), lo que refuerza su ventaja al combinar la eficiencia en la remoción de turbiedad con la preservación de los parámetros fisicoquímicos del agua.

Respecto a la alcalinidad, las diferencias estadísticas también fueron leves, el polvo mostró el comportamiento más estable (28.06 mg/L CaCO_3 , varianza 0.28), mientras que las soluciones presentaron mayores fluctuaciones, aunque siempre dentro del rango recomendado para agua potable (20–50 mg/L CaCO_3) (AWWA, 2001).

Cabe mencionar que, en el caso de la MO, la eficiencia coagulante depende principalmente de la neutralización de cargas y el puenteo interarticular, más que de la alcalinidad (Ndabigengesere y Narasiah, 1995). En síntesis, aunque se detectaron diferencias estadísticas en pH y alcalinidad entre los tratamientos, estas fueron leves y no representaron limitaciones operativas, ya que ambos parámetros se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para potabilización.

7.2.2 Fase 2: Evaluación final

Con base en los resultados experimentales y estadísticos obtenidos en la fase previa, se seleccionaron dos modalidades de aplicación para la etapa final: la solución de MO al 2 % en agua destilada y la aplicación directa en polvo. En esta fase también se realizaron ajustes metodológicos como: *i)* la solución de MO se preparó y se aplicó fresca; *ii)* se decidió no filtrar la solución de MO, con el fin de evitar la pérdida de compuestos activos y *iii)* seguimiento del tiempo de sedimentación a 10 y 30 minutos. Las Figuras 21, 22 y 23 muestran el desempeño del coagulante orgánico de MO en estas condiciones para las tres calidades de agua evaluadas (Anexo 3 Tabla C) (26 UNT, 140 UNT y 300 UNT).

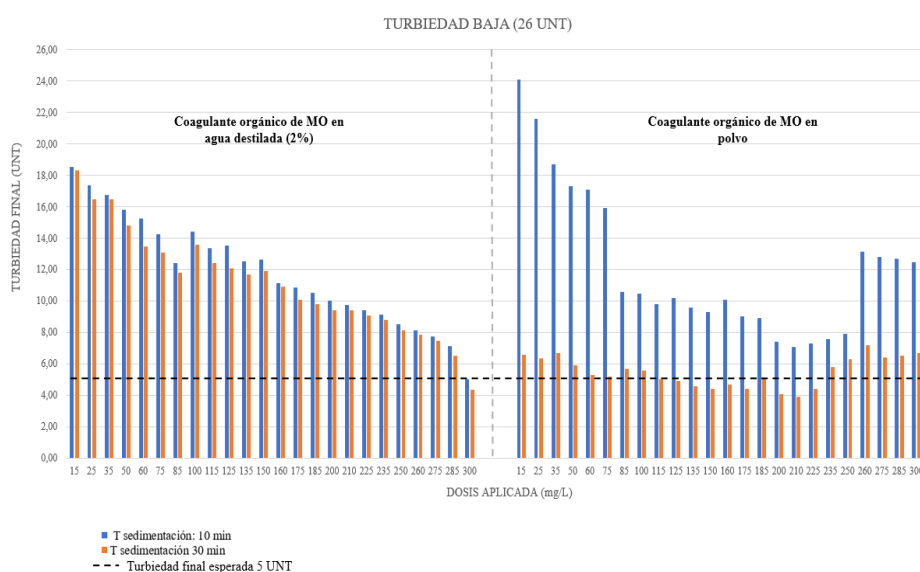


Figura 21. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 26 UNT.

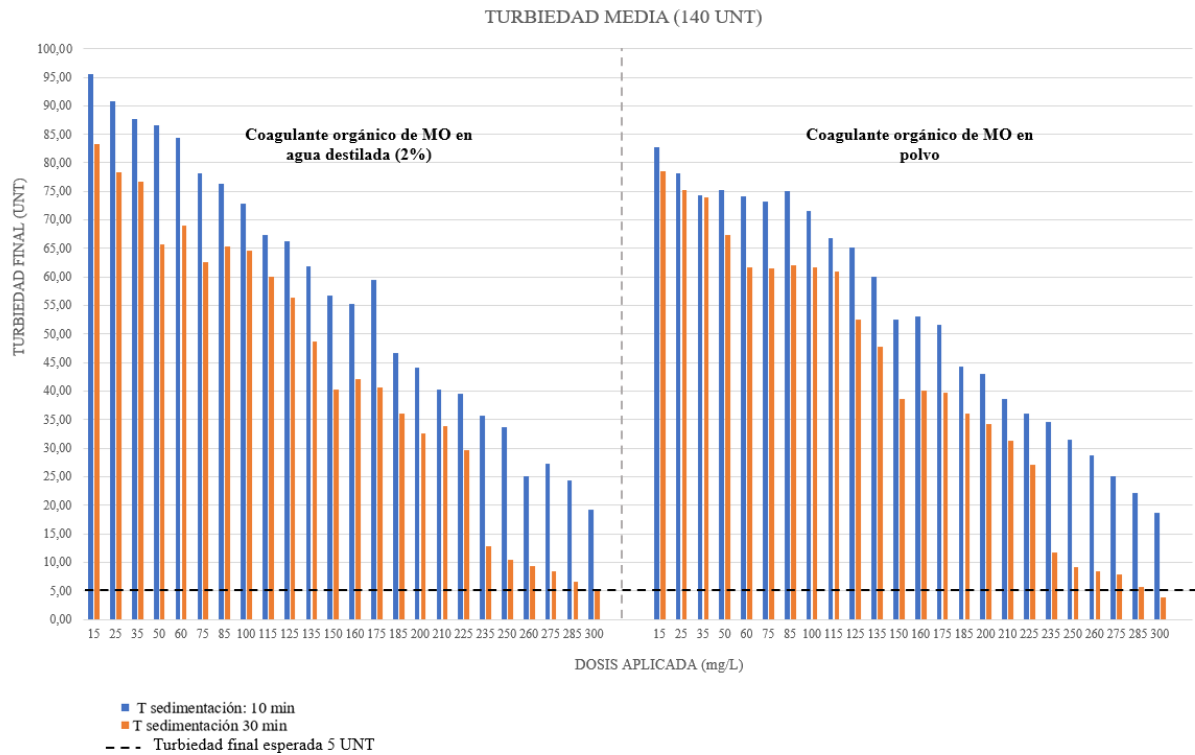


Figura 22. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 140 UNT.

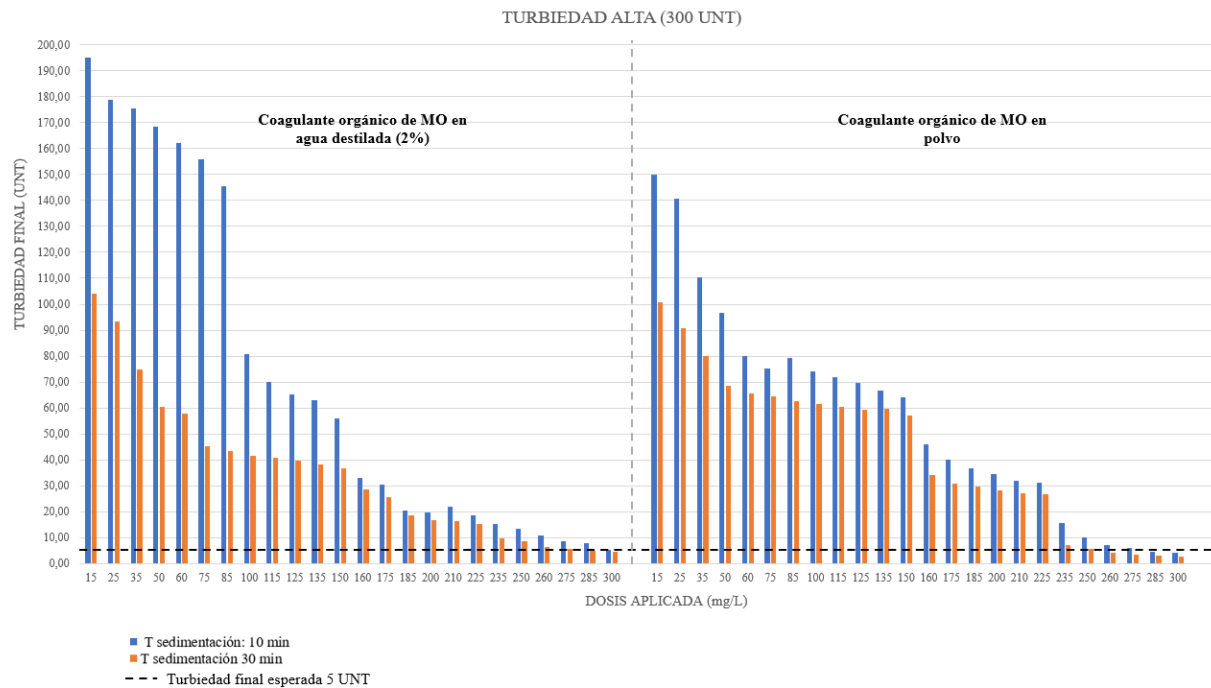


Figura 23. Turbiedad remanente con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO en agua con turbiedad inicial de 300 UNT.

En condiciones de baja turbiedad inicial (26 UNT), el desempeño de la MO como coagulante orgánico mostró resultados limitados con la aplicación de solución de MO al 2% en agua destilada, ya que no se evidenciaron diferencias relevantes entre los tiempos de sedimentación de 10 y 30 minutos. El valor máximo de remoción alcanzado bajo esta modalidad fue de 83% con una dosis de 300 mg/L, alcanzado solo 4.34 UNT. En contraste, la aplicación directa en polvo presentó un mejor comportamiento, con aumentos notorios en la turbiedad final removida al pasar de 10 a 30 minutos de sedimentación, donde la eficiencia se incrementó de 58,46 % a 80,38 %.

Particularmente, en el rango de dosis comprendido entre 115 a 225 mg/L se evidenció un desempeño más consistente, cumpliendo con el nivel de turbiedad final recomendado por la AWWA (2001). En este intervalo, las dosis de 200 y 210 mg/L fueron más efectivas, remociones superiores al 84,6 % y turbiedades finales cercanas a 4 UNT. No obstante, al superar este rango, es decir con dosis mayores a 225 mg/L, la eficiencia disminuyó debido al incremento de la turbiedad final, efecto atribuido al aporte de sólidos propios del coagulante, fenómeno previamente reportado por Ndabigengesere y Narasiah (1995) y Pritchard et al. (2009).

Estos resultados coinciden con las tendencias reportadas en el análisis bibliométrico y en la evaluación preliminar de este estudio, donde también se observó un mayor aporte de sólidos capaz de elevar la turbiedad por encima del valor inicial. En estas condiciones, se confirma que tanto el tiempo de sedimentación como la optimización de la dosis son variables críticas para alcanzar niveles de clarificación aceptables en aguas de baja turbiedad.

En condiciones de turbiedad media (140 UNT), ambas formas de aplicación evidenciaron una reducción progresiva de la turbiedad proporcional al incremento de la dosis aplicada. Sin embargo, diferencias entre los tiempos de sedimentación (10 y 30 min) solo se hicieron evidentes a partir de la dosis de 235 mg/L, donde la sedimentación prolongada generó una remoción significativamente mayor, con eficiencias superiores al 91% y turbiedades finales por debajo de 12 UNT. Se destacan particularmente las dosis de 285 y 300 mg/L, con las cuales se alcanzaron valores de 6.65 y 5.10 UNT al aplicar el coagulante de MO en solución al 2%, y de 5.63 y 3.83 UNT al aplicarlo en polvo, con eficiencias superiores al 96%.

El análisis estadístico demostró que, en turbiedad media, la aplicación directa de polvo de semillas de MO presentó un desempeño significativamente superior ($p < 0,05$) en comparación con la solución de MO al 2% en agua destilada. Esta mayor eficacia podría atribuirse a la concentración efectiva de proteínas coagulantes, que el polvo permanecen disponibles en mayor proporción, mientras que en la solución se diluyen, reduciendo su interacción con las partículas suspendidas (Gómez, 2010; Flores, 2019).

En condiciones de turbiedad alta (300 UNT), ambos métodos de aplicación mostraron una relación directamente proporcional entre la dosis aplicada y la eficiencia de remoción de turbiedad. Para la solución de MO al 2% en agua destilada se observó inicialmente una

diferencia marcada entre los tiempos de sedimentación, alcanzándose menores turbiedades finales con 30 minutos. Sin embargo, a partir de la dosis de 150 mg/L, los resultados de ambos tiempos fueron similares. A partir de 275 mg/L se lograron turbiedades finales por debajo de 5.60 UNT, correspondientes a eficiencias superiores al 96%, siendo la máxima del 98,47% (4.60 UNT) con la dosis de 300 mg/L.

En el caso de la aplicación directa del polvo de semillas de MO, los resultados a 10 y 30 minutos de sedimentación fueron similares, aunque nuevamente el tiempo prolongado favoreció ligeramente menores turbiedades finales. Se destacan las dosis a partir de 250 mg/L, donde se alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 96% (9.62 UNT). El mejor resultado se obtuvo con la dosis de 250 mg/L y 30 minutos de sedimentación, alcanzando 2.90 UNT, equivalente a una eficiencia de 99,03%, la más alta entre todas las condiciones evaluadas.

Este comportamiento evidenció que la extensión del tiempo de sedimentación favoreció la remoción de un mayor número de partículas causantes de turbiedad. Este resultado coincide con lo reportado por Núñez (2007), Acevedo (2019) y Benalia et al. (2024), quienes destacan la alta afinidad de las proteínas coagulantes de la MO con las partículas coloidales en aguas de elevada turbiedad, lo que promueve la agregación y sedimentación de flóculos consistentes, conduciendo a mayores reducciones de turbiedad (Amagloh & Benang, 2009).

A continuación, se presenta la Figura 24 las condiciones iniciales de agua cruda y finales del agua después del proceso de sedimentación a los 10 minutos y 30 minutos. Esta representación visual permite evidenciar de manera comparativa la eficiencia del tratamiento aplicado en la reducción de turbiedad (Anexo 1).

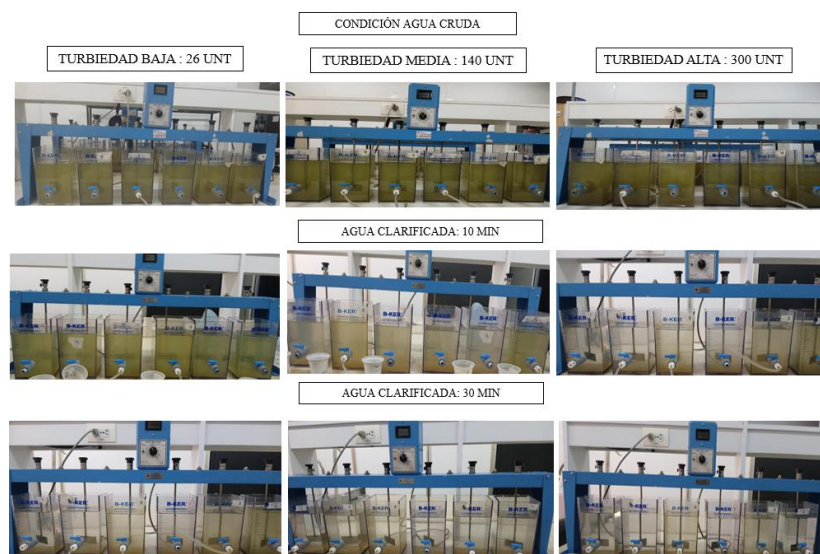


Figura 24. Comparación de la reducción de turbiedad del agua cruda con diferentes formas de aplicación del coagulante de semillas de MO.

Se realizó un análisis estadístico ANOVA para comparar las dos formas de aplicación del coagulante orgánico (solución de MO al 2 % en agua destilada y aplicación directa de polvo de semillas de MO), considerando los tres niveles de turbiedad inicial (26, 140 y 300 UNT), dos tiempos de sedimentación (10 y 30 min) y dos parámetros de respuesta (eficiencia de remoción y turbiedad final del agua clarificada). La Tabla 15 presenta los resultados (F, p, F crítico, R e interpretación), permitiendo identificar diferencias significativas y la consistencia de las relaciones entre aplicaciones.

Tabla 15. Resumen de ANOVA y coeficiente de correlación según la forma de aplicación (Agua destilada, Solución salina, Aplicación de polvo) del coagulante de MO.

COMPARACIÓN	PARÁMETRO	TIEMPO DE MEDICIÓN	F	PROBABILIDAD	F CRÍTICO	CONCLUSIÓN	
Turbiedad Baja (26 UNT)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN	10 min	5,09	0,028	4,05	Diferencia significativa: agua destilada tuvo mayor eficiencia (p=0,028; F>Fcrítico)	
		30 min	75,65	2,83E-11	4,05	Diferencia significativa: Aplicación en polvo tuvo mayor eficiencia (p<0,001; F>>Fcrítico)	
	TURBIEDAD FINAL (UNT)	10 min	75,66	2,83E-11	4,052	Diferencia altamente significativa: agua destilada logró menor turbiedad final (p<0,001; F>>Fcrítico)	
		30 min	75,66	2,83E-11	4,052	Diferencia altamente significativa: agua destilada logró menor turbiedad final (p<0,001; F>>Fcrítico)	
Turbiedad Media (140 UNT)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN	10 min	0,42	0,52	4,052	No significativa: diferencias mínimas, pero polvo presentó valores ligeramente superiores (p=0,52; F<Fcrítico)	
		30 min	0,06	0,81	4,052	No significativa: desempeño similar, leve ventaja para polvo (p=0,81)	
	TURBIEDAD FINAL (UNT)	10 min	0,42	0,52	4,052	No significativa: ligera menor turbiedad con polvo (p=0,52)	
		30 min	0,06	0,81	4,052	No significativa: ligera menor turbiedad con polvo (p=0,81)	
	Turbiedad Alta (300 UNT)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN	10 min	0,93	0,34	4,052	No significativa: valores muy similares, leve ventaja polvo (p=0,34)
			30 min	0,97	0,33	4,052	No significativa: valores muy similares, leve ventaja polvo (p=0,34)
TURBIEDAD FINAL (UNT)		10 min	0,93	0,34	4,052	No significativa: valores muy similares, leve menor turbiedad con polvo (p=0,34)	
		30 min	0,97	0,33	4,052	No significativa: valores muy similares, leve menor turbiedad con polvo (p=0,33)	
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN							
COMPARACIÓN	COEFICIENTE R			INTERPRETACIÓN			
Eficiencia de remoción (entre tipo de extracción)	0.34 - 0.91			Correlación de moderada a muy fuerte. En turbiedad baja, la alta correlación (R≈0,91) indica consistencia en que agua destilada supera a polvo; en turbiedades media y alta, correlación moderada-baja (R≈0,34) indica resultados más variables.			
Turbiedad Final (entre tipo de extracción)	0.86 - 0.9			Correlación muy fuerte: patrones consistentes en los que, para baja turbiedad, agua destilada logra menores valores finales, mientras que en turbiedad media y alta, el polvo tiende a ser levemente mejor aunque sin significancia estadística.			

En el agua de turbiedad baja (26 UNT), se encontraron diferencias significativas en eficiencia de remoción a los 10 min ($p = 0,028$; $F = 5,09 > F_{\text{crítico}}$) y altamente significativas a los 30 minutos ($p < 0,001$; $F = 75,65$), donde la aplicación en polvo tuvo mayor eficiencia ($p < 0,001$; $F \gg F_{\text{crítico}}$) y menor turbiedad final (5.10 UNT). En turbiedad media (140 UNT) no se observaron diferencias estadísticas ($p > 0,50$), aunque el polvo mostró ligera ventaja a 10 minutos ($\approx 73,40 \%$), aumentando su eficiencia a 30 minutos ($\approx 98 \%$). Para turbiedad alta (300 UNT) tampoco hubo diferencias significativas ($p > 0,33$), aunque la aplicación en polvo presentó menores turbiedades finales a 30 minutos (≈ 3.10 UNT) y eficiencias máximas similares en ambas modalidades ($\approx 98 \%$).

El análisis de correlación mostró relaciones de moderadas a muy fuertes en la eficiencia de remoción ($R = 0,34 - 0,91$), con alta consistencia en turbiedad baja ($R > 0,9$) y menor coherencia en turbiedades media y alta ($R \approx 0,34$). Para la turbiedad final, las correlaciones fueron altas ($R = 0,86 - 0,90$), reflejando un patrón estable de clarificación en ambas modalidades. En conjunto, se concluye que la solución al 2 % tiene mejor desempeño en aguas turbiedades más reducidas como la de 140 UNT, mientras que la aplicación de polvo resulta más efectiva en turbiedades más elevadas, como 300 UNT y con sedimentaciones más prolongadas.

En relación con las variables de pH y alcalinidad reportadas en el Anexo 3 Tabla D, la Tabla 16 presenta los valores obtenidos tras la aplicación del coagulante orgánico de MO en sus diferentes formas (agua destilada, solución salina y polvo). A partir de estos resultados se efectuó el análisis estadístico, cuyo resumen se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Resumen de ANOVA para los resultados de pH y alcalinidad post aplicación del coagulante de MO según nivel de turbiedad para las pruebas finales.

pH				
COMPARACIÓN	F	Probabilidad	F Crítico	Conclusión
Entre Grupos	0,39	0,53	3,91	No se detectan diferencias estadísticamente significativas en el pH entre los grupos; el uso de MO, tanto en solución como en polvo, mantiene estable este parámetro independientemente del nivel de turbiedad.
ALCALINIDAD				
COMPARACIÓN	F	Probabilidad	F Crítico	Conclusión
Entre Grupos	1,14	0,29	3,91	No se detectan diferencias estadísticamente significativas en el pH entre los grupos; el uso de MO, tanto en solución como en polvo, mantiene estable este parámetro independientemente del nivel de turbiedad.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las variables pH y alcalinidad mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos formas de aplicación de MO (solución al 2% y polvo), considerando tiempos de sedimentación de 10 y 30 minutos y niveles de turbiedad iniciales de 26, 140 y 300 UNT ($p < 0,05$).

En el caso del pH, el valor de F (0,39) fue muy inferior al F crítico (3,91) y la probabilidad ($p = 0,53$) confirmó la ausencia de efecto significativo. Esto indica que, independientemente de la modalidad de aplicación de MO o del nivel de turbiedad, el pH del agua se mantuvo estable, en concordancia con Ndabigengesere et al. (1995) y Okuda et al. (2001), quienes señalan que la proteína catiónica actúa por neutralización de cargas, sin inducir reacciones ácido-base. En contraste, coagulantes inorgánicos como las sales de aluminio o hierro suelen reducir el pH por hidrólisis, obligando a ajustes posteriores que aumentan costos y complejidad operativa.

Para la alcalinidad, el análisis también confirmó la ausencia de variaciones significativas ($F = 1,14 < F \text{ crítico} = 3,91$; $p = 0,29$). Estos resultados coinciden con lo descrito por Megat Johari et al. (2004), quienes reportaron que la MO no altera la capacidad tampón del agua. A diferencia de ello, coagulantes como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico tienden a disminuir la alcalinidad al consumir bicarbonatos, lo que puede afectar la estabilidad química del agua y favorecer fenómenos de corrosión en redes de distribución.

Posteriormente se evaluó el volumen de lodos generados a diferentes dosis de coagulante y niveles de turbiedad, parámetro clave para estimar la cantidad de flóculos, la eficiencia del proceso y los costos de disposición final. El análisis de las tablas de medición de volumen de lodos descritas en el Anexo 3 Tabla E, mostró que con la aplicación de la solución de MO al 2%, el volumen de lodo aumentó de manera proporcional a la dosis aplicada (15–300 mg/L) y al nivel de turbiedad, mientras que los volúmenes registrados a 30 min fueron en promedio 20-30 % superiores a los de 10 min, debido a la compactación de los flóculos (Benalia et al., 2024).

En condiciones de turbiedad baja (26 UNT), los volúmenes de lodo fueron bajos (0,30–6,70 mL con solución de MO al 2% en agua destilada y 0,5–6,0 mL para la aplicación directa del polvo de semillas de MO), lo que refleja la limitada eficiencia de la MO en aguas poco turbias (Barbosa et al., 2018). En turbiedad media (140 UNT), los volúmenes de lodo oscilaron entre 1,0–5,9 mL (solución) y 1,20–9,10 mL (polvo), con una respuesta progresiva hasta 200–300 mg/L, rango que coincide con lo reportado por Ndabigengesere y Narasiah (1998) para turbiedades de 100–400 UNT, donde se lograron remociones superiores al 90% y lodos de 5–10 mL.

En condiciones de turbiedad alta (300 UNT), las diferencias fueron más notorias, el uso de solución de MO al 2% en agua destilada generó 8,20–23 mL de lodo, mientras que la aplicación directa de polvo de semillas de MO generó entre 20–59 mL, es decir hasta tres veces más. Este comportamiento ha sido documentado por Okuda et al. (2001) y

Ghebremichael (2005), quienes explican que el polvo arrastra fracciones de aceites y materia orgánica no coagulante, aumentando los sólidos sedimentables sin mejorar necesariamente la clarificación.

La comparación con coagulantes inorgánicos es pertinente, dado que estos suelen generar entre 20 y 70 mL de lodo en pruebas de jarras con turbiedades de 100 – 300 UNT (Edzwald, 2011). En contraste, la aplicación de MO evidenció comportamientos diferenciados según la forma de uso: la solución al 2 % en agua destilada produjo menores volúmenes de lodo, mientras que la aplicación directa en polvo, aunque representa una alternativa práctica por su simplicidad, tendió a generar mayores cantidades de residuos.

Sin embargo, el análisis estadístico mediante ANOVA (Tabla 17) confirmó que no existen diferencias significativas entre las modalidades evaluadas ($F < F$ crítico; $p > 0,05$). Esto implica que, desde el punto de vista estadístico, tanto el uso de polvo como de solución generan resultados equivalentes en cuanto a la reducción de turbiedad.

Aun así, deben considerarse factores prácticos en la elección del método. Preparar y dosificar la solución presenta mayor complejidad operativa, además de que su heterogeneidad puede comprometer la dosificación precisa. En contraste, el polvo resulta más sencillo de aplicar y manipular, especialmente en entornos rurales donde los recursos son limitados. Por lo tanto, aunque la solución presenta ventajas en la reducción de lodos, el polvo se posiciona como una alternativa más viable y práctica cuando no se detectan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Tabla 17. ANOVA del volumen de lodo con coagulante de MO según nivel de turbiedad.

Volumen de lodos solución AGUA DESTILADA 2% MO				
COMPARACIÓN	F	Probabilidad	F Crítico	Conclusión
Entre Grupos	0,81	0,37	3,91	No se presentan diferencias estadísticamente significativas en el volumen de lodos entre los grupos evaluados; sin embargo, se observa que el tratamiento con MO al 2% en agua destilada tiende a generar menores volúmenes de lodo en comparación con el polvo de MO.
Volumen de lodos solución POLVO MO				
COMPARACIÓN	F	Probabilidad	F Crítico	Conclusión
Entre Grupos	0,48	0,49	3,91	No se detectan diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, aunque se evidencia que la aplicación directa de polvo de MO incrementa el volumen de lodos respecto a la solución en agua destilada, lo que se atribuye a la adición directa de sólidos presentes en el material sin disolución previa.

Considerando que las mayores eficiencias de reducción de turbiedad fueron obtenidas con dosis elevadas (>100 mg/L), resulta pertinente realizar en futuros estudios un análisis costo/beneficio frente al uso de coagulantes inorgánicos de aplicación común como, el

cloruro férrico (FeCl_3) y el sulfato de aluminio (Al_2SO_4). Estos compuestos, al ser más potentes, requieren dosis mucho menores que los coagulantes orgánicos (Edzwald, 2011) y suelen alcanzar eficiencias superiores, ya sea por su mecanismo de acción o por el nivel de pureza (Meza, 2018). En consecuencia, su capacidad de desestabilizar cargas con bajas dosis (Gámez et al., 2015) constituye una ventaja técnica que debe ser evaluada en términos de viabilidad económica y operativa.

Finalmente, aunque la aplicación de semillas de MO, tanto en solución al 2% como en polvo, permitió en algunos casos alcanzar los niveles recomendados por la AWWA en turbiedad clarificada (≈ 5 UNT) sin alterar el pH ni la alcalinidad, presentando una ventaja frente a los coagulantes inorgánicos, los resultados no fueron consistentes en todas las condiciones evaluadas. Las diferencias entre la evaluación preliminar y final se atribuyen principalmente a ajustes metodológicos, como la eliminación de la filtración de la solución de MO para evitar la pérdida de proteínas activas (Salamanca et al., 2018), el aumento del tiempo de sedimentación a 30 minutos para favorecer la sedimentación de flóculos ligeros (Katayon et al., 2006; Melaku, 2020), la mayor precisión lograda con un rango ampliado de dosis y la refrigeración de las soluciones para prevenir la degradación de compuestos funcionales (Ndabigengesere et al., 1995; Ghebremichael et al., 2005). Estos ajustes mejoraron parcialmente el desempeño de la MO como coagulante orgánico; sin embargo, se requiere continuar evaluando y optimizando criterios técnicos y operativos para que esta alternativa pueda considerarse realmente eficiente y sostenible en el tratamiento de agua superficial. En este sentido, resulta pertinente valorar no solo su uso directo como coagulante principal, sino también su potencial como ayudante de coagulación en combinación con coagulantes convencionales. Esta estrategia podría contribuir a reducir dosis de químicos inorgánicos, minimizar la generación de lodos y aprovechar las ventajas ambientales y sociales asociadas al empleo de un recurso natural y renovable.

Aunque esta investigación mostró limitaciones para considerar a la MO como coagulante principal, la evidencia bibliométrica indica que su mayor potencial está en su uso como ayudante de coagulación. Estudios aplicados han demostrado que, al combinar extractos de semilla de MO con sulfato de aluminio, es posible reducir hasta en un 50 % la dosis de coagulante químico y aun así alcanzar eficiencias de remoción de turbiedad superiores al 95 % (Folkard et al., 1999), lo que disminuye la producción de lodos químicos y reduce costos de tratamiento. Además, se ha evidenciado su efectividad en aguas con alta carga orgánica, ya que las proteínas catiónicas de las semillas actúan como puentes entre partículas coloidales y precipitan compuestos disueltos, logrando turbiedades finales por debajo de 2 NTU en pruebas de jarras (Pritchard et al., 2010). Así, más que un sustituto, la MO representa una alternativa sostenible y versátil que puede complementar y optimizar los procesos convencionales de tratamiento de agua.

8.0 CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico evidenció que la MO se proyecta como una alternativa sostenible frente a los coagulantes inorgánicos, por su eficiencia en la remoción de turbiedad, biodegradabilidad, bajo impacto en pH y alcalinidad, y generación de lodos libres de compuestos químicos nocivos. No obstante, su uso enfrenta limitaciones por la falta de caracterización de la materia prima y la ausencia de lineamientos sobre parámetros a evaluar en las semillas. Así mismo, no existe una estandarización en la preparación del coagulante y aplicación del coagulante (formas, concentraciones y dosis) lo que dificulta la reproducibilidad de los ensayos y la comparabilidad entre estudios.

Con la evaluación preliminar se determinó que el coagulante orgánico presentó limitaciones en las tres condiciones de turbiedad evaluadas (26, 140 y 300 UNT), ya que ninguna forma de aplicación alcanzó de manera consistente el valor de referencia de turbiedad final (≤ 5 UNT). En turbiedades media y alta (140 y 300 UNT) se destacaron la aplicación directa del polvo de semillas y la solución de MO al 2% en agua destilada; sin embargo, los valores de turbiedad residual se mantuvieron por encima del límite recomendado, lo que evidenció la necesidad de introducir ajustes metodológicos para la evaluación final.

En la evaluación final, para las aguas de baja turbiedad (26 UNT), el coagulante de MO no logró alcanzar de forma consistente el valor de referencia en ninguna de las modalidades evaluadas. Aunque en condiciones específicas se obtuvieron turbiedades finales cercanas a 4 UNT con una dosis de 300 mg/L de solución de MO al 2 % en agua destilada, los resultados no mostraron una tendencia estable. Además, a dosis elevadas (≥ 225 mg/L) se evidenció un incremento de la turbiedad, lo que indica una pérdida de eficiencia coagulante. En el caso de la aplicación directa de polvo, las dosis entre 115 y 225 mg/L también alcanzaron turbiedades finales por debajo de 5 UNT; sin embargo, este comportamiento no fue consistente, por lo que se descarta su aplicación en este tipo de aguas bajo las condiciones evaluadas.

En aguas de turbiedad media (140 UNT), el coagulante de MO mostró un mejor desempeño que en aguas de baja turbiedad, aunque sin cumplir de forma consistente el valor de referencia (≤ 5 UNT). Después del tiempo de sedimentación de 30 minutos, la solución al 2% alcanzó valores cercanos al límite (5.10 UNT en dosis de 300 mg/L), mientras que la aplicación directa del polvo logró mejores resultados (hasta 3.83 UNT en dosis de 300 mg/L). Sin embargo, la elevada cantidad de coagulante restringe su aplicabilidad práctica.

En aguas de turbiedad alta (300 UNT), el coagulante orgánico obtuvo las mayores eficiencias de remoción. La solución de MO al 2% en agua destilada alcanzó turbiedades inferiores a 5.60 UNT a partir de 275 mg/L, con un mínimo de 4.60 UNT en la dosis de 300 mg/L (98,47% de remoción). Sin embargo, la aplicación directa en polvo evidenció un mejor desempeño, obteniendo valores más bajos, en especial con dosis de 250 mg/L y 30 minutos de sedimentación, donde se alcanzó 2.90 UNT (99,03% de remoción). Con los resultados de

la evaluación preliminar y final se confirma que el coagulante de MO tiene mayor potencial en aguas de elevada turbiedad, aunque su uso práctico continúa condicionado por la necesidad de altas dosis y la variabilidad entre las formas de aplicación.

Los resultados experimentales de esta investigación refutan parcialmente las altas expectativas identificadas en el análisis bibliométrico respecto al desempeño de la MO en el tratamiento del agua. Aunque los ajustes metodológicos implementados en la evaluación final permitieron mejoras en determinadas dosis y condiciones, persistieron las limitaciones asociadas tanto a la composición y pureza del polvo adquirido con el proveedor, como a la heterogeneidad de las soluciones preparadas. Esto se tradujo en una marcada variabilidad en los resultados y en dudas sobre la consistencia del desempeño de la MO. Así, mientras la literatura reporta su potencial, los hallazgos experimentales de este estudio resaltan la necesidad de establecer protocolos de caracterización de la materia prima y avanzar hacia estudios a escala real que permitan validar su eficiencia bajo en condiciones operativas más cercanas a la práctica.

De esta manera, el coagulante orgánico de MO no demostró los resultados acorde a lo reportado en el análisis bibliométrico, ya que en la fase experimental tanto en la evaluación preliminar como en la final no se registró turbiedad residual acorde a la normatividad colombiana (2 UNT), funcionando solo para ciertas condiciones (dosis elevadas y alta turbiedad), por lo que no debe asumirse como un sustituto directo de los coagulantes inorgánicos, sino como un potencial ayudante para reducir dosis de productos inorgánicos, minimizar la generación de lodos y aportar sostenibilidad, siempre que estandaricen sus procesos y se valide su eficacia a escala real.

9.0 RECOMENDACIONES

A partir de los resultados, se recomienda que futuras investigaciones avancen en la estandarización de metodologías para la caracterización de la materia prima y la preparación de la MO como coagulante. La falta de uniformidad en el análisis de las semillas y en los procedimientos de elaboración generan resultados variables y poco comparables, para reducir esta incertidumbre, sería conveniente definir parámetros mínimos de caracterización de la semilla, como el contenido de proteínas coagulantes (MOCP), aceites (ácido oleico), humedad y tamaño de partícula tras la molienda, los cuales podrían determinarse mediante técnicas como ensayos de Kjeldahl, Soxhlet, gravimetría y tamizado. Esto garantizaría insumos de calidad conocida y que las soluciones coagulantes sean replicables.

La literatura destaca que, al emplear coagulantes orgánicos, es fundamental establecer parámetros de control que permitan evaluar no solo la eficiencia del proceso de coagulación, sino también sus posibles efectos secundarios. En este sentido, se recomienda que futuros estudios incorporen la medición del carbono orgánico total (COT) residual, dado que la aplicación de MO, tanto en forma de polvo como en solución, puede aumentar su concentración. Este incremento se asocia a un mayor riesgo sanitario por la demanda de cloro y la potencial formación de trihalometanos. Por tanto, el monitoreo de este parámetro resulta esencial para prevenir la generación de subproductos indeseables durante la desinfección y garantizar una evaluación integral de la calidad del agua tratada.

En la fase experimental no basta con reportar porcentajes de remoción de turbiedad; es necesario contrastar los valores finales con el límite normativo colombiano (2 UNT) o recomendado para agua clarificada (≤ 5 UNT), ya que una reducción elevada no garantiza el cumplimiento cuando las turbiedades iniciales son altas.

Aunque no existe un límite normativo para la turbiedad del agua clarificada, este parámetro es fundamental para evaluar la eficiencia del tratamiento. Se recomienda estudiar la MO como ayudante de coagulación y compararla no solo con coagulantes inorgánicos, sino también con otros orgánicos, para determinar su viabilidad técnica y ambiental en procesos de potabilización.

Así mismo, se recomienda caracterizar el lodo generado, pues al provenir de coagulación orgánica resulta menos contaminante, biodegradable y rico en nutrientes, lo que permitiría evaluarlo como fertilizante o mejorador de suelos y aportaría valor agregado al proceso.

Finalmente, futuros estudios deben incluir comparaciones directas con coagulantes químicos convencionales (sales de aluminio y de hierro), tanto de forma independiente como coadyuvante, a fin de consolidar la validación técnica y ambiental de la MO como alternativa viable en procesos de potabilización y tratamiento de aguas.

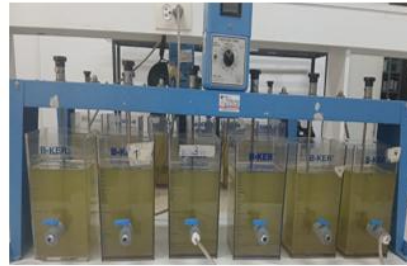
ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico de las pruebas de jarra

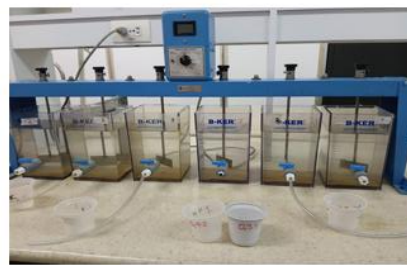
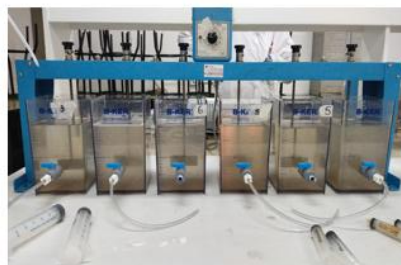
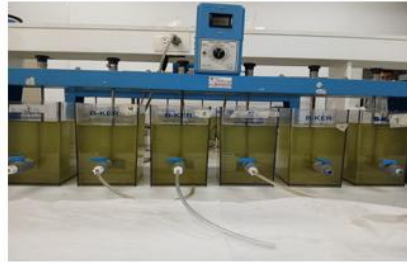
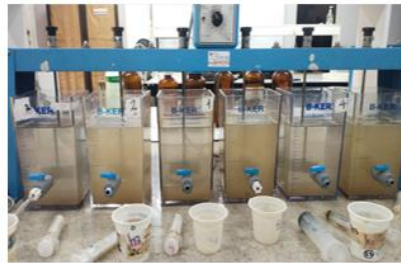
Evaluación preliminar

Evaluación final

TURBIEDAD BAJA : 26 UNT



TURBIEDAD MEDIA : 140 UNT



TURBIEDAD ALTA : 300 UNT



Anexo 2. Evaluación preliminar: resultados obtenidos

Tabla A. Eficiencia de remoción de turbiedad

	DOSIS (mg/L)	% EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD											
		ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 1	ENSAYO 2
		2% (Salina)	2% (Salina)	3% (Salina)	3% (Salina)	5% (Salina)	5% (Salina)	2% (Destilada)	2% (Destilada)	3% (Destilada)	3% (Destilada)	5% (Destilada)	5% (Destilada)
TURBIEDAD BAJA (26 NTU)	25	6,15	6,32	37,69	37,53	26,54	26,68	31,15	30,96	35,00	34,87	45,00	45,21
	50	-9,23	-9,20	3,08	3,05	36,15	36,03	30,77	30,71	35,00	35,00	33,85	33,92
	75	-7,69	-7,54	-8,08	-8,23	-5,77	-6,20	34,23	34,05	38,08	37,96	26,15	26,35
	100	-11,92	-11,29	-12,69	-13,33	-16,54	-16,70	31,92	31,27	33,46	32,86	25,77	26,45
	125	-16,92	-16,95	-25,00	-24,97	-37,69	-37,77	23,46	23,46	31,15	31,22	28,08	28,10
	150	-38,46	-38,50	-29,23	-29,19	-25,77	-24,98	25,77	25,78	36,92	37,00	19,23	19,24
	175	-43,08	-43,20	-28,85	-28,72	-112,31	-112,43	4,23	4,33	12,31	12,47	11,92	11,85
	200	-174,62	-174,36	-182,69	-182,95	-179,23	-179,61	-17,31	-17,59	-3,46	-3,68	-11,54	-11,24
	225	-83,08	-83,40	-32,69	-32,37	-92,31	-92,81	-13,46	-13,16	-2,31	-1,95	-16,15	-16,43
	250												
	275												
	300												
TURBIEDAD MEDIA (140 NTU)	25	53,36	53,27	49,71	49,63	57,86	59,06	55,36	55,43	61,29	61,26	69,00	69,21
	50	55,50	55,42	52,86	52,78	51,86	53,28	48,57	48,64	60,79	60,77	69,64	69,72
	75	49,00	45,26	47,50	43,76	45,71	46,12	78,21	81,43	80,79	79,82	79,29	79,48
	100	78,43	79,82	76,07	77,46	63,14	61,32	82,93	81,73	84,86	85,22	76,71	77,39
	125	77,50	75,29	72,93	70,72	66,43	66,35	81,36	83,26	81,36	80,79	84,86	84,88
	150	65,50	64,97	80,93	80,40	73,57	69,83	83,79	84,24	61,57	61,43	83,71	83,72
	175	56,21	57,63	39,43	40,84	38,21	39,61	84,86	83,64	79,43	79,79	88,86	88,78
	200	60,71	61,48	63,57	64,34	53,79	51,58	84,93	84,27	85,43	85,63	81,79	82,09
	225	69,07	71,02	68,57	70,52	66,57	66,04	86,71	85,04	88,21	88,72	85,64	85,36
	250	54,00	54,15	76,86	77,01	66,86	68,27	63,71	63,59	67,71	67,75	73,07	72,53
	275	77,71	77,69	77,71	77,69	61,43	62,19	75,71	75,74	75,43	75,42	82,50	82,15
	300	54,71	52,90	75,57	73,76	65,43	67,38	68,71	70,27	68,36	67,89	69,57	68,88
TURBIEDAD ALTA (300 NTU)	25	92,20	92,79	90,87	91,46	92,77	92,71	13,67	13,75	38,33	38,92	57,00	57,46
	50	82,60	88,67	89,13	95,20	88,03	87,46	35,67	36,55	37,00	43,04	28,67	33,81
	75	81,10	79,25	85,57	83,72	84,53	84,71	36,33	36,06	38,00	36,16	46,00	44,38
	100	83,93	83,98	84,67	84,71	89,30	89,30	49,33	49,34	49,33	49,38	54,67	54,66
	125	90,70	92,61	90,10	92,01	89,63	89,45	56,00	56,28	51,67	53,57	57,00	58,59
	150	92,67	94,28	93,90	95,51	93,27	93,12	59,67	59,90	57,67	59,27	61,67	63,00
	175	89,70	90,24	93,43	93,97	90,53	90,48	65,33	65,41	60,00	60,54	59,00	59,42
	200	79,80	83,11	90,80	94,11	89,17	88,86	63,33	63,82	57,33	60,63	62,00	64,78
	225	86,10	87,39	88,40	89,69	85,03	84,91	62,33	62,52	60,67	61,95	65,67	66,72
	250	91,07	94,17	84,97	88,07	83,53	83,24	66,00	66,45	57,00	60,09	62,00	64,61
	275	76,20	72,69	91,93	88,42	90,10	90,43	64,33	63,82	60,67	57,18	64,00	60,96
	300	80,90	78,97	87,87	85,94	85,97	86,15	62,33	62,05	73,20	71,28	63,67	61,97

Tabla B. Turbiedad final

	DOSIS (mg/L)	% EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD							TURBIEDAD FINAL (UNT)						
		2% (Destilada)	2% (Salina)	3% (Destilada)	3% (Salina)	5% (Destilada)	5% (Salina)	Polvo	2% (Destilada)	2% (Salina)	3% (Destilada)	3% (Salina)	5% (Destilada)	5% (Salina)	Polvo
TURBIEDAD BAJA (26 NTU)	25	31,15	6,15	35,00	37,69	45,00	26,54	7,31	17,90	24,40	16,90	16,20	14,30	19,10	24,1
	50	30,77	-9,23	35,00	3,08	33,85	36,15	5,38	18,00	28,40	16,90	25,20	17,20	16,60	24,6
	75	34,23	-7,69	38,08	-8,08	26,15	-5,77	7,31	17,10	28,00	16,10	28,10	19,20	27,50	24,1
	100	31,92	-11,92	33,46	-12,69	25,77	-16,54	6,54	17,70	29,10	17,30	29,30	19,30	30,30	24,3
	125	23,46	-16,92	31,15	-25,00	28,08	-37,69	2,31	19,90	30,40	17,90	32,50	18,70	35,80	25,4
	150	25,77	-38,46	36,92	-29,23	19,23	-25,77	-2,31	19,30	36,00	16,40	33,60	21,00	32,70	26,6
	175	4,23	-43,08	12,31	-28,85	11,92	-112,31	18,46	24,90	37,20	22,80	33,50	22,90	55,20	21,2
	200	-17,31	-174,62	-3,46	-182,69	-11,54	-179,23	18,85	30,50	71,40	26,90	73,50	29,00	72,60	21,1
	225	-13,46	-83,08	-2,31	-32,69	-16,15	-92,31	-18,46	29,50	47,60	26,60	34,50	30,20	50,00	30,8
	250							-0,77							26,2
	275							-1,15							26,3
	300							-6,54							27,7
TURBIEDAD MEDIA (140 NTU)	25	55,36	53,36	61,29	49,71	69,00	57,86	64,29	62,50	65,30	54,20	70,40	43,40	59,00	50,00
	50	48,57	55,50	60,79	52,86	69,64	51,86	74,43	72,00	62,30	54,90	66,00	42,50	67,40	35,80
	75	78,21	49,00	80,79	47,50	79,29	45,71	51,36	30,50	71,40	26,90	73,50	29,00	76,00	68,10
	100	82,93	78,43	84,86	76,07	76,71	63,14	75,00	23,90	30,20	21,20	33,50	32,60	51,60	35,00
	125	81,36	77,50	81,36	72,93	84,86	66,43	67,14	26,10	31,50	26,10	37,90	21,20	47,00	46,00
	150	83,79	65,50	61,57	80,93	83,71	73,57	86,07	22,70	48,30	53,80	26,70	22,80	37,00	19,50
	175	84,86	56,21	79,43	39,43	88,86	38,21	76,79	21,20	61,30	28,80	84,80	15,60	86,50	32,50
	200	84,93	60,71	85,43	63,57	81,79	53,79	80,57	21,10	55,00	20,40	51,00	25,50	64,70	27,20
	225	86,71	69,07	88,21	68,57	85,64	66,57	85,43	18,60	43,30	16,50	44,00	20,10	46,80	20,40
	250	63,71	54,00	67,71	76,86	73,07	66,86	87,29	50,80	64,40	45,20	32,40	37,70	46,40	17,80
	275	75,71	77,71	75,43	77,71	82,50	61,43	90,43	34,00	31,20	34,40	31,20	24,50	54,00	13,40
	300	68,71	54,71	68,36	75,57	69,57	65,43	91,07	43,80	63,40	44,30	34,20	42,60	48,40	12,50
TURBIEDAD ALTA (300 NTU)	25	13,67	92,20	38,33	90,87	57,00	92,77	87,87	259,00	23,40	185,00	27,40	129,00	21,70	36,40
	50	35,67	82,60	37,00	89,13	28,67	88,03	94,00	193,00	52,20	189,00	32,60	214,00	35,90	18,00
	75	36,33	81,10	38,00	85,57	46,00	84,53	94,95	191,00	56,70	186,00	43,30	162,00	46,40	15,14
	100	49,33	83,93	49,33	84,67	54,67	89,30	96,28	152,00	48,20	152,00	46,00	136,00	32,10	11,15
	125	56,00	90,70	51,67	90,10	57,00	89,63	92,27	132,00	27,90	145,00	29,70	129,00	31,10	23,20
	150	59,67	92,67	57,67	93,90	61,67	93,27	95,87	121,00	22,00	127,00	18,30	115,00	20,20	12,40
	175	65,33	89,70	60,00	93,43	59,00	90,53	92,20	104,00	30,90	120,00	19,70	123,00	28,40	23,40
	200	63,33	79,80	57,33	90,80	62,00	89,17	92,13	110,00	60,60	128,00	27,60	114,00	32,50	23,60
	225	62,33	86,10	60,67	88,40	65,67	85,03	93,07	113,00	41,70	118,00	34,80	103,00	44,90	20,80
	250	66,00	91,07	57,00	84,97	62,00	83,53	91,60	102,00	26,80	129,00	45,10	114,00	49,40	25,20
	275	64,33	76,20	60,67	91,93	64,00	90,10	92,17	107,00	71,40	118,00	24,20	108,00	29,70	23,50
	300	62,33	80,90	73,20	87,87	63,67	85,97	93,33	113,00	57,30	80,40	36,40	109,00	42,10	20,00

Anexo 3. Evaluación final: resultados obtenidos

Tabla C. Eficiencia de remoción y turbiedad final

	DOSIS (mg/L)	% EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD				TURBIEDAD FINAL (UNT)			
		Eficiencia de remoción (%) 10 min		Eficiencia de remoción (%) 30 min		Turbiedad Final 10 min		Turbiedad Final 30 min	
		2% (Destilada)	Polvo	2% (Destilada)	Polvo	2% (Destilada)	Polvo	2% (Destilada)	Polvo
TURBIEDAD BAJA (26 NTU)	15	15,00	7,31	28,46	74,77	22,10	24,10	18,60	6,56
	25	21,15	16,92	32,88	75,58	20,50	21,60	17,45	6,35
	35	23,85	28,08	35,38	74,23	19,80	18,70	16,80	6,7
	50	30,00	33,46	38,85	77,31	18,20	17,30	15,90	5,9
	60	24,62	34,23	41,15	79,62	19,60	17,10	15,30	5,3
	75	28,85	38,85	45,00	80,00	18,50	15,90	14,30	5,2
	85	37,31	59,23	51,92	78,08	16,3	10,60	12,5	5,7
	100	41,54	59,62	44,23	78,46	15,2	10,50	14,5	5,6
	115	40,00	62,31	48,46	80,77	15,6	9,80	13,4	5
	125	43,08	60,77	47,69	81,04	14,8	10,20	13,6	4,93
	135	39,23	63,08	51,54	82,31	15,8	9,60	12,6	4,6
	150	38,85	64,23	51,15	83,08	15,9	9,30	12,7	4,4
	160	49,23	61,15	56,92	81,92	13,2	10,10	11,2	4,7
	175	51,54	65,38	58,08	83,08	12,6	9,00	10,9	4,4
	185	51,92	65,77	59,23	80,38	12,5	8,90	10,6	5,1
	200	54,62	71,54	61,15	84,23	11,8	7,40	10,1	4,1
	210	55,38	72,69	62,31	85,00	11,6	7,10	9,8	3,9
	225	57,31	74,77	63,46	83,08	11,1	7,30	9,5	4,4
	235	56,92	75,58	64,62	77,69	11,2	7,60	9,2	5,8
	250	56,92	69,62	66,92	75,77	11,2	7,90	8,6	6,3
	260	51,92	49,54	68,46	72,31	12,5	13,12	8,2	7,2
	275	53,85	50,77	70,00	75,38	12	12,80	7,8	6,4
	285	55,38	51,15	72,31	75,00	11,6	12,70	7,2	6,5
	300	58,46	51,92	80,38	74,23	10,8	12,50	5,1	6,7
TURBIEDAD MEDIA (140 NTU)	15	31,71	40,93	40,57	43,86	95,60	82,70	83,2	78,6
	25	35,14	44,21	44,00	46,29	90,80	78,10	78,4	75,2
	35	37,43	46,93	45,21	47,14	87,60	74,30	76,70	74,00
	50	38,21	46,29	53,00	51,93	86,50	75,20	65,80	67,30
	60	39,79	47,07	50,64	55,93	84,30	74,10	69,10	61,70
	75	44,14	47,71	55,29	56,07	78,20	73,20	62,60	61,50
	85	45,43	46,36	53,36	55,64	76,4	75,1	65,3	62,1
	100	47,93	48,86	53,79	55,93	72,9	71,6	64,7	61,7
	115	51,93	52,29	57,07	56,50	67,3	66,8	60,1	60,9
	125	52,71	53,50	59,71	62,50	66,2	65,1	56,4	52,5
	135	55,79	57,07	65,29	65,86	61,9	60,1	48,6	47,8
	150	59,50	62,43	71,29	72,36	56,7	52,6	40,2	38,7
	160	60,50	62,07	69,93	71,36	55,3	53,1	42,1	40,1
	175	57,50	63,14	71,00	71,57	59,5	51,6	40,6	39,8
	185	66,64	68,36	74,21	74,21	46,7	44,3	36,1	36,1
	200	68,43	69,29	76,71	75,50	44,2	43	32,6	34,3
	210	71,29	72,36	75,79	77,64	40,2	38,7	33,9	31,3
	225	71,71	74,21	78,79	80,64	39,6	36,1	29,7	27,1
	235	74,50	75,29	90,79	91,57	35,7	34,6	12,9	11,8
	250	76,00	77,57	92,50	93,49	33,6	31,4	10,5	9,12
	260	82,07	79,50	93,36	94,00	25,1	28,7	9,3	8,4
	275	80,50	82,07	94,00	94,36	27,3	25,1	8,4	7,9
	285	82,57	84,21	95,25	95,98	24,4	22,1	6,65	5,63
	300	86,21	86,64	96,28	97,26	19,3	18,7	5,21	3,83
TURBIEDAD ALTA (300 NTU)	15	35,00	49,97	65,33	28,00	195,00	150,10	104,00	100,8
	25	40,47	53,10	68,83	35,14	178,60	140,70	93,50	90,8
	35	41,57	63,27	75,04	42,71	175,30	110,20	74,89	80,2
	50	43,87	67,80	79,80	51,07	168,40	96,60	60,60	68,5
	60	45,90	73,30	80,73	53,07	162,30	80,10	57,80	65,7
	75	48,03	74,87	84,87	54,00	155,90	75,40	45,40	64,4
	85	51,53	73,57	85,53	55,21	145,40	79,30	43,40	62,7
	100	73,10	75,27	86,17	56,07	80,70	74,20	41,50	61,5
	115	76,63	76,07	86,40	56,86	70,10	71,80	40,80	60,4
	125	78,23	76,77	86,73	57,71	65,30	69,70	39,80	59,2
	135	78,97	77,77	87,20	57,29	63,10	66,70	38,40	59,8
	150	81,37	78,57	87,77	59,21	55,90	64,30	36,70	57,1
	160	88,97	84,63	90,43	75,57	33,10	46,10	28,70	34,2
	175	89,87	86,60	91,47	78,00	30,40	40,20	25,60	30,8
	185	93,13	87,73	93,83	78,79	20,60	36,80	18,50	29,7
	200	93,47	88,43	94,43	79,79	19,60	34,70	16,70	28,3
	210	92,63	89,30	94,53	80,57	22,10	32,10	16,40	27,2
	225	93,77	89,60	94,87	80,93	18,70	31,20	15,40	26,7
	235	94,87	94,80	96,72	94,82	15,40	15,60	9,84	7,25
	250	95,53	96,60	97,10	96,00	13,40	10,20	8,70	5,6
	260	96,43	97,60	97,82	97,07	10,70	7,20	6,54	4,1
	275	97,13	97,97	98,13	97,56	8,60	6,10	5,60	3,42
	285	97,40	98,47	98,30	97,77	7,80	4,60	5,10	3,12
	300	98,27	98,57	98,47	97,93	5,20	4,30	4,60	2,9

Tabla D. Efecto del coagulante de MO en pH y alcalinidad

	DOSIS (mg/L)	pH		Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	
		2% (Destilada)	Polvo	2% (Destilada)	Polvo
TURBIEDAD BAJA (26 NTU)	15	7,62	7,45	27,6	28,8
	25	7,76	7,6	24,8	26
	35	7,77	7,56	28,4	29,6
	50	7,79	7,5	26,4	27,6
	60	7,75	7,43	28,4	29,6
	75	7,66	7,46	27,44	28,64
	85	7,67	7,39	26,4	27,6
	100	7,72	7,37	27,2	28,4
	115	7,73	7,52	27,6	28,8
	125	7,65	7,49	28	29,2
	135	7,76	7,72	26,8	28
	150	7,36	7,73	28,4	29,6
	160	7,67	7,65	25,2	26,4
	175	7,7	7,76	26	27,2
	185	7,66	7,67	26,4	27,6
	200	7,64	7,7	26,8	28
	210	7,61	7,66	27,2	28,4
	225	7,72	7,64	28	29,2
	235	7,46	7,79	26,4	27,6
	250	7,39	7,75	26,8	28
TURBIEDAD MEDIA (140 NTU)	260	7,32	7,66	28,4	29,6
	275	7,37	7,67	28,8	30
	285	7,52	7,77	28,8	30
	300	7,49	7,79	29,2	30,4
	15	7,59	7,56	28,08	26,24
	25	7,55	7,65	27,56	26,28
	35	7,45	7,57	28,36	26,44
	50	7,66	7,61	27,8	26,52
	60	7,5	7,62	28	26,6
	75	7,61	7,65	27,64	26,68
	85	7,71	7,48	28,28	26,76
	100	7,6	7,54	27,48	26,84
	115	7,61	7,63	27,96	26,92
	125	7,67	7,6	28,16	27
	135	7,57	7,58	27,72	27,08
	150	7,6	7,68	28,04	27,16
	160	7,5	7,59	27,84	27,24
	175	7,55	7,65	28,32	27,32
	185	7,62	7,48	27,6	27,4
	200	7,58	7,49	28,12	27,48
	210	7,69	7,52	27,92	27,56
TURBIEDAD ALTA (300 NTU)	225	7,56	7,56	28,2	27,64
	235	7,61	7,47	27,68	27,72
	250	7,63	7,58	28,4	27,8
	260	7,66	7,53	27,76	27,88
	275	7,59	7,45	28,24	27,96
	285	7,58	7,59	27,88	28
	300	7,49	7,67	27,52	28,04
	15	7,59	7,56	28,12	28,36
	25	7,49	7,65	27,68	28,12
	35	7,57	7,57	28,32	28,28
	50	7,49	7,61	27,56	28,4
	60	7,47	7,62	28	28,16
	75	7,65	7,65	27,8	28,32
	85	7,69	7,48	28,4	27,92
	100	7,48	7,54	27,48	28,2
	115	7,45	7,63	27,92	28,08
	125	7,46	7,6	28,2	27,96
	135	7,58	7,58	27,6	28,04
	150	7,43	7,68	28,08	28,24
	160	7,46	7,59	27,72	27,88
	175	7,58	7,65	28,28	27,76
	185	7,56	7,48	27,84	27,84
	200	7,49	7,49	28,04	27,8
	210	7,48	7,52	27,52	27,72
	225	7,35	7,56	27,96	27,6
	235	7,47	7,47	28,16	27,68
	250	7,51	7,58	27,64	27,64
	260	7,53	7,53	28,24	27,52
	275	7,45	7,45	27,76	27,56
	285	7,59	7,59	28,36	27,48
	300	7,67	7,67	27,88	28
pH inicial = 7,54 unidades		Alcalinidad inicial = 28			

Tabla E. Volumen de lodos generados por forma de aplicación de MO

REPLICA- MEDICIÓN VOLUMEN DE LODOS					
DOSIS (mg/L)	2% (Destilada)		Polvo		
	VOLUMEN DE LODOS 10 min (ml)	VOLUMEN DE LODOS 30 min (ml)	VOLUMEN DE LODOS 10 min (ml)	VOLUMEN DE LODOS 30 min (ml)	
TURBIEDAD BAJA (26 NTU)	15	0,3	0,5	0,5	0,6
	25	0,4	0,9	0,8	0,9
	35	1	1,1	0,8	1,1
	50	1,2	1,4	1	1,2
	60	1,5	1,8	1,3	1,2
	75	2,1	2,3	1,7	2,1
	85	2,4	2,6	2	2,2
	100	2,6	2,8	2,2	2,4
	115	3,1	3,3	2,7	2,9
	125	3,4	3,6	3	3,2
	135	3,7	3,9	3,3	3,5
	150	4	4,2	3,6	3,8
	160	4,5	4,7	4,1	4,3
	175	4,8	6,3	4,4	5,9
	185	5,1	5,3	4,7	4,9
	200	5,4	5,6	5	5,2
	210	5,7	6	5,3	5,6
	225	6	6,2	5,6	5,8
	235	4,5	6,1	2,6	3,8
	250	6	7,5	2,9	4,1
	260	6,3	7,9	2,8	4,3
	275	6,7	8	2,9	4,2
	285	6,7	8,1	3,1	4,5
	300	6,6	8,1	3,3	4,6
TURBIEDAD MEDIA (140 NTU)	15	1	1,5	1,2	2,1
	25	1,2	1,7	1,7	2,2
	35	1,4	1,9	2,1	2,3
	50	1,6	2	2,2	2,3
	60	1,7	2,2	2,4	2,5
	75	1,9	2,3	2,5	2,5
	85	2	2,5	2,5	2,5
	100	2,2	2,6	3	3,2
	115	2,4	2,8	3,5	3,8
	125	2,6	3	4	4,3
	135	2,8	3,2	4,5	4,7
	150	3	3,4	5	5,3
	160	3,2	3,5	5,5	5,7
	175	3,4	3,7	5,9	6,1
	185	3,6	3,9	5,9	6,1
	200	3,8	4,2	6,2	6,4
	210	4	4,4	6,5	6,8
	225	4,3	4,6	6,8	7,1
	235	4,5	4,8	7	7,3
	250	4,8	5,1	7,3	7,6
	260	5	5,3	7,6	8
	275	5,3	5,5	8	8,3
	285	5,6	5,8	8,3	8,7
	300	5,9	6	8,7	9,1
TURBIEDAD ALTA (300 NTU)	15	8,2	9,6	20	23
	25	8,5	10	21,4	24,6
	35	9,5	11,1	22,8	26,2
	50	9,9	11,4	24,2	27,8
	60	10,2	11,8	25,6	29,4
	75	10,5	12,2	27	31
	85	10,9	12,5	28,3	32,5
	100	11,3	13	29,7	34,1
	115	11,7	13,4	31,1	35,7
	125	12,1	13,9	32,5	37,3
	135	12,5	14,3	33,9	38,9
	150	13	14,8	35,3	40,5
	160	13,5	15,4	36,7	42,1
	175	14	15,9	38,1	43,7
	185	14,6	16,5	39,5	45,3
	200	15,2	17	40,9	46,9
	210	15,8	17,6	42,3	48,5
	225	16,5	18,2	43,7	50,1
	235	17,2	18,9	45	51,6
	250	18	19,6	46,4	53,2
	260	19	21	47,8	54,8
	275	20,1	22,2	49,2	56,4
	285	22	24	50,6	58
	300	23	25	52	59,6

REFERENCIAS

- Abidin, ZZ, Madehi, N., Yunus, R., Derahman, A. (2019). Efecto de las condiciones de almacenamiento sobre el rendimiento de *Jatropha curcas* como biocoagulante para el tratamiento de efluentes de fábricas de aceite de palma. *Revista de ciencia y tecnología ambiental* 12 (2), 92–101. <https://doi.org/10.3923/jest.2019.92.101> .
- Abiyu, A., et al. (2021). Wastewater Treatment using a Natural Coagulant (Moringa oleifera Seeds): Optimization through Response Surface Methodology. *Heliyon*, 7(11), e08451
- Acevedo Picón, E. (2019). Uso de semillas de moringa (moringa oleífera) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de Rio Negro, Rio De Oro y Quebrada Floridablanca, Santander. Bucaramanga: Universidad de Santander, 2019.
- Adel Hussein Abouzied, Radwan, T.E.E., Hassan, H.A.S. (2023). Applying Moringa oleifera Extract in Water Treatment as a Natural Coagulant to Remove Turbidity and Algae(Article). *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, Volume 27, Issue 5, September and October 2023, Pages 1121-1131
- Aguilar-López, C., Hernández-Soriano, M., & Sánchez-Muñoz, E. (2021). Moringa oleifera como coagulante natural para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Revista Iberoamericana de Recursos Hídricos*, 16(3), 239-251.
- Alam, M. W., Pandey, P., Khan, F., Souayeh, B., & Farhan, M. (2020). Estudio para investigar el potencial del extracto combinado de hojas y semillas de Moringa oleifera en la purificación de aguas subterráneas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7468. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207468>
- Alazaiza , M. Y. D., Alzghoul, T. M., Nassani, D. E., & Bashir, M. J. K. (2025). Natural coagulants for sustainable wastewater treatment: Current trends, challenges, and prospects. *Processes*, 13(6), 1754.
- Ali , E. N., Muyibi, S. A., Salleh, H. M., Alam, M. Z., Ramlan, M., Salleh, M. (2010). Production of Natural Coagulant from Moringa Oleifera Seed for Application in Treatment of Low Turbidity Water. *Journal Water Resource and Protection*, 2, 259-266.
- Ali , E. N., Muyibi, S. A., Salleh, H. M., Salleh, M. R. M., & Alam, M. Z. (2009). Moringa oleifera seeds as natural coagulant for water treatment. *Thirteenth International Water Technology Conference*, 163–168.
- Ali , E. N., Muyibi, S. A. & Salleh, H. M. (2004). Moringa Oleifera seeds for use in water treatment. 1st International Conference on managing rivers in the 21 country. *Issues and challenges*, pp. 401-407.
- Al-Jadabi , N., Laaouan, M., El Hajjaji, S., Mabrouki, J., Benbouzid, M., & Dhiba, D. (2023). The Dual Performance of Moringa Oleifera Seeds as Eco-Friendly Natural Coagulant and as an Antimicrobial for Wastewater Treatment: A Review. *Sustainability*, 15(5), 4280. <https://doi.org/10.3390/su15054280>
- Alves, M. F., da Silva, C. M., de Oliveira, M. P., da Silva, M. L., & de Souza, M. A. (2018). Use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant for drinking water treatment. *Water Science and Technology*, 77(11), 4575-4582.
- Amagloh & Benang. (2009). Effectiveness of Moringa oleifera seed as a coagulant for water purification. *Bioresource Technology*, 100(18), 4389–4392. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.056>
- Amoquímicos. (2019). Propiedades del Cloruro Férrico. *Amoquimicos.com*. <https://www.amoquimicos.com/noticias/propiedades-del-cloruro-ferrico>
- Ang, WL, Mohammad, AW. (2020). Estado del arte y sostenibilidad de los recursos naturales. Coagulantes en el tratamiento de aguas y aguas residuales. *Revista de Producción Más Limpia* 262, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>.
- Anwar & Gilani. (2007). Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses. *Phytotherapy Research*, 21(1), 17–25. <https://doi.org/10.1002/ptr.2023>
- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., & Gilani, A. H. (2007). Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses. *Phytotherapy Research*, 21(1), 17-25. Extracted from Moringa oleifera Seed by Salt Solution. *Water Research*: 35(2), 405-410.

- Arboleda J. (1992). Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Arboleda J. (2001). “Teoría de la coagulación del agua”, en Teoría y práctica de la purificación del agua, 3 ed. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, cap 2, pp. 21-84.
- Asrafuzzaman M, Fakhruddin AN, Hossain MA. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. ISRN Microbiol. 2011 Dec 19;2011:632189. doi: 10.5402/2011/632189. PMID: 23724307; PMCID: PMC3658559.
- AWWA (2019). Water Quality and Treatment (20th ed.). Denver, CO: American Water Works Association.
- AWWA -American Water Works Association (2001) -. Self-assessment for treatment plant optimization (International Edition). Denver: AWWA.
- Ayerza, R. (2012). Seed and oil yields of Moringa oleifera variety Periyakalum-1 introduced for oil production in four ecosystems of South America. Industrial Crops and Products, 36(1), 70–73.
- Azañero, R. (2014). Exportaciones de moringa (Moringa oleifera). Obtenido de Sitio web de ramiroazanero.blogspot: <http://ramiroazanero.blogspot.com/2014/11/exportaciones-demoringa-moringa.html>
- Baptista, T. A., Coldebella, P. F., Cardines, P. H. F., Gomes, R. G., Vieira, M. F., Bergamasco, R., & Vieira, M. S. (2015). Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of Moringa oleifera for the treatment of surface water. Chemical Engineering Journal, 276, 166-173. doi:10.1016/j.cej.2015.04.045
- Barbosa, A. D., da Silva, L. F., De Paula, H. M., Romualdo, L. L., Sadoyama, G., & Andrade, L. S. (2018). Uso combinado de técnicas de coagulación (Moringa oleifera) y electroquímicas en el tratamiento de aguas residuales de pinturas industriales para su reutilización o eliminación. Water Research, 145, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.007>
- Benalia, A., Derbal, K., Amrouci, Z., Baatache, O., Khalfaoui, A., & Pizzi, A. (2024). Application of Plant-Based Coagulants and Their Mechanisms in Water Treatment: A Review. JOURNAL OF RENEWABLE MATERIALS, 12(4), 667-698. <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.048306>
- Bergamasco R, Sala E, Konradt L.(2008). Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação / floculação da água bruta por meio da Moringa oleifera Lam. Acta Sci-Tecnol. 30(2):193–198.
- Bernardo & Sabogal Paz, I. (2008). Selección de Tecnologías de Tratamiento de Água. São Carlos: Editora LDIBE LTDA. Vol. I. 878p.
- Bongiovani, M. C., Camacho, F. P., Nishi, L., Coldebella, P. F., Valverde, K. C., Vieira, A. M., Bergamasco, R. (2014). Improvement of the coagulation/flocculation process using a combination of Moringa oleifera lam with anionic polymer in water treatment.
- Bonilla, J. A., Gómez, R., & López, C. (2018). Evaluación de Moringa oleifera en polvo como coagulante natural en tratamiento de aguas residuales. Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental, 20(1), 55-67.
- Bratby, J. (2006). Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. 1st ed. London: IWA Publishing pp. 50-68.
- Broin, M., Santaella, C., Cuine, S., Kokou, K., Peltier, G., & Joët, T. (2002). Flocculent activity of a recombinant protein from Moringa oleifera Lam. seeds. Recuperado el 18 de 07 de 2017, de Applied Microbiology and Biotechnology: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-002-1106-5>
- Büyükkidik, S. (2022). Un análisis bibliométrico: un tutorial para el paquete Bibliometrix en R utilizando literatura IRT. Egit. Psikolojide Ölçme Deger. Derg.13 , 164-193.
- Caldera, Y., Briceño, L., García, J., & Fuentes, L. (2017). Eficiencia de las semillas de Moringa oleífera como coagulante alternativo en la potabilización del agua.
- Caracas y Landázuri . (2019). Evaluación de la eficiencia de la semilla de moringa oleífera (MO) como coadyuvante natural en los procesos de coagulación - floculación del sistema de tratamiento de agua potable de la empresa de acueducto y alcantarillado del Río Palo.
- Cardoso Valverde, K., Konradt Moraes, L. C., Carvalho Bongiovani, M., Pereira Camacho, F., & Bergamasco, R. (2013). Coagulation diagram using the Moringa oleifera Lam and the aluminium

- sulphate, aiming the removal of color and turbidity of water. *Acta Scientiarum. Technology*, 35(3), 485–489. Universidade Estadual de Maringá. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i3.14860>
- Castro, A. (2013). el árbol de moringa una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicas y ambientales de Colombia. Colombia.
- Campos, J., Colina, G., Fernández, N., Torres, G., Sulbarán, B., & Ojeda, G. (2003). Caracterización del agente coagulante activo en las semillas de Moringa oleífera mediante HPLC. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 37(1), 35–43. Universidad del Zulia. <https://www.researchgate.net/publication/284704944>
- Carmona, L. N. (2012). Uso de las Cáscaras de Papa como Coagulante Natural en el Tratamiento de Aguas Potables de la Planta” La Diana”. *Publicaciones E Investigación*, 6, 115-121. <https://doi.org/10.22490/25394088.1115>
- Chumark, P., Khunawat, P., Sanvarinda, Y., Phornchirasilp, S., Morales, N. P., Phivthong-Ngam, L., ... & Pongrapeeporn, K. U. S. (2008). The in vitro and ex vivo antioxidant properties, hypolipidaemic and antiatherosclerotic activities of water extract of Moringa oleifera Lam. leaves. *Journal of ethnopharmacology*, 116(3), 439-446.
- Cogollo Flórez, Juan Miguel. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *dyna*, 78(165), 18-27. retrieved march 18, 2025, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0012-73532011000100002&lng=en&tlng=es.
- Dansi, A., Vodouhè, R., Azokpota, P., Yedomonhan, H., Assogba, P., Adjatin, A., Loko, Y. L., Dossou-Aminon, I., & Akpagana, K. (2012). Diversity of the neglected and underutilized crop species of importance in Benin. *The Scientific World Journal*, 2012, Article ID 932947, 19 pages. <https://doi.org/10.1100/2012/932947>
- Delelegn, A., Sahile, S., & Husen, A. (2018). Water purification using coagulants and flocculants. En A. Husen & M. Iqbal (Eds.), *Moringa oleifera: A versatile tree* (pp. 503-534). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-4.00018-0>
- Desta & Bote. (2021). Wastewater treatment using a natural coagulant (Moringa oleifera seeds): Optimization through response surface methodology. *Heliyon*, 7(11), e08451. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08451>
- Díaz, A., Monsalve, J. R., & Miranda, J. C. (2017). Evaluación de la semilla de Moringa oleífera como coagulante natural en la clarificación de agua superficial. *Revista ION*, 29(1), 121-132.
- Di-Bernardo, L. (1993) *Métodos e técnicas de tratamento de água*. III ed. Rio de Janeiro.
- Di Bernardo y Sabogal. (2008). Selección de tecnologías de tratamiento de agua (Vol. I). Editorial LDIBE LTDA.
- Diver, D., Nhapi, I., & Ruziwa, W. R. (2023). The potential and constraints of replacing conventional chemical coagulants with natural plant extracts in water and wastewater treatment. *Environmental Advances*, 13(100421), 100421. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100421>
- dos Reis, K. C., Vieira, A. M. S., Vieira, M. F., & Bergamasco, R. (2022). Evaluation of Moringa oleifera seed extract for water treatment: Optimization, characterization, and comparison with traditional coagulants. *Water*, 14(3), 451
- Edzwald, J. K., & Haarhoff, J. (2011). *Dissolved air flotation for water clarification*. McGraw-Hill Professional.
- Eggbuikwem, P. N., & Sangodoyin, A. Y. (2013). Coagulation efficacy of Moringa oleifera seed extract compared to alum for removal of turbidity from water. *International Journal of Environmental Science and Development*, 4(1), 28-32.
- Environmental Protection Agency. (2024). Drinking water regulations. U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved January 24, 2025, from <https://www.epa.gov/dwreginfo/drinking-water-regulations>
- Fahey, J. W. (2005). Moringa oleifera: a review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. Part 1. *Trees for life Journal*, 1(5), 1-15.

- Faizi, S., Siddiqui, B. S., Saleem, R., Aftab, K., Shaheen, F. & Gilani, A. H. (1998). Hypotensive constituents from the pods of *Moringa oleífera*. *Planta Med*, 64, 225-228. <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.1055/s-2006-957414>.
- Feria, Bermúdez, S. & Estrada, A. (2014). Eficiencia de la semilla *Moringa oleífera* como coagulante natural para la remoción de la turbiedad del río Sinú. *Producción + limpia*, 9(1), 9-22.
- Ferreira, R., Napoleão, T. H., Santos, A. F., Sá, R. A., Carneiro-da-Cunha, M. G., Morais, M. M. C., & Paiva, P. M. (2011). Coagulant and antibacterial activities of the water-soluble seed lectin from *Moringa oleífera*. *Letters in applied microbiology*, 53(2), 186-192.
- Flaten T. P. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain research bulletin*, 55(2), 187–196. [https://doi.org/10.1016/s0361-9230\(01\)00459-2](https://doi.org/10.1016/s0361-9230(01)00459-2)
- Flores (2019). Uso de semilla de moringa oleífera como coagulante orgánico en el tratamiento de agua para consumo humano. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), 7–15. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1138>
- Folkard & Sutherland.(1996). *Moringa oleífera* un árbol con enormes potencialidades. *Agroforestry* 8(3): 5–8, 8 (3), sitio web: <http://www.fao.org/3/a-x6324s.pdf>.
- Freitas, J. H., de Santana, K. V., do Nascimento, A. C., de Paiva, S. C., de Moura, M. C., Coelho, L. C., et al. (2016). Evaluación del uso de sulfato de aluminio y lectina hidrosoluble de semilla de *Moringa oleífera* para reducir la turbiedad y la toxicidad de aguas contaminadas. *Chemosphere*, 163, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.071>
- Fuentes Molina, Natalia, Molina Rodríguez, Emiro José, & Ariza, Carla Patricia. (2016). Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Producción + Limpia*, 11(2), 41-54. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a4>
- Gámez, L. L. S., Luna-delRisco, M., & Cano, R. E. S. (2015). Comparative study between *M. oleífera* and aluminum sulfate for water treatment: case study Colombia. *Environmental Monitoring And Assessment*, 187(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4793-y>
- García. (2007). «Metodología de extracción In Situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo.» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- García-Fayos, B., Arnal, J.M., Verdu, G. and Sauri, A. (2010) Study of *Moringa oleífera* oil Extraction and Its Influence in Primary Coagulant Activity for Drinking Water Treatment. *International Conference on Food Innovation*.
- George, T. T., Obilana, A. O., Oyenih, A. B., & Rautenbach, F. G. (2021). *Moringa oleífera* through the years: a bibliometric analysis of scientific research (2000-2020). *South African Journal of Botany*, 141, 12-24.
- Ghebremichael KA, Gunaratna KR, Henriksson H, Brumer H, Dalhammar G. (2005). A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleífera* seed. *Water Res* 2005;39:2338–44.
- Ghebremichael, K. A., & Gunaratna, K. R. (2021). *Moringa oleífera* seed extract as a sustainable and low-cost coagulant for water treatment: Recent advances and applications. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124461.
- Gold, M., de Mello, L. G. N., Cusioli, L. F., Quesada, H. B., Nishi, L., & Bergamasco, R. (2023). *Moringa oleífera* seed addition prior to sludge thickening for supernatant quality improvement: Analyses of clarification performance and toxicity. *Sustainability*, 15(9), 7288.
- Gómez (2010). Eficiencia del coagulante de la semilla de *Moringa oleífera* en el tratamiento de agua con baja turbiedad. Universidad Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/7c23d6ab-447b-4a08-b3f5-ed292e95b897/content>
- González Stuar, A. (2016). *Moringa*. Herbal safety Universidad del Paso Texas. <https://www.utep.edu/herbal-safety/hechos-herbarios/hojas-de-datos-a-base-de-hierbas/moringa.html>
- Gutiérrez J, Aguirre C, Rodríguez M, Alcántara C. (2019). Remoción de Turbiedad en Aguas Naturales mediante Coagulación con *Moringa Oleífera*. *Revista Ingeniería e Investigación*. Volumen 39. Páginas 86-95.

- Gutiérrez, J. (2022). Moringa Oleífera como coagulante para la disminución de la turbiedad en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tundayme - cantón El Pangui, provincia de Zamora Chinchipe. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22948>
- Gutiérrez-Morales, A. M., & Villafuerte-Gálvez, S. (2017). Uso de Moringa oleífera en el tratamiento de aguas en comunidades rurales. *Revista de Ciencias Ambientales*.
- Hernández Agudelo, C. F. y Quimbay Jácome, D. (2021) Evaluación de la semilla de moringa oleífera como coagulante para el tratamiento de aguas residuales de la PTAR El Salitre. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8651>
- Hernández, M. A., Torres, J. F., & Ríos, P. (2021). Uso del polvo de Moringa oleífera en la remoción de turbiedad en fuentes de agua en Montería. *Revista Colombiana de Ingeniería Química*, 15(3), 77-88.
- Ho, YC, Norli, I., Alkarkhi, AF, Morad, N. (2014). Nuevo floculante biopolimérico vegetal: un estudio de degradación y floculación. *Irán. J. Entorno energético* 5 (1), 26–33.
- Hoque, M. R., Alam, M. J., & Hossain, M. I. (2016). Application of Moringa oleífera seed extract as a natural coagulant for water treatment: A review. *International Journal of Engineering Research and Science*, 3(4), 13-18.
- Hoyos, A., Medina, J., Valencia, A & Sánchez, N. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la m. oleífera como coagulante natural. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Edición Especial*. 29. 10.18684/BSAA(15)29-39.
- PHA/AWWA/WPCF. (2022). Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th Edition. American Public Health Association, Washington, D. C.
- Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). World Health Organization.
- International Water Association (IWA). (2012). Performance Indicators for Water Supply Services. IWA Publishing. https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/Manual%20PI%20IWA_ES.pdf
- Jahn, S. A. A. (1988). Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. *Journal of the American Water Works Association*, 80(6), 43–50.
- Jung, Y., Jung, Y., Kwon, M., Kye, H., Abrha, Y. W., & Kang, J. W. (2018). Evaluation of Moringa oleífera seed extract by extraction time: effect on coagulation efficiency and extract characteristic. *Journal of Water and Health*, 16(6), 904–913. <https://doi.org/10.2166/WH.2018.078>
- Katayon, S., Noor, M. J. M. M., Asma, M., et al. (2006). Effects of storage duration and temperature on the performance of Moringa oleífera seeds as a coagulant. *Water Research*, 40(18), 3521-3526.
- Kenea, A., Tadese, F., & Bote, M. E. (2023). Application of Moringa Oleífera seed–VSCO filtration for point of use drinking water treatment technology. *Heliyon*, 9(7), e17961.
- Kumar, M., Yadav, B. S., & Sharma, P. (2022). Moringa oleífera seed extract as a sustainable and low-cost coagulant for the treatment of tannery wastewater: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130217.
- Kurniawan SB, Abdullah SRS, Imron MF, Said NSM, Ismail N', Hasan HA, Othman AR, Purwanti IF. (2020). Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Biofloculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(24):9312. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>.
- Kwaambwa, H. M., Hoadley, A., & Webber, M. (2020). Moringa oleífera in water and wastewater treatment. En A. F. M. Fahmy (Ed.), *Moringa oleífera - The miracle tree*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91924>
- López, J. A., Gutiérrez, J. F., Gil, J. E., & Álvarez, L. M. (2018). Evaluación de la calidad del agua del río Cauca en la ciudad de Cali, Colombia. *Revista colombiana de ciencias exactas y naturales*, 42(2), 363-374.
- Lugo, J., Burgos, J., Lugo, E., Gould, A., & Ovallos, D. (2020). Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon*, 6(1), e03062. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03062>

- Magalhães, L. A. D., et al. (2021). Moringa oleifera seeds as a natural coagulant for water treatment: A review of challenges and opportunities. *Chemosphere*, 287(Pt 3), 132211.
- Makkar & Becker. (1996). Nutritional value and antinutritional components of whole and ethanol extracted Moringa oleifera leaves. *Animal feed science and technology*, 63(1-4), 211-228.
- Megat Johari, M. M. N. (2004). Effects of storage duration and temperature of Moringa oleifera stock solution on its performance in coagulation. *International Journal of Engineering and Technology*, 1, 146–151.
- Melo, J.C.M., de Oliveira, A.C., dos Santos, M.A., de Melo, L.H.M., de Medeiros, R.L., Vieira, R.F., & de Azevedo, A.A. (2020). Moringa oleifera como coagulante natural para el tratamiento de agua potable: revisión bibliográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(10), 827-837.
- Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G., & Díaz, A. (2000). Uso de la Moringa oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas. Recuperado el 18 de 07 de 2017, de Scientific Journal from the Experimental:
<http://www.elaguapotable.com/Uso%20de%20la%20Moringa%20oleifera%20como%20coagulante.pdf>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Meza Leones, María., Donado, Katherine., Martínez, Iván., Verbel, Rafel & Jurado Eraso, Mario. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleifera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. 17. 95-104. 10.18273/revuin.v17n2-2018009.
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J. and Zimmerman, J. (2008). Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of Opuntiaspp. as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), pp.4274-4279.
- MinAmbiente. (2007). Resolución 2115.
https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf
- Montoya C, Loaiza D, Torres P, Cruz C, Escobar J (2011) Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA* 16: 137-148.
- Murillo, S. E. P., Castro, S. M. D. C. R., Manosalva, G. V., & Nevárez, E. M. Z. (2022). Sistema de Potabilización de Agua en Zonas Rurales. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E48), 563-575.
- Muyengwa, C., & Mtalo, F. (2023). Application of Moringa oleifera seed extracts as coagulant for the treatment of surface water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 106350.
- Madrona, G. S., Branco, I. G., Seolin, V. J., Carnelossi, M. A. G., & Bergamasco, R. (2010). Evaluation of extracts of Moringa oleifera Lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. *Acta Scientiarum. Technology*, 32(4), 453–458. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i4.4364>
- Mangale, S. M., Chonde, S. G., Jadhav, A. S., & Raut, P. D. (2012). Study of Moringa oleifera (drumstick) seed as natural absorbent and antimicrobial agent for river water treatment. *J Nat Prod Plant Resour*, 2(1), 89-100.
- Meetiyagoda Thenuwara Arachchige, O. K., Zhang, Y., Matsunaga, E., & Fujino, T. (2025). Efecto de la cáscara de semilla de Moringa oleifera y las técnicas de extracción sobre la eficiencia de la coagulación para la eliminación de cianobacterias. *Práctica y tecnología del agua*, 20(4), 868–878. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.054>
- Mejia Carrillo, D. C., Puello-Polo, E. R., & Rojano, B. A. (2020). Evaluación de la Moringa oleifera en el tratamiento de aguas con alta turbidez y carga orgánica. *Ingeniería del Agua*, 24(2), 119-128.
- Melaku, S. (2020). Evaluación de la capacidad de Moringa oleifera en el tratamiento de agua. *Environmental Science Journal*.
- Ministério da Saúde. (2011). Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. *Diário Oficial da União*. Recuperado de https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Decreto 1287 de 10 de julio de 2014: Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. <https://www.minambiente.gov.co>
- Moyo, B., Masika, P. J., Hugo, A., & Muchenje, V. (2011). Nutritional characterization of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *African journal of biotechnology*, 10(60), 12925-12933.
- Ndabigengesere & Narasiah. (2015). Moringa oleifera seed extracts for water treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 150, 172-181.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K.S. and Talbot, B.G. (1995). Active Agents and Mechanism of Coagulation of Turbid Waters Using Moringa-Oleifera. *Water Research*, 29, 703-710. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)
- Ndamitso, M. M., & Bello, M. M. (2018). Application of Moringa oleifera seed extract as coagulant for water treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 24, 163-173.
- Nishi, L., Cardoso, K. C., & Bergamasco, R. (2012). Study of the effect of saline solution on the extraction of the Moringa Oleifera seed's active component for water treatment. *Acta Scientiarum. Technology*, 34(3), 289-293.
- Nishi & Vieira. (2016). Development of a magnetic coagulant based on Moringa oleifera seed extract for water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 7692–7700. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-6029-7>
- Núñez, E. (2007). Validación de la efectividad de la semilla de Moringa oleífera como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano, Morocelí, Honduras. [Trabajo de grado, Zamorano]. <http://hdl.handle.net/11036/52>
- Nwankwo & Ezech. (2021). Optimization of jar test parameters for effective coagulation of turbid water using Moringa oleifera seed extract. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102141.
- 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, A. A., & Adebayo, A. A. (2018). Effect of temperature on the efficiency of Moringa oleifera seed as a natural coagulant for the removal of turbidity from water. *Journal of Environmental Science and Technology*, 11(2), 135-142.
- Oliveira, J. F., Silva, J. V., Borges, S. V., & Perrone, Í. T. (2022). Effect of heat treatment on the structure, functional properties and composition of Moringa oleifera seed proteins. *Food Chemistry*, 384(4), 132546. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132546>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda [Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum]. Organización Mundial de la Salud. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/>
- Pandey, A., Pandey, S., & Misra, S. (2014). Treatment of turbid water using Moringa oleifera: A case study in the state of Jharkhand, India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(5), 1343-1350.
- Paternina, R., Gutiérrez, L., & Ríos, F. (2020). Uso de Moringa oleifera en polvo en la clarificación de aguas naturales en Cartagena. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 109-122.
- Pritchard, M., & Craven, T. (2010). A study of the parameters affecting the effectiveness of Moringa oleifera in drinking water purification. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(13–14), 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.020>
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A.S. y O'neil, J.G. (2009). A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water. An alternative sustainable solution for developing countries, doi:10.1016/j.pce.2010.07.014, *Physics and Chemistry of the Earth*, (en línea), 35, 798-805
- Quiñones & Riascos. (2018). Evaluación y validación de la acción de semillas de moringa oleífera como coagulante natural para la remoción de color, en la planta de tratamiento centenario del municipio de

- Rahayu, R. F., Prayitno, A., Purwanto, B., & Widiastuti, W. (2024, diciembre). Bibliometric analysis of research in *Moringa oleifera* Lam. and atherosclerosis. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 12(s1), S91–S95. https://doi.org/10.56499/jppres23.1773_12.s1.91
- Ramírez, A. O., Durán, L. C., & Molina, L. C. (2023). Introducción al uso de coagulantes naturales en los procesos de potabilización de agua. *Revista ambiental. Agua, aire y suelo*, 11(2), 1-14. <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i2.873>
- Rao, N.S., Reddy, P.V.R.K., & Krishna, K.M.M. (2015). Optimización de la dosis de *Moringa oleifera* para la eliminación de turbiedad y bacterias del agua. *Desalination and Water Treatment*, 55(13), 3579-3587.
- Restrepo, I. C., Marín, D. A., & Zapata, B. P. (2017). *Moringa oleifera* como coagulante natural para la clarificación de agua: revisión de literatura. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 107-124.
- Ribeiro, J.V.M.; Andrade, P.V.; dos Reis, A.G. (2019). Semilla de *Moringa oleifera* como coagulante natural para tratar agua de baja turbiedad mediante filtración en línea. *Rev. Ambient. Agua* 2019, 14, e2442
- Rivera, E. A. (2012). Uso del extracto de la semilla de *moringa oleifera* como coagulante natural primario y ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano.
- Rojas & Castaño. (2022). Política y práctica en el uso de *Moringa oleifera* como coagulante natural en Colombia. *Revista de Política Ambiental*, 18(1), 25–40.
- Rondeau, V., Commenges, D., Jacqmin-Gadda, H., & Dartigues, J. F. (2000). Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: An 8-year follow-up study. *American Journal of Epidemiology*, 152(1), 59–66. <https://doi.org/10.1093/aje/152.1.59>
- S. Babel y T. K. Bura. (2009). "Removal of lead and cadmium from aqueous solution by cellulosic sorbent from *Moringa oleifera*". *Journal of Hazardous Materials*, 163(2), 233-243.
- Salamanca J, García C, Restrepo L. (2018). Eficiencia de la *Moringa Oleifera* como Coagulante Natural para la Remoción de Turbiedad en Aguas Superficiales. *Revista Ingeniería e Investigación*. Volumen 36. Páginas 197-208.
- Saleem, M., Bachmann, R.T. (2019). Una revisión contemporánea sobre coagulantes de origen vegetal para aplicaciones en el tratamiento de agua. *Revista de Química Industrial y de Ingeniería* 72, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029>.
- Sánchez Torres, L. D., & Quiroga Rubiano, Edgar. (2020). Sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de agua para la zona rural. *Revista De Ingeniería*, 1(49), 52-61. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.7>
- Sánchez, L, Sánchez, A, Galvis, G, Latorre, J. (2007). Filtración en Múltiples Etapas. IRC. Working Paper. IRC Centro Internacional En Agua y Saneamiento. Traducción española por CINARA. Página 68. https://es.ircwash.org/sites/default/files/top15_mfs_s.pdf
- Sánchez-Martín, J., Ghebremichael, K., & Beltrán-Heredia, J. (2010). Comparison of single-step and two-step purified coagulants from *Moringa oleifera* seed for turbidity and DOC removal. *Bioresource technology*, 101(15), 6259-6261.
- Sandoval Arreola, J. A., & Laines Cánepa, J. L. (2013). *Moringa oleifera* una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de agua. *Revista Ingeniería*, 17(2), 93-101.
- Santos, A. F. S., Arantes, M. C., Soares, P. S. M., & Ferreira, W. E. (2012). Improvement of the flocculation process in water treatment by using *Moringa oleifera* seeds extract. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(3), 495–501. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000300006>
- Santos, L. A., Oliveira, R. C., & Costa, J. P. (2016). Application of *Moringa oleifera* seed powder in water treatment. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 41(3), 75-83.
- Scaramal, G., Guilherme, I., Jurca, V., Alvles, B., Fagundes, R., & Bergamasco, R. (2012). Evaluation of extracts of *Moringa Oleifera* Lam Seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. *Universidade estadual de Maringá*.
- Sharma y Chaudhary. (2015). Effect of temperature and pH on the performance of *Moringa oleifera* seed powder in water treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 4, 67-74.

- Sharma, P. (2022). Moringa oleifera seed extract as a sustainable and low-cost coagulant for the treatment of tannery wastewater: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130217.
- Sheth, S., et al. (2024). Sustainable sewage water treatment based on Natural plant coagulant (NPC) Moringa oleifera. *Applied Water Science*, 14(1), 23.
- Singh & Kumar. (2017). Moringa oleifera (Moringaceae) seeds as a natural coagulant for the removal of color from industrial wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 22137-22145.
- Skaf, D.W.; Punzi, V.L.; Rolle, J.T.; Cullen, E. (2021). Impact of Moringa Oleifera extraction conditions on zeta potential and coagulation effectiveness. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021, 9, 104687.
- Soto, J. A., Gómez, A. C., Vásquez, M., Barreto, A. N., Molina, K. S., & Zuniga-Gonzalez, C. A. (2025). Biological properties of Moringa oleifera: A systematic review of the last decade. *F1000Research*, 13, 1390. <https://doi.org/10.12688/f1000research.157194.2>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental–Lodos y biosólidos–Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-004-semarnat-2002/>
- Teklehaimanot & Melaku. (2020). Application of Moringa stenopetala seeds as a natural coagulant for water treatment. *Heliyon*, 6(12), e05716.
- Trigo, C., Castelló, M., & Ortola, M. (2020). Moringa Oleifera: an unknown crop in developed countries with great industrial potential and adapted to climate change. *Foods*, 10(1), 31.
- Uysal M., & Ar, I. (2007). Removal of Cr(VI) from industrial wastewaters by adsorption: Part I: Determination of optimum conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2), 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.019>
- Valencia, A., & Ramírez, H. (2016). Eficiencia del extracto de semillas de Moringa oleifera en el tratamiento de agua superficial. *Revista de Ingeniería*.
- Valverde, K. C., Paccola, E. A. S., Pomini, A. M., Yamaguchi, N. U., & Bergamasco, R. (2018). Combined water treatment with extract of natural Moringa oleifera Lam and synthetic coagulant. *Revista Ambiente & Água*, 13(3), 1–11. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2135>
- Van der Kooij & Lettinga. (2000). Chemical coagulation and flocculation for water and wastewater treatment. Elsevier Science.
- Vega Andrade, P.; Palanca, CF; Oliveira, MAC; Ito, CYK; Reis, AG. (2021). Uso de la semilla de Moringa oleifera como coagulante natural en el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas: evaluación fisicoquímica, citotoxicidad y carga bacteriana. *J. Water Process Eng.* 2021, 40, 101859.
- Villamizar I. (2020). Tecnologías para la potabilización y tratamiento de aguas superficiales en Colombia. [repositoriodspace](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5359/1/Villamizar_2020_TG.pdf).
- Van Benschoten & Edzwald. (1990). Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water Research*, 24, 1519–1526. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90159-H](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90159-H)
- Valdivieso, A., Mendoza, J., & Rodríguez, D. (2024). Use of Moringa oleifera as a natural coagulant in the reduction of water turbidity in mining activities. *Water*, 16(16), 2315.
- Villar-Navarro, M., Pizarro-Castillo, F. X., & Cayo-Rojas, C. F. (2024). Exploring Moringa oleifera: Green solutions for sustainable wastewater treatment and agricultural advancement. *Sustainability*, 16(21), 9433.
- Wang, Y., Zhou, W.-Z., Gao, B.-Y., Xu, X.-M., & Xu, G.-Y. (2009). The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. *Separation and Purification Technology*, 66, 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.12.013>
- Yarahmadi M., Hossieni M., Bina B., Mahmoudian M.H., Naimabadie A., Shahsavani A., (2009), Application of Moringa oleifera seed extract and polyaluminum chloride in water treatment, *World Applied Sciences Journal*, 7, 962-967.

- Yimer, A. B. (2021). Papaya seed extract as a coagulant for drinking water treatment in the case of the Tulte river for the Yekuset district community, Ethiopia. *Environmental challenges*, 4, 100198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100198>
- Ye , C., Wang, D., Shi, B., Yu, J., & Qu, J. (2007). Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 294, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.08.034>
- Yin, C.-Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437-1444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>
- Zhang, H., Zheng, L., Li, Z., Pi, K., & Deng, Y. (2020). One-step Ferrate(VI) treatment as a core process for alternative drinking water treatment. *Chemosphere*, 242, 125134. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125134>
- Zerpa, FL, Chirinza, N., MUGUIRRIMA, PV, Pino, CAM y Martín, AR (2025). Extracto de semilla de *Moringa oleifera* como coagulante en el tratamiento de agua potable. *Dyna* , 100 (1), 5. <https://doi.org/10.52152/d11359>