

EVALUACIÓN DEL BIOCOAGULANTE EXTRAÍDO DE LA SEMILLA DE MORINGA (*M. OLEÍFERA*) COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA CUENCA RÍO MOLINO (POPAYÁN - CAUCA)



Uniautónoma
DEL CAUCA

Autores

Marly Cristina Ruiz Guamanga

Juan Manuel Amaya Garcia

Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca
Facultad De Ciencias Ambientales Y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca

2021

EVALUACIÓN DEL BIOCOAGULANTE EXTRAÍDO DE LA SEMILLA DE MORINGA (*M. OLEÍFERA*) COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA CUENCA RÍO MOLINO (POPAYÁN - CAUCA)



Uniautónoma
DEL CAUCA

Autores

Marly Cristina Ruiz Guamanga

Juan Manuel Amaya García

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Directora

Mónica Alejandra Moreno Ruano Ph.D.

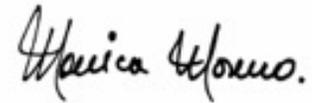
Docente-Investigadora Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca
Facultad De Ciencias Ambientales Y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Hacemos constar que el presente trabajo de grado titulado “***Evaluación del biocoagulante extraído de la semilla de Moringa (M. Oleífera) como coadyuvante en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas superficiales en la cuenca río Molino (Popayán - Cauca)***” ha sido evaluado y aprobado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario.



PhD. Mónica Alejandra Moreno R.

Directora



Esp. Arnel Arias Hoyos

Jurado



McS. Natalia Eugenia Samboni Ruiz

Jurado

Popayán, 20 de septiembre de 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado está dedicado principalmente a Dios quien me ha dado la vida y la fortaleza para seguir adelante, a mis padres por haberme dado su apoyo incondicional durante toda mi vida y por ser el soporte para el cumplimiento de mis sueños que significan una enorme alegría y orgullo para mí, como para ellos.

Marly Cristina Ruiz.

Dedico de manera especial este trabajo de grado a mis padres por haberme forjado como la persona que soy hoy en día, todos mis logros se los debo a ustedes, desde muy pequeño me formaron con reglas y valores que hoy aprecio porque gracias a su gran ejemplo hoy logro culminar con éxito mi tan anhelada carrera.

Dedico este logro a mi abuela Ana Alicia, mi tía María Helena y mi hermana Katherine quienes desde que tengo memoria han sido mi apoyo incondicional, son mi motivación y quienes me llenan de alegría al saber que son las personas que más me aman en el mundo, a todos ellos dedico el presente trabajo, porque han formado en mí, el deseo de superación y de triunfo en la vida, espero poder contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

También quiero dedicar este proyecto a la persona que estuvo a mi lado durante todo este proceso, Cristina Ruiz, eres una mujer que simplemente llena de orgullo, te amo y no va a haber manera de devolverte tanto que me has ofrecido, esta tesis es nuestro logro.

Juan Manuel Amaya Garcia

A nuestros queridos y admirados docentes y personal de laboratorio que hacen parte de la Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible, a nuestros grandes mentores investigadores que forjaron la mejor formación personal y profesional en este peldaño tan importante para avanzar, crecer, evolucionar y competir en la vida real, quienes con sus enseñanzas y saberes hacen de nosotros unos profesionales capaces de enfrentar las problemáticas del presente y el mañana.

Marly Cristina Ruiz Guamanga y Juan Manuel Amaya Garcia

AGRADECIMIENTO

Yo, Marly Cristina Ruiz doy gracias a Dios por permitirme vivir este gran proceso académico el cual me formó como profesional, agradezco a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, a mi novio y compañero Juan Manuel Amaya por su paciencia, motivación y disciplina, porque juntos logramos culminar este gran trabajo a pesar de que el camino no fue fácil.

Yo, Juan Manuel Amaya Garcia, quiero agradecer inicialmente a mis padres, ya han pasado muchos años desde que nací y desde ese momento e incluso antes ya estaban buscando maneras de ofrecerme lo mejor, han trabajado duro y sin importar las adversidades que se nos han presentado hemos logrado mantenernos como una familia de la cual me siento muy orgulloso.

Gracias a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes siempre han creído en mí, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo.

Quiero agradecer a mi compañera de vida esa persona que siempre estuvo ahí trabajando muy fuerte para sacar este proyecto adelante, Cristina, eres mi amor, eres mi fuerza y deseo una larga vida a tu lado, tu compañía y ayuda han sido fundamental, has estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos. Este proyecto no fue fácil, pero trabajar a tu lado motivándonos el uno al otro fue lo que lo hizo realmente posible.

Queremos agradecer a nuestra directora Mónica Alejandra Moreno y a nuestro asesor Johann Vera, quienes desde un principio aceptaron ser nuestras guías en este importante proceso, gracias por la paciencia, entrega, dedicación, conocimientos ofrecidos y amistad brindada durante este tiempo, así mismo, de manera muy fraternal, agradecer a los docentes Natalia Samboni, Clara Concha y Arnol Arias por brindarnos su colaboración y apoyo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPÍTULO I. PROBLEMA	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAS CONCEPTUALES ...	6
2.1 ANTECEDENTES	6
2.2 ÁREA DE ESTUDIO	8
2.2.1 Localización fuente hídrica río Molino	8
2.2.2 Micro localización punto de muestreo	9
2.2.3 Aspecto físico biótico subcuenca río Molino	9
2.2.4 Aspectos socioeconómicos subcuenca río Molino	10
2.2.5 Aspectos ambientales subcuenca río Molino.....	10
2.3 BASES TEÓRICAS	11
2.3.1 Contaminación de aguas superficiales	11
2.3.2 Contaminación por vertimientos sobre aguas superficiales	11
2.3.3 Clarificación de aguas superficiales	12
2.3.4 Proceso de coagulación	12
2.3.5 Proceso de floculación	12
2.3.6 Coagulantes naturales.....	13
2.3.7 <i>M. Oleífera</i>	13
2.3.8 Coagulantes químicos o inorgánicos.....	15
2.3.9 Sulfato de aluminio	15
2.3.10 Prueba de jarras	15
2.3.11 Parámetros fisicoquímicos relevantes para la coagulación	16
2.4 BASES LEGALES.....	17

3.	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	18
3.1	DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD HÍDRICA	18
3.1.1	Toma de muestra.....	18
3.1.2	Medición de parámetros físico - químicos.....	19
3.1.3	Determinación índice de contaminación del agua	21
3.2	DETERMINACIÓN DE LAS DOSIS Y CONDICIONES PARA LOS COAGULANTES.....	22
3.2.1	Extracción del agente coagulante a partir la semilla de <i>M. Oleífera</i> ...	22
3.2.2	Preparación del coagulante natural.....	24
3.2.3	Preparación del coagulante químico.....	25
3.2.4	Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación.....	25
3.3	COMPARACIÓN <i>EX SITU</i> DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES.....	27
3.3.1	Elección y mezcla de la dosis óptima para cada concentración de coagulante	27
3.3.2	Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación.....	27
3.3.3	Medición de <i>E. Coli</i> y coliformes totales inicial y final	27
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
4.1	DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD HÍDRICA	29
4.1.1	Medición de parámetros físico - químicos.....	29
4.1.2	Determinación índice de contaminación del agua	34
4.2	DETERMINACIÓN DE LAS DOSIS Y CONDICIONES PARA LOS COAGULANTES.....	36
4.2.1	Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación.....	36
4.2.2	Determinación de la dosis óptima para el coagulante químico sulfato de aluminio	36
4.2.4	Solubilidad agente coagulante <i>M. Oleífera</i>	40
4.2.5	Comparación del coagulante natural <i>M. Oleífera</i> con 4 meses de diferencia	41
4.3	COMPARACIÓN <i>EX SITU</i> DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES.....	42
4.3.1	Elección y mezcla de la dosis óptima para cada concentración de coagulante	42

4.3.2	Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación.....	42
4.3.3	Medición de <i>E. Coli</i> y coliformes totales inicial y final	45
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1	CONCLUSIONES	47
5.2	RECOMENDACIONES	48
6.	BIBLIOGRAFÍA	50
7.	ANEXOS	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis químico de la semilla M. Oleífera.....	14
Tabla 2. Normas Ambientales Colombianas y su respectiva descripción.....	17
Tabla 3. Coagulantes y concentraciones del coagulante M. Oleífera	25
Tabla 4. Parámetros estandarizados de la prueba de jarras	26
Tabla 5. Clasificación del agua de acuerdo con su turbidez.....	30
Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo con su conductividad	31
Tabla 7. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas presentes	32
Tabla 8. Resultados de los parámetros fisico-químicos del agua residual río Molino sector Camilo Torres.....	32
Tabla 9. Resultados parámetros físico – químicos medidos en el laboratorio del Acueducto de Popayán	33
Tabla 10. Clasificación de fuentes hídricas de acuerdo con la Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000	37
Tabla 11. Resultados prueba de jarras con el coagulante M. Oleífera	38
Tabla 12. Medición de pH antes y después de la prueba de jarras	40
Tabla 13. Metodología mezcla de coagulantes.....	42
Tabla 14. Resultados mezcla M. Oleífera y sulfato de aluminio tiempo soleado	43
Tabla 15. Muestra de agua antes y después del tratamiento	43
Tabla 16. Resultados mezcla M. Oleífera y sulfato de aluminio tiempo lluvioso	44
Tabla 17. Dosis óptima de coagulante para el río Molino.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización área de estudio	8
Figura 2. Micro localización área de estudio	9
Figura 3. Proceso de coagulación y floculación	13
Figura 4. Especie <i>M. Oleífera</i>	14
Figura 5. Floculador de cuatro aspas	16
Figura 6. Esquema metodológico.....	18
Figura 7. Punto de recolección de vertimientos de agua residual río Molino sector Camilo Torres (Popayán – Cauca)	19
Figura 8. Porcentaje de saturación oxígeno disuelto	20
Figura 9. Muestra DBO ₅ (A) y muestra E. Coli y coliformes totales (B).....	21
Figura 10. Ventana principal software ICATEST v1.0	21
Figura 11. Diagrama extracción del agente coagulante <i>M. Oleífera</i>	23
Figura 12. Índice de calidad de agua para BDO ₅	34
Figura 13. Resultados del Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO)	35
Figura 14. Gráfica resultado del Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO).....	35
Figura 15. Prueba de jarras con el coagulante sulfato de aluminio (5 mg/L) .	36
Figura 16. Resultados dosis óptima de las diferentes concentraciones y tratamientos del coagulante natural <i>M. Oleífera</i>	39
Figura 17. Solubilidad agente coagulante <i>M. Oleífera</i>	41
Figura 18. Resultados óptimos mezcla <i>M. Oleífera</i> y sulfato de aluminio tiempo soleado y lluvioso	45
Figura 19. Resultados prueba COLITAG coliformes totales	46
Figura 20. Resultados prueba COLITAG E. Coli.....	46

RESUMEN

La presente investigación es un estudio comparativo sobre la eficacia de la mezcla del coagulante natural de *M. Oleífera* y el coagulante químico sulfato de aluminio en el tratamiento de las aguas residuales del río Molino en Popayán sector Camilo Torres; midiendo la efectividad de los coagulantes tanto individual como combinada, se inició con el diagnóstico de la calidad hídrica del río Molino, midiendo los siguientes parámetros físico-químicos: DBO₅, oxígeno disuelto, turbidez, pH, conductividad, alcalinidad, nitritos, nitratos, coliformes totales y *E. Coli* para posteriormente mediante el software ICATEST obtener un valor para el índice de contaminación de agua de 0,811 lo que significa un grado de contaminación muy alto.

La extracción y preparación de los agentes coagulantes se realizó dos (2) veces siguiendo la misma metodología con una diferencia de cuatro (4) meses entre cada una, obteniendo tres (3) concentraciones 10, 20 y 30 g/L en cada extracción para un total de seis (6) coagulantes; además de esto en la segunda extracción se prepararon dos (2) coagulantes más de 10 y 20 g/L con la diferencia de que el agente coagulante fue secado en un horno eléctrico a 150 °C.

Para llevar a cabo el ensayo y medición del proceso de coagulación se formuló un diseño experimental basado en tres (3) series de pruebas de jarras; la primera con coagulante químico y natural de manera individual, una segunda serie con la mezcla de los dos coagulantes sobre una muestra de agua con baja turbidez y una tercera sobre una muestra con alta turbidez obteniendo mediante un análisis estadístico las dosis óptimas para cada serie.

Los resultados mostraron que para tiempo soleado se realizaría una combinación de sulfato de aluminio 5 mg/L, *M. Oleífera* 10 g/L en proporciones de 15.8 % y 84.2 %, respectivamente logrando una remoción del 96 %. Para tiempo lluvioso una combinación de sulfato de aluminio 5 mg/L, *M. Oleífera* 20 g/L en proporciones de 17.7 % y 82.3%, respectivamente con una remoción de 98.3 %.

Palabras claves: Turbidez, coagulante natural, coagulante químico, *M. Oleífera*.

ABSTRACT

The present research is a comparative study on the effectiveness of the mixture of the natural coagulant of *M. Oleifera* and the chemical coagulant aluminum sulfate in the treatment of wastewater from the Molino River in Popayán sector Camilo Torres; measuring the effectiveness of coagulants both individual and combined, began with the diagnosis of the water quality of the River Molino, measuring the following physico-chemical parameters: BOD5, dissolved oxygen, turbidity, pH, conductivity, alkalinity, nitrites, nitrates, total coliforms and E. Coli to later through the ICATEST software obtain a value for the water pollution index of 0.811 which means a very high degree of contamination.

The extraction and preparation of the coagulating agents was performed two (2) times following the same methodology with a difference of four (4) months between each, obtaining three (3) concentrations 10, 20 and 30 g / L in each extraction for a total of six (6) coagulants; in addition to this in the second extraction two (2) coagulants more than 10 and 20 g / L were prepared with the difference that the coagulating agent was dried in an electric oven at 150 ° C.

To carry out the assay and measurement of the coagulation process, an experimental design was formulated based on three series of jar tests, the first with chemical and natural coagulant individually, a second series with the mixture of the two coagulants on a water sample with low turbidity and a third on a sample with high turbidity obtaining through a statistical analysis the optimal doses for each series.

The results showed that for sunny weather a combination of aluminum sulfate 5 mg/L, *M. Oleiferous* 10 g/L in proportions of 15.8% and 84.2% would be performed, respectively achieving a removal of 96%. For rainy weather a combination of aluminum sulfate 5 mg/L, *M. Oleifera* 20 g/L in proportions of 17.7% and 82.3%, respectively with a removal of 98.3%.

Keywords: Turbidity, natural coagulant, chemical coagulant, *M. Oleífera*.

INTRODUCCIÓN

El agua de las fuentes hídricas superficiales contiene millones de partículas microscópicas e impurezas disueltas en ella debido a su gran capacidad solubilizante; este material disuelto abarca minerales, compuestos orgánicos e inorgánicos que cambian las características físicas, químicas y biológicas del agua[1]. Por lo tanto, el agua de la mayoría de los cuerpos superficiales debe someterse a procesos de tratamiento y purificación para cumplir con los límites esperados tanto para el agua potable como residual. La técnica de purificación aplicada varía en función de las características del agua a tratar [2].

El proceso de purificación generalmente incluye la eliminación de las impurezas disueltas para mejorar la turbidez y el color del agua a través de la sedimentación al permitir que las partículas suspendidas se asienten por gravedad. Sin embargo, estas partículas coloidales son demasiado pequeñas para asentarse individualmente, por lo tanto, deben aglomerarse para aumentar su peso y asentarse por gravedad; estas partículas suspendidas suelen tener una carga eléctrica negativa en su superficie por lo que tienden a repelerse entre sí; por esta razón, permanecerán suspendidos en lugar de agruparse y asentarse en el fondo, esto ha resultado en el desarrollo de un proceso llamado coagulación.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilizar químicamente la materia en suspensión, en agua cruda, de modo que se unan para formar aglomerados más grandes conocidos como flóculos [3]. Los coagulantes son sustancias que se utilizan para eliminar el color y la turbidez del agua, lo cual logran facilitando la formación de grandes aglomerados que pueden sedimentarse para su posterior eliminación.

Las plantas de tratamiento de agua convencionales en los países en desarrollo usan coagulantes químicos principalmente a base de aluminio y hierro debido a su alta eficiencia de remoción de turbidez, sin embargo el aluminio aumenta la concentración total de sólidos disueltos del agua tratada y también produce grandes volúmenes de lodos que no son biodegradables y difíciles de eliminar; por lo tanto, estos inconvenientes exigen una gran investigación con respecto al desarrollo de coagulantes alternativos, rentables y respetuosos con el medio ambiente. Estas alternativas vienen en forma de coagulantes naturales que se sabe son ecológicos y más baratos, ya que están disponibles localmente [4].

El uso de coagulantes naturales a base de plantas para eliminar la turbidez en el agua no es una idea nueva, varios investigadores han realizado estudios en diferentes extractos de plantas para comprobar su capacidad para eliminar la turbidez en el agua, el polvo obtenido de las semillas de *M. Oleífera* demostró ser un coagulante alternativo eficaz [5]. Las semillas de *M. Oleífera* contienen proteínas que producen una carga positiva cuando se introducen en el agua, lo que resulta en la atracción electrostática con las partículas cargadas negativamente en el agua, los

estudios revelaron que la *M. Oleífera* no es tóxica, es biodegradable y por lo tanto, es ecológica y también genera menos volúmenes de lodos [6].

Sin embargo, los coagulantes naturales tienen una menor eficiencia de eliminación de la turbidez individual con respecto al coagulante químico en el tratamiento de aguas y existen pocas investigaciones relacionadas con la mezcla de coagulantes naturales y químicos para obtener un coagulante de alto rendimiento que sea efectivo en aguas residuales, por lo que este estudio se centra en mezclar los dos coagulantes para producir uno mejor en términos de rendimiento de reducción de la turbidez.

CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el ordenamiento territorial y la creación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estipuladas por la Ley 99 de 1993, es deber de los municipios implementar medidas de mitigación en favor de la protección de ecosistemas y del medio ambiente en general [7], sobre todo en el tratamiento de los residuos líquidos, por ejemplo, los provenientes de viviendas e industrias que deben ser una prioridad para la conservación y descontaminación de las fuentes hídricas, debido a que las normas nacionales prohíben que se realicen vertimientos de aguas servidas directamente en las fuentes, sin un tratamiento previo [8].

En las corrientes de agua superficiales receptoras de vertimientos tanto domésticas como no domésticas, existen sustancias químicas tales como ácidos, sales o metales tóxicos que en grandes cantidades pueden causar graves daños en los ecosistemas acuáticos [9]. A partir de esto cabe la posibilidad de que este tipo de contaminantes se acumulen en la cadena alimentaria, generando que los depredadores consuman presas contaminadas, hasta llegar a los seres humanos expuestos a contaminantes químicos por ingerir este tipo de alimentos o beber agua; además, la contaminación química también puede repercutir negativamente en el rendimiento de actividades productivas como la agricultura o la ganadería, en las que el agua es un elemento esencial [10].

Sin embargo, un gran aportante de sales al agua es el proceso de coagulación en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, el cual consiste en la adición de compuestos químicos, tales como el sulfato de aluminio, que desestabilizan las partículas para su aglomeración en flóculos superando el peso específico del agua, y posteriormente sedimentándose para facilitar su remoción [11]. Es decir, una vez culminado el proceso de tratamiento estas sustancias químicas permanecen en el agua, en forma residual, acumulándose en el medio ambiente; es el caso del sulfato de aluminio el cual se asimila de forma sencilla en los seres vivos y su ingesta prolongada, tiene efectos negativos en la salud [12].

Un estudio realizado en Brasil por Melo Oliveira durante el año 2016 dió como resultado que el sulfato de aluminio genera impactos en las *Oreochromis niloticus*, conocidas como tilapias, causando hidrolasas del cerebro, el tracto digestivo y masa muscular. En cuanto al impacto a los seres humanos se conoce que el sulfato de aluminio tiene incidencia en el deterioro cognitivo, deterioro de las células epiteliales, demencia, en la aparición de la enfermedad del Alzheimer, cáncer y enfermedades óseas [12].

La ciudad de Popayán no es ajena frente a la difícil situación de contaminación ambiental que generan los vertimientos de aguas no tratadas del sistema del alcantarillado, sobre las fuentes hídricas que atraviesan la ciudad de Popayán y que a su vez impactan el río Cauca, siendo esta la segunda fuente importante a nivel

nacional es por eso que el presente trabajo investigó la eficiencia de dos coagulantes el sulfato de aluminio y el extracto de semillas de *M. Oleífera* en diferentes concentraciones para remoción de turbiedad y demostrar a través de ensayo y error los óptimos resultados de la semilla de *M. Oleífera*, como coadyuvante potencialmente viable del sulfato de aluminio para clarificación de aguas, para ser aplicados en el municipio de Popayán, específicamente en la cuenca río Molino.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Es de mucha importancia la construcción de obras como las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para dar solución a las problemáticas derivadas por los vertimientos realizados a campo abierto en busca de un saneamiento básico para así garantizar un ambiente sano en el mundo [13]; dentro de estos procesos la remoción de turbidez y color es uno de los pasos más importantes en la clarificación de aguas, esto se logra generalmente utilizando coagulantes; muchos de estos son ampliamente utilizados basados en sus características químicas, estos coagulantes se clasifican en polímeros orgánicos, inorgánicos, sintéticos y coagulantes naturales [14].

Hoy en día la búsqueda de coagulantes naturales de origen vegetal es un tema cada vez más estudiado, debido a que estos no alteran significativamente el pH y la conductividad del agua analizada [15]. En la actualidad el mayor interés ha surgido por el estudio del árbol de *M. Oleífera*, el cual pertenece al género de Moringácea, la cual es una de las 14 especies de árboles existentes; sin embargo, cabe resaltar que su principal importancia se da debido a que ha sido catalogado como el mejor coagulante natural para la purificación de aguas turbias [16]. Este coagulante se obtiene como subproducto de la extracción de aceite, generalmente después de la extracción de coagulantes, el residuo puede ser utilizado como fertilizante o procesado para forraje animal; cabe destacar que la parte que se utiliza para la clarificación de agua es un producto de desecho y se puede adquirir a un costo muy bajo [17].

Con lo anterior y sabiendo que, en nuestro país no disponemos de una estadística exacta sobre la cantidad de lodos producidos en los sistemas de tratamiento de aguas, los cuales son catalogados como lodos con alta concentración de aluminio los cuales en mayor medida se disponen en rellenos sanitarios y terrenos que usualmente no tienen una infraestructura idónea para su manejo [18], generando así problemas de acidificación de suelos y el ambiente en general; además de que existen numerosos estudios indicando la hipótesis de que la exposición al sulfato de aluminio representa un riesgo para el desarrollo de la enfermedad neurodegenerativa de Alzheimer planteando así la necesidad de implementar técnicas alternativas de tratamiento que incluyan procesos físicos, químicos y biológicos que reduzcan la carga de contaminantes

contenida en las aguas superficiales, sin dejar residuos metálicos que puedan provocar efectos negativos a nivel social y ambiental [19].

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo generar información la cual servirá como línea base para estudios posteriores encaminados a la implementación del coagulante a base de *M. Oleífera* como coadyuvante del sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua residual proyectada en la ciudad de Popayán para recibir las aguas del sector de estudio la subcuenca del río Molino. La metodología aquí propuesta podría ser aplicada a las demás cuencas de la ciudad, permitiendo de esta manera el inicio de un saneamiento básico y manejo integral del recurso hídrico para la ciudad de Popayán [20].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad coagulante de las semillas de *M. Oleífera* como coadyuvante del sulfato de aluminio en el proceso de clarificación del agua en la subcuenca del río Molino (Popayán – Cauca).

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la calidad hídrica del río Molino sector Camilo Torres (Popayán – Cauca).
- Determinar las dosis y las condiciones para los coagulantes de sulfato de aluminio, *M. Oleífera* y su fusión.
- Comparar *ex situ* el comportamiento tanto individual como combinado del sulfato de aluminio y *M. Oleífera*.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAS CONCEPTUALES

2.1 ANTECEDENTES

En 2019 Acevedo *et al* investigó el uso de semillas de *M. Oleífera* como floculante natural para la purificación de aguas crudas de río Negro, río de Oro y la quebrada Floridablanca en Santander departamento de Colombia, con el fin de reemplazar el sulfato de aluminio utilizado como método floculante. Debido a que la harina íntegra de *M. Oleífera* no es una sustancia estándar en el mercado para la floculación, se decidió por bibliografía la metodología de extracción de esta y de método de jarras. Al aplicar esta metodología experimental que no se había probado anteriormente en Santander, se pudo concluir que las proteínas catiónicas presentes en la harina de *M. Oleífera*, responsables de la floculación, pueden ser utilizadas en conjunto con el sulfato, con el fin de llegar a reemplazarlo en un futuro[14].

Campos Castro *et al* (2019), tuvo como objetivo principal evaluar el efecto coagulante de la semilla de *M. Oleífera* para clarificar agua del Canal Monsefú, centro poblado Callanca, norte de Perú, para lo cual se tomaron muestras de agua del canal mencionado, se realizó el análisis fisicoquímico obteniendo una turbidez inicial de 413 NTU , pH de 8 y conductividad de 818 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Posterior a esto se aplicó 3 dosis de polvo de semilla de *M. Oleífera* (0,2; 0,4 y 0,6 g) como coagulante natural, para tres alícuotas de 500 mL de muestra de agua, con una agitación rápida de 5 minutos y una agitación lenta de 20 minutos. Los resultados fueron que para 0,2 g se redujo de 413 NTU a 48,1 NTU, para 0,4 g se redujo de 413 NTU a 46,5 NTU y para 0,6 g se redujo de 413 NTU a 54,8 NTU. Al término del experimento se concluyó que el mejor porcentaje de eficiencia con un 88,74 % se obtuvo con una dosis de 0,4 g de polvo semilla de *M. Oleífera* [21].

En la ciénaga de Malambo – Atlántico, en el año 2018 un grupo de Investigación en Biotecnología de Microalgas, Fisicoquímica Aplicada y Estudios Ambientales de la Universidad del Atlántico – Barranquilla, realizó un estudio el cual tuvo como finalidad la evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *M. Oleífera* en el proceso de clarificación del agua. Para cumplir con los objetivos, se llevó a cabo un muestreo simple del agua de la ciénaga de Malambo registrando sus características iniciales. Mediante la prueba de jarras, se simuló un proceso de clarificación y se observó la reducción de turbidez que se obtuvo con cada coagulante; concluyendo que el sulfato de aluminio disminuye la turbidez en un 96 %, mientras que las semillas de *M. Oleífera* reducen este mismo parámetro en un 64 %. Por su baja toxicidad, este coagulante natural es una alternativa para reemplazar parcialmente al sulfato de aluminio[22].

En el año 2017 en la ciudad de Popayán se llevó a cabo un proyecto de investigación denominado “Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *M. Oleífera* como coagulante natural” por

Arias Hoyos, *et al.* de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. En esta investigación se realizaron pruebas de coagulación utilizando la prueba de jarras mediante la adición de dosis predeterminadas del coagulante de origen natural a base de *M. Oleífera*. Los resultados que se obtuvieron utilizando esta semilla comprueban la eficiencia en remoción de turbidez y color, dado que se obtuvo con una remoción de turbidez de 86,7 % y de color de 93 %; lo que demuestra una posibilidad para la aplicación de este coagulante natural a las aguas residuales provenientes de una planta de sacrificio animal. Se determinó que la *M. Oleífera* disminuye los parámetros DBO5, DQO, SST, coliformes totales y fecales, alcanzando porcentajes mayores al 90 % en remoción de coliformes totales y fecales, y porcentajes entre 20 y 60 % para el resto de contaminantes, aunque no se obtuvieron los valores límites máximos permisibles de todos los contaminantes en cuestión para vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público dictados por la Normatividad Colombiana actual vigente como lo es la resolución 0631 de 2015. Por lo tanto, el uso de esta semilla como coagulante viene siendo un método efectivo para emplearlo como complemento para estos procesos y más aún para lugares donde no cuentan con la tecnología ni la economía adecuada para dichos procesos[23].

En el año 2012 en la Universidad Libre de Bogotá se realizó un proyecto de grado titulado “Evaluación de la semillas de *M. Oleífera* como coagulante natural para el tratamiento de aguas en el departamento del Meta” por Pedroza *et al.*, determinando que las condiciones más adecuadas para disminuir la turbidez en un 91 % consistió en una mezcla de proporciones 70:30 sulfato de aluminio y *M. Oleífera*, cada uno con una concentración de 10.000 ppm y 20.000 ppm, respectivamente, y la dosis adecuada que se usó fue de 6 mL a un pH de 8 para eliminar finalmente de una forma eficaz la turbiedad del agua del río Guatiquia[24].

En el año 2010 se llevó a cabo un estudio en el país de Honduras, en donde se vió reflejado la existencia de problemáticas o limitantes en el consumo de agua en zonas rurales debido a una fuerte presencia de partículas en suspensión, las cuales son visualizadas por las turbiedades medias y elevadas. Por tanto, para atender a esta problemática se evaluaron alternativas de bajo costo en extracción del coagulante de la semilla de *M. Oleífera* para el tratamiento de aguas con turbidez en un ámbito de 50 - 100 NTU, donde se realizaron ensayos con tratamientos para evaluar la adición de cloruro de sodio (NaCl) y la cáscara de la semilla, en una dosis de 25 mL/L que resulta en una eficiencia de 69 % [25].

En el año 2004 se llevó a cabo un estudio por el investigador Kebreab A. Ghebremichael *et al* en el estado Eritrea – África Oriental a partir de materiales naturales con la semilla de *M. Oleífera* y arena pómez, las cuales fueron aplicadas en el tratamiento del agua potable debido a los problemas identificados en la planta de tratamiento de agua de Stretta Vaudetto en Eritrea. En este estudio se realizó el método de ensayo de coagulación de pequeño volumen que simplifica y agiliza los experimentos de coagulación. Se logró observar que la proteína coagulante *M. Oleífera* poseía considerables propiedades de coagulación y acondicionamiento de

lodos como el aluminio, también mostró efectos antimicrobianos contra las bacterias, algunos de los cuales son resistentes a los antibióticos. Las ventajas de la coagulación y propiedades antimicrobianas de la *M. Oleífera* lo hacen importante en el tratamiento del agua y sus efectos sobre la suspensión de arcilla y los microorganismos, sugieren que la semilla de *M. Oleífera* puede utilizarse para la coagulación y desinfección simultáneas en sistemas de tratamiento de agua[17].

Estudios realizados en el país de Malawi – África , se demostró la viabilidad respecto al uso de las semillas de *M. Oleífera* como coagulante, aplicándolo en procesos dentro de una planta piloto puesto en servicio en 1992 para depuración de aguas en el río Thyolo, el cual presentaba condiciones iniciales de turbidez que superaban los 400 NTU en la estación lluviosa del país, teniendo en cuenta que en la guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el valor máximo permisible de la turbidez para el agua potable en países en vías de desarrollo debe ser de 5 NTU. De esta manera se llevaron a cabo los respectivos procesos dentro de la planta logrando una eliminación de sólidos superiores al 90 %. Para esto la dosis del coagulante a base de las semillas de *M. Oleífera* utilizado en la planta piloto se encontró en un rango de entre 50 ppm y 250 ppm, dependiendo de la turbidez inicial que el agua poseía[26].

2.2 ÁREA DE ESTUDIO

2.2.1 Localización fuente hídrica río Molino

Este trabajo se llevó a cabo en el río Molino sector Camilo Torres, ubicado al sur occidente de Colombia, en el centro del departamento del Cauca y al oriente del municipio de Popayán como se demuestra en la **Figura 1**. El nacimiento de este río se encuentra en la vereda de Santa Elena, esta subcuenca abarca 8 corregimientos, 10 veredas y 4 comunas urbanas, con un estimado de 53.329 habitantes en 2016, según la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) [27].

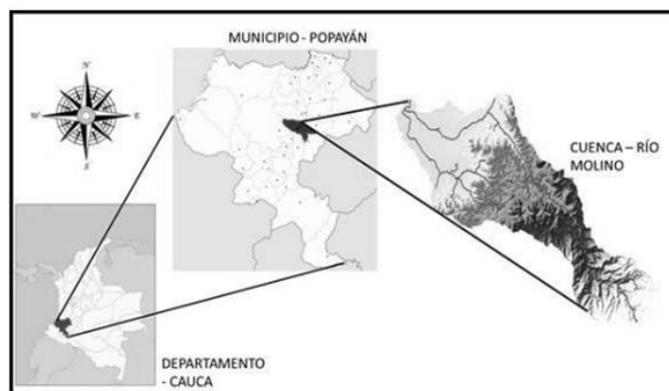


Figura 1. Localización área de estudio

Fuente: [28]

En el área de estudio se encuentran efectos ambientales negativos que se pueden ver reflejados al desembocar en la cuenca del río Cauca, debido a que este río se ha convertido en el vertedero de basuras y aguas residuales de toda la ciudad, afectando en un grado notable su cuenca y especies nativas que se ubican en el afluente [27].

2.2.2 Micro localización punto de muestreo

El Barrio Camilo Torres está ubicado al sur occidente de Popayán, Comuna 8 y cuenta con aproximadamente cinco mil habitantes. Sus límites son: al norte, barrio Junín; al sur, barrios Pandiguando y La Isla; al oriente, Batallón José Hilario López y al occidente, calle 5ª y barrio Santa Elena. La **Figura 2** exhibe la micro localización del área de estudio.

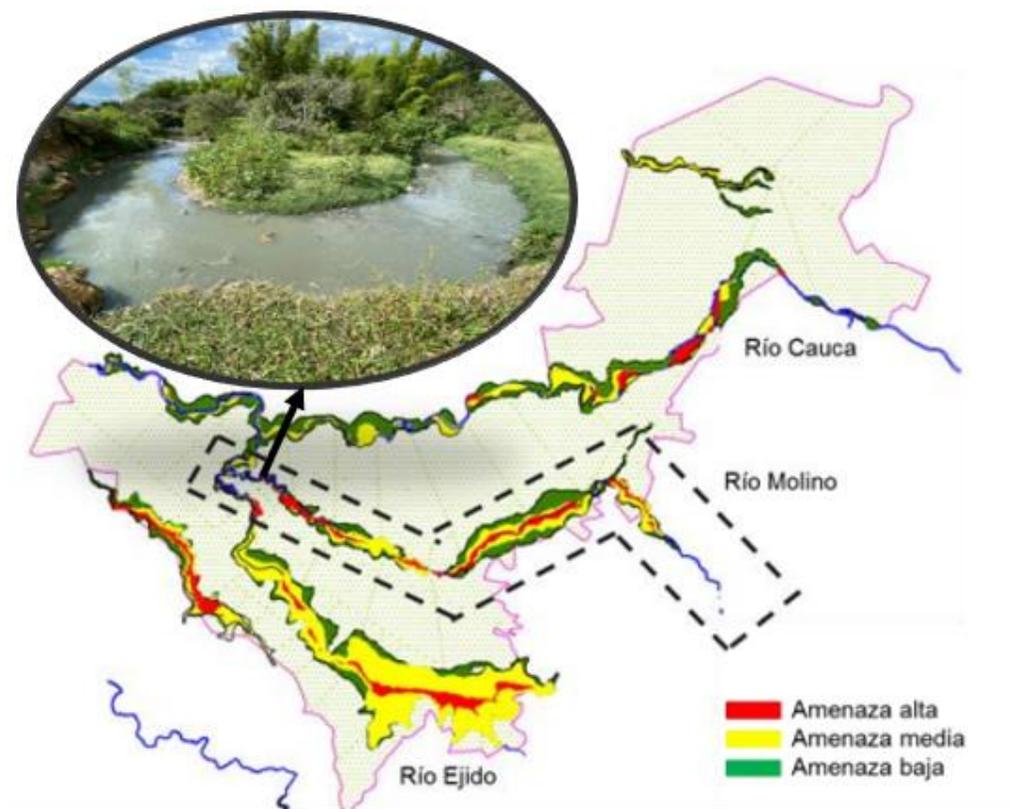


Figura 2. Micro localización área de estudio

Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Aspecto físico biótico subcuenca río Molino

Relieve: El tipo de relieve que predomina es de tipo plano, con ondulaciones no muy elevadas, que alcanzan alturas máximas de 3.000 msnm, dicha forma de relieve responde básicamente a que Popayán se encuentra ubicado sobre un valle,

en la altiplanicie de una meseta encajonada por las cadenas montañosas que a las cordilleras Occidental y Central respecta [29].

El Plan de Ordenación y Manejo Subcuenca río Molino - Quebrada Pubús (2006) menciona, que la forma de la subcuenca río Molino, rige el comportamiento del río por cuanto tiene dos características: esto se refiere a una subcuenca alta típica de montaña, con vertientes cortas y altas pendientes que influyen un escurrimiento rápido que forma crecientes súbitos con altos picos en los caudales. Los caudales medios y mínimos son regulados por la composición de los suelos. De otro lado la subcuenca en la parte baja, tienen una gran extensión en la formación geomorfología del Valle de Pubenza, lugar donde el río Molino deja su comportamiento torrencial y pasa a describirse como un río típico de llanura aluvial, es decir, de baja pendiente y formación de meandros entre otras características [29].

Clima: Esta zona cuenta con un clima templado, los veranos son cortos y caliente; los inviernos son cortos, cómodos y mojados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 14 °C a 25 °C y rara vez baja a menos de 13 °C o sube a más de 27 °C [30].

2.2.4 Aspectos socioeconómicos subcuenca río Molino

Según datos obtenidos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P (2014) la subcuenca río Molino cuenta con 8 corregimientos, 10 veredas y 4 comunas urbanas, en las cuales existen diferentes grupos poblacionales asentados: campesinos e indígenas en la zona rural y comunidades urbanas, estimados en 53.329 habitantes, quienes dependiendo de su sentido de pertenencia y necesidades satisfechas degradan, en mayor o menor medida, los recursos de los que dependen [29].

Descargue: Las viviendas construidas en la ribera del río, no están utilizando la infraestructura sanitaria de la ciudad, ya que están vertiendo las aguas negras a la fuente hídrica, provocando una contaminación masiva de la misma. La construcción de equipamientos sobre las zonas de protección del río Molino como La Policía Nacional, la galería del Barrio Bolívar, La DIAN agrede directamente el recurso ambiental [29].

Caudal (Q): Según la campaña de monitoreo de calidad de agua realizada por la CRC en el año 2017, el caudal (Q) del río Molino antes del río. Ejido es de 2,06 m³/s con turbidez de 11,9 NTU

2.2.5 Aspectos ambientales subcuenca río Molino

La zona rural se caracteriza por ser ganadera y agrícola, utilizando técnicas tradicionales sin tener en cuenta la vocación de los suelos, predominio del

monocultivo con incorporación de fertilizantes químicos en exceso, deforestación para obtener leña de combustible y viviendas sin saneamiento básico [29].

A causa de la deforestación los suelos se han deteriorado, a tal punto de presentarse deslizamientos constantes. Popayán en época de invierno en los meses de febrero a abril y de octubre a diciembre o en periodos de lluvias anormales como durante los fenómenos climatológico de La Niña o El Niño IDEAM (2013), por las características geográficas, topográficas urbanísticas y de cobertura vegetal en las inmediaciones del río Molino, se produce abundancia de agua desbordándose y ocasionando inundaciones a los barrios [29].

El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) en su componente ambiental (2002), concluye que el río Molino revela un déficit marcado de saturación de oxígeno y los valores de gas carbónico encontrados indican procesos de respiración y oxidación de materia orgánica; además se observaron actividades de extracción de materiales da arrastre, lo que ocasiona un aumento en la concentración de sólidos suspendidos totales y la tasa de sedimentación [29].

2.3 BASES TEÓRICAS

2.3.1 Contaminación de aguas superficiales

La contaminación del agua superficial a menudo es causada por nutrientes, patógenos, plásticos y productos químicos como antibióticos, metales pesados y pesticidas, entre otros. Estos contaminantes tienen diferentes efectos ambientales. El exceso de nutrientes, por ejemplo, puede provocar la proliferación de algas nocivas e hipoxia tanto en los ríos como en los mares costeros. Los patógenos en los ríos representan una amenaza para la salud humana. La contaminación química puede tener efectos tóxicos. Las aguas superficiales a menudo sufren el impacto combinado de múltiples contaminantes[31].

2.3.2 Contaminación por vertimientos sobre aguas superficiales

Hay muchos contaminantes artificiales que pueden contaminar las fuentes de agua. Con respecto a su origen se reconocen dos categorías de sus fuentes, puntuales y difusas. Ejemplos de fuentes puntuales importantes son las instalaciones industriales, las ciudades, las instalaciones agrícolas, el almacenamiento de estiércol y los vertederos. Pueden identificarse y controlarse más fácilmente que las fuentes difusas (no puntuales), como la lixiviación de nitratos y pesticidas en las aguas superficiales y subterráneas como resultado de la lluvia, la infiltración del suelo y la escorrentía superficial de las tierras agrícolas. Estas fuentes provocan variaciones considerables en la carga de contaminantes del agua a lo largo del tiempo [32].

2.3.3 Clarificación de aguas superficiales

La clarificación es un paso esencial en un proceso de tratamiento de agua o aguas residuales para eliminar los sólidos suspendidos mediante sedimentación por gravedad, proporcionando un efluente líquido clarificado. Una función secundaria de un clarificador es la eliminación de la materia flotante (escoria) que se ha acumulado en la superficie del agua. La remoción se logra desnatando a un dispositivo de recolección de residuos, como un canal de residuos o un tubo de residuos [33].

Los clarificadores pueden ser circulares o rectangulares, según la preferencia tecnológica y se utilizan ampliamente en aplicaciones primarias, secundarias y terciarias para el tratamiento de agua y aguas residuales donde se desea la separación de sólidos de líquidos.

2.3.4 Proceso de coagulación

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de coagulantes y la aplicación de la energía al mezclar. Los coagulantes anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos [34].

La coagulación es considerada el tratamiento de agua más eficaz y por ende el más usado a nivel mundial, sin embargo, este también representa un valor monetario elevado cuando su ejecución no es la correcta. La dosis del coagulante condiciona el funcionamiento, es imposible obtener una adecuada clarificación, si el volumen y concentración del coagulante están mal ajustadas [35].

2.3.5 Proceso de floculación

Es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas en el proceso de coagulación chocan unas con otras para formar flóculos mayores que permiten una adecuada sedimentación. Este proceso es favorecido por una mezcla a bajas revoluciones; esto debido a que una mezcla intensa los rompería y difícilmente se vuelven a formar en su tamaño. La floculación puede mejorarse si se adiciona un reactivo floculante. Según su naturaleza, los floculantes pueden ser inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos (electrolitos) son sales solubles en agua siendo las más utilizadas las sales de hierro, aluminio y sílice. Los floculantes orgánicos pueden ser naturales (polisacáridos) y sintéticos (polímeros), estos son muy utilizados en la industria química moderna; son eficaces a bajas concentraciones [36].

A continuación, en la **Figura 3** se presenta de manera gráfica el proceso anteriormente descrito. El beaker A exhibe una muestra de agua con una alta turbidez debido a partículas de suciedad no sedimentables; en el beaker B se observa cómo mediante la adición de partículas coagulantes se forman los

primeros flóculos o aglomeraciones de partículas, para finalmente en la figura C presentar una comparación de la muestra inicial y la muestra después del proceso de coagulación y sedimentación.

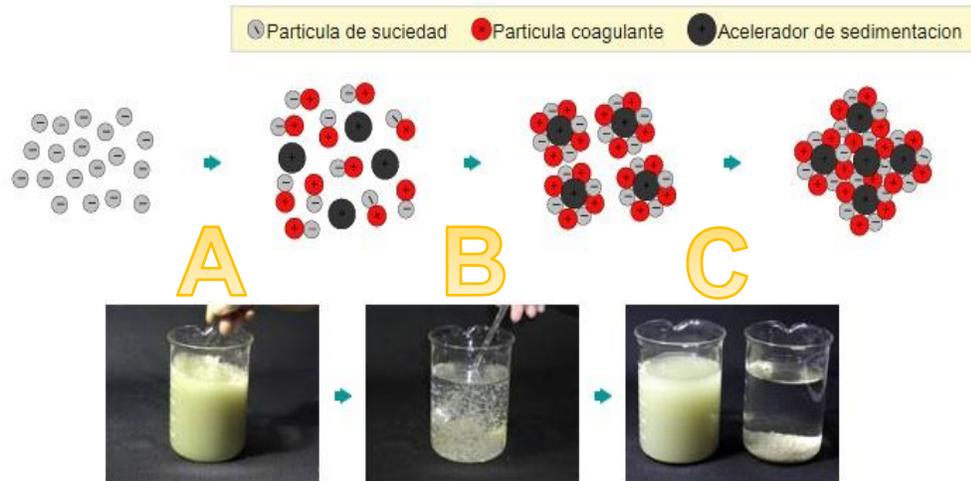


Figura 3. Proceso de coagulación y floculación

Fuente: [15]

2.3.6 Coagulantes naturales

Los coagulantes de base natural actúan de forma similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación. Por su origen natural hace su manipulación más segura para las personas y la biodegradabilidad de los lodos producidos, por no aportar metales. Estos forman flóculos más consistentes que los coagulantes tradicionales y permiten no dosificar neutralizantes [37]. Son una fuente alternativa de gran potencial, por lo general su toxicidad es mínima o nula, en muchos de los casos son productos alimenticios con alto contenido en carbohidratos y proteínas. Entre el grupo de sustancias conocidas que poseen propiedades aglomerantes se encuentran algunos compuestos orgánicos de origen vegetal, los cuales se pueden obtener de tallo o de semillas de una enorme variedad de plantas como la *M. Oleífera*, la tuna, *Cassia Fistula*, el maíz, *Guásima Ulmifolia*, entre otros diversos tipos [38].

2.3.7 *M. Oleífera*

Es un árbol perteneciente a la familia Moringaceae, es nativa de Himalaya y en la actualidad se cultiva en todas las regiones tropicales, subtropicales y semiáridas

del mundo [39]. Además, es un árbol de crecimiento rápido, en el primer año se puede desarrollar varios metros, sin embargo, en su madurez no supera los 10 metros. El fruto es una vaina, parecida a una legumbre, pero de sección triangular, de unos 30-45 cm de longitud [40]. En la **Figura 4** se identifica la planta de *M. Oleífera* con sus diversos caracteres.

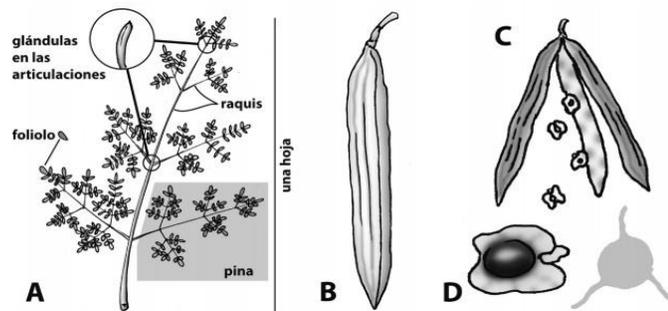


Figura 4. Especie *M. Oleífera*

Fuente: [41]

- A.** Hojas grandes, pinnadas, que pueden alcanzar unos 60 cm de longitud.
- B.** Fruto, una cápsula ligera, leñosa y seca, que en madurez mide de 10 a 30 cm.
- C.** El fruto se abre en 3 partes o valvas.
- D.** Semillas de 1,5 – 3,0 cm de diámetro con centro de color café oscuro y 3 alas de color beige [41].

Cabe resaltar que el componente activo de *M. Oleífera* que causa la coagulación del agua cruda turbia es proteína catiónica dimérica (MOC-SC-PC3) que actúa en el proceso como un polielectrolito catiónico natural, la cual se encuentra presente únicamente en la semilla de esta planta y la capacidad de coagulación de las proteínas se ve incrementada cuando se emplean sales inorgánicas en su extracto [42].

La **Tabla 1** describe la caracterización química del contenido de la semilla de *M. Oleífera*.

Tabla 1. Análisis químico de la semilla *M. Oleífera*

CONTENIDO	CANTIDAD
Agua	86,9 g
Proteínas	2,5 g
Grasa	0,1 g
Carbohidratos	8,5 g
Fibra	4,8 g
Calcio	0,30 g
Fósforo	0,110 g

Fuente: Elaboración propia

La torta después de la extracción de grasas y aceites contiene 58,9 % de proteína. Su implementación asume diversas utilidades siendo esta una de las plantas más versátiles en proyectos para la industria comestible, la depuración de aguas, creación de biodiesel y forraje para animales [43].

2.3.8 Coagulantes químicos o inorgánicos

Un coagulante químico, como sales de hierro, sales de aluminio o polímeros, se agregan al agua fuente para volver fácil la adherencia entre las partículas. Los coagulantes funcionan creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí.

Una vez agregados al agua, los coagulantes inorgánicos forman precipitados de aluminio o hierro. Estos absorben las impurezas del agua a medida que caen y sirven para limpiar el agua. Este proceso se conoce como mecanismo 'sweep-floc'. Sin embargo, una desventaja del precipitado de hidróxido metálico es que se agrega al volumen total de lodo que debe tratarse y eliminarse [44].

2.3.9 Sulfato de aluminio

Uno de los productos químicos de tratamiento de agua más utilizados en el mundo. El alumbre se fabrica en forma líquida, a partir del cual se deshidrata la forma cristalina. El sulfato de aluminio es el coagulante de aluminio más utilizado. Está disponible en varias formas sólidas, como bloques, croquetas o molidas, y también está disponible como solución.

En la práctica de las obras hidráulicas, el sulfato de aluminio se denomina frecuentemente, pero incorrectamente, "alumbre". Cuando se dosifica en agua, la formación de un flóculo de hidróxido de aluminio es el resultado de la reacción entre el coagulante ácido y la alcalinidad natural del agua, que generalmente consiste en bicarbonato de calcio [44].

2.3.10 Prueba de jarras

La prueba de jarras es la técnica para determinar las dosis óptimas de sustancias y otros parámetros. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a escala de laboratorio. En estos procesos interfieren diversos factores químicos e hidráulicos como la concentración del coagulante, grados de agitación, velocidad y tiempo de sedimentación y de cada uno de los gradientes de agitación. Debido a que la prueba de jarras es sólo una simulación de procesos, es necesario mantener las condiciones operacionales que existen en el proceso industrial como son: gradientes hidráulicos y tiempos en la mezcla lenta y rápida, punto de aplicación

de los coagulantes, el orden y el tiempo de dosificación [34]. A continuación, en la **Figura 5** se encuentra el floculador de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, el cual fue empleado para todas las pruebas de la presente investigación.



Figura 5. Floculador de cuatro aspas

Fuente: Elaboración propia

2.3.11 Parámetros fisicoquímicos relevantes para la coagulación

La **turbidez** es la medida de la claridad relativa de un líquido. Es una característica óptica del agua y es una medida de la cantidad de luz que se dispersa por el material en el agua cuando se hace brillar una luz a través de la muestra de agua. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersa, mayor será la turbidez. El material que hace que el agua sea turbia incluye arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica muy pequeña, algas, compuestos orgánicos coloreados disueltos y plancton y otros organismos microscópicos [45].

El **pH** óptimo para la coagulación de las aguas superficiales de las tierras bajas suele estar en el rango de 6,5 a 7,2; mientras que para las aguas de las tierras altas con más colores es necesario un rango de pH más bajo, típicamente de 5 a 6. Las aguas de las tierras bajas generalmente contienen concentraciones más altas de sales disueltas, incluida la alcalinidad, y por lo tanto pueden requerir la adición de un ácido en exceso del proporcionado por el coagulante. En estas circunstancias, suele ser más económico añadir ácido sulfúrico al 0.02 N en lugar de un exceso de sulfato de aluminio para obtener el valor de pH de coagulación óptimo. El uso de un exceso de coagulante para reducir el pH daría como resultado una mayor producción de lodo [44].

2.4 BASES LEGALES

En la **Tabla 2**, se encuentra respaldada por las Normas Ambientales Colombianas (2016), las cuales se encargan de establecer la obligación del Estado y de las personas con respecto a la conservación de las riquezas naturales y culturales de la Nación. Consagra como servicio la atención de la salud y el saneamiento ambiental y ordena al Estado la organización, dirección y reglamentación de estos, donde específicamente en este trabajo soportan lo que se debe realizar cumpliendo con los estándares que prevengan el deterioro al medio ambiente y la salud humana.

Tabla 2. Normas Ambientales Colombianas y su respectiva descripción

NORMA	DESCRIPCIÓN DE LA NORMA
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y Protección al Medio Ambiente
Ley 99 de 1993	Por el cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA – y se dictan otras disposiciones
Resolución 631-2015	Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado y se dictan otras disposiciones
Decreto 1541 de 1978	Concesión de aguas de uso público superficiales y subterráneas. Modificado por Decreto 2858 de 1981
Decreto 1594 de 1984	Vertimientos/Usos del agua. Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21
Ley 9 de 1979	Código Sanitario Nacional, por la cual se dictan Medidas Sanitarias
Resolución 2145 2005	Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
Decreto 1323 2007	Se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)
Resolución 1096 17 Nov 2000	Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS
Decreto 3930 2010	Permitirá el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por actividades productivas

Fuente: [46]

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

A continuación, en la **Figura 6** se encuentra representado el esquema metodológico utilizado para dar respuesta a los objetivos planteados en la presente investigación.

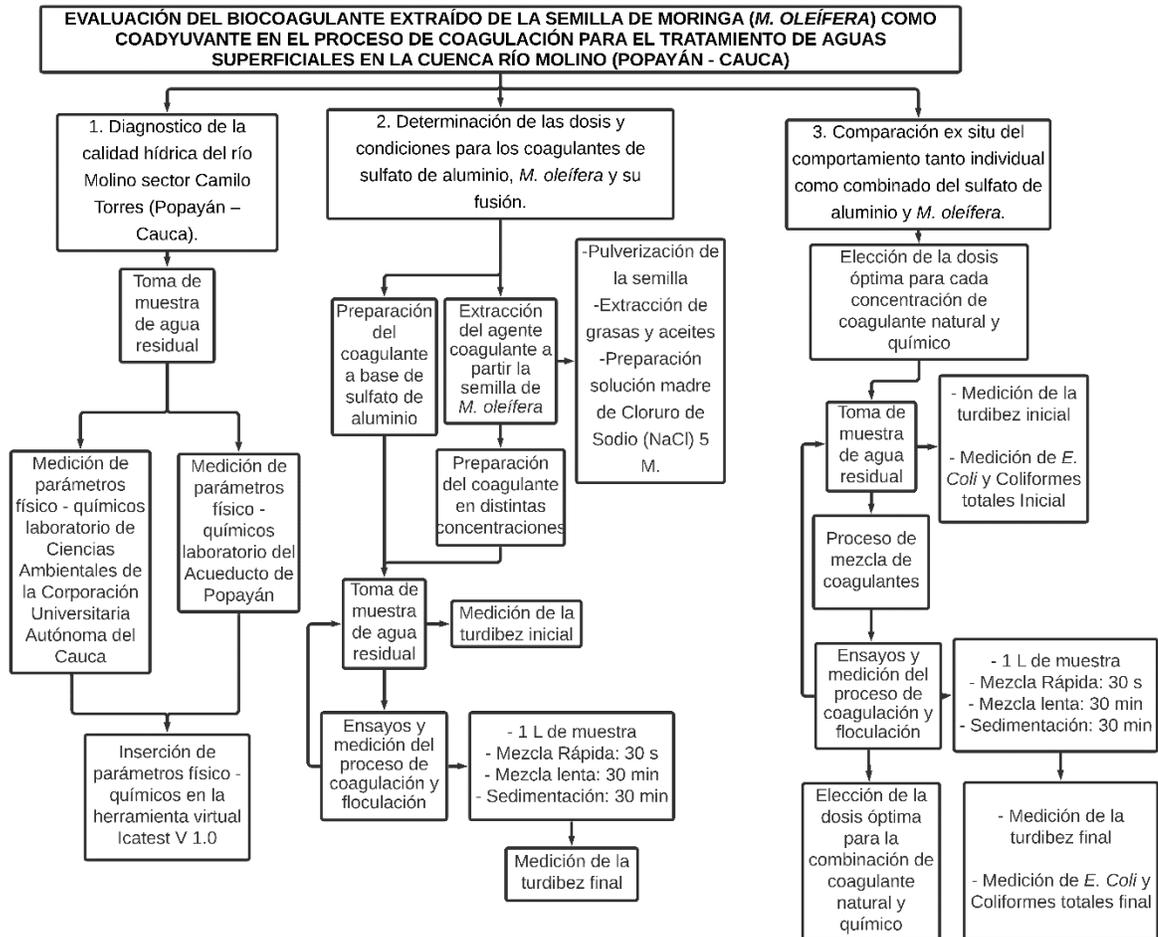


Figura 6. Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

3.1 DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD HÍDRICA

3.1.1 Toma de muestra

La metodología utilizada para diagnosticar la calidad hídrica se basa en la aplicación de “Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales” [47]. Para la toma, preservación y transporte de muestras fue usado el manual de instrucciones presente en los distintos protocolos proporcionados por el IDEAM [48] y el Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico [49].

Este monitoreo se realizó en una sola estación, específicamente en las coordenadas 2°27'18" N, 76°37'36" W, respectivamente. La toma de muestra estuvo compuesta por 4 tomas de 10 L cada 10 minutos. Para la recolección de esta se usaron 2 garrafas de 20 L. Cabe resaltar que se tomó como guía metodológica el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM en el cual se describen los requerimientos, instrucciones y cuidados que se deben tener en cuenta para la toma de muestras de aguas residuales industriales (ARI) y domésticas (ARD) para análisis en el laboratorio [48]. En la **Figura 7** se presenta el lugar exacto donde se efectuó la toma de muestras de agua residual.



Figura 7. Punto de recolección de vertimientos de agua residual río Molino sector Camilo Torres (Popayán – Cauca)

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Medición de parámetros físico - químicos

Posteriormente las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca en el cual se determinaron los parámetros como la alcalinidad, turbidez, nitritos, nitratos, conductividad, pH, oxígeno disuelto (OD), los cuales son parámetros de alta relevancia.

Para la medición de alcalinidad se utilizó el método volumétrico, usando el indicador naranja de metilo y titulando hasta cambio de color (amarillo a rojo) con ácido sulfúrico 0,02 N [50]. Los parámetros como conductividad, pH y oxígeno disuelto (OD) fueron obtenidos mediante la sonda multiparamétrica de marca Hach y referencia HQ40d. Estos se midieron minutos después de tomar la muestra por lo que no fue necesario aplicar conservantes a esta. Para la turbidez se tomaron

muestras de agua antes y después del tratamiento con coagulantes por medio del turbímetro. La determinación de nitritos y nitratos se realizó por medio del Fotómetro compacto de marca y referencia Macherey – Nagel PF-12 Plus, el cual cuenta con el kit (visicolor-ECO) de reactivos necesarios para tomar un único resultado.

Cabe resaltar que el oxígeno disuelto es necesario expresarlo en término de porcentaje de saturación para lo cual al valor obtenido se le realiza la corrección mediante la **Figura 8**.

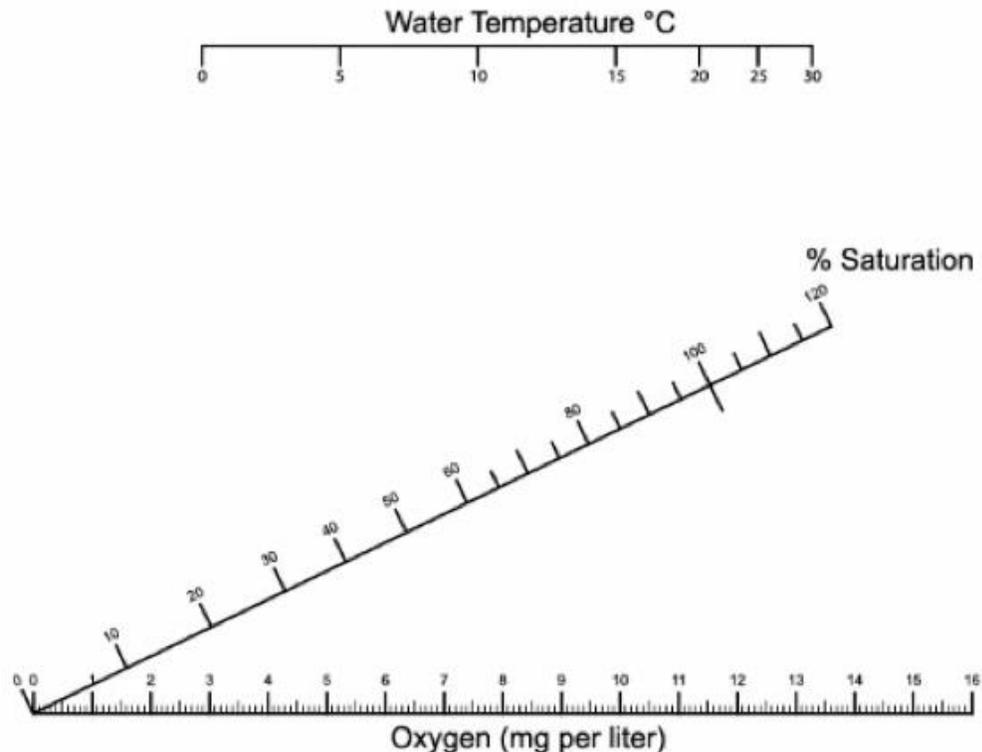


Figura 8. Porcentaje de saturación oxígeno disuelto

Fuente:[51]

Debido a la falta de reactivos y/o insumos, la medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), coliformes totales y *E. Coli* se realizaron por parte del Laboratorio del Acueducto y Alcantarillado de Popayán. Los resultados de estos fueron analizados por medio de gráficos estadísticos brindados por la herramienta ICATEST V 1.0, lo que permitió la redacción de un documento técnico el cual contiene la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y el índice de contaminación de agua en la que se encuentra el afluente [52]. La **Figura 9** presenta la forma en la que el laboratorio recibe las muestras de agua para su posterior análisis. En el caso de la muestra destinada a obtener la DBO_5 , esta fue recolectada en un recipiente de vidrio color ámbar debido a que este parámetro es susceptible a variaciones por contacto a la luz solar; por otro lado, la muestra destinada para el

análisis de *E. Coli* y coliformes totales tiene en su tapa un sello de seguridad con el objetivo de evitar que agentes externos ingresen a la muestra.



Figura 9. Muestra DBO₅ (A) y muestra *E. Coli* y coliformes totales (B)

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Determinación índice de contaminación del agua

Una vez tomados y analizados todos los parámetros físico – químicos se precedió al uso del software ICATEST v1.0. Esta es una herramienta computacional que facilita el cálculo de gran variedad y cantidad de índices de calidad del agua e índices de contaminación los cuales se presentan discriminados por país y/o autor. De igual manera ICATEST v1.0 permite generar y guardar tanto reportes como historiales, además de realizar estudios comparativos de calidad del agua. En la **Figura 10** se puede observar lo anteriormente descrito, la interfaz principal del software permite la selección de índice adecuado para la región en la que se desea trabajar.



Figura 10. Ventana principal software ICATEST v1.0

Fuente: Elaboración propia

Para este caso en específico se decidió dar uso al ICOMO o Índice de Contaminación por Materia Orgánica el cual está conformado por demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno.

3.2 DETERMINACIÓN DE LAS DOSIS Y CONDICIONES PARA LOS COAGULANTES

3.2.1 Extracción del agente coagulante a partir la semilla de *M. Oleífera*

Antes de dar inicio al proceso cabe aclarar que la extracción y preparación de los coagulantes a partir de la semilla de *M. Oleífera* por disponibilidad académica se realizó dos veces, con una diferencia de tiempo de cuatro meses entre ellas, lo que permitió comparar coagulante antiguo vs. coagulante fresco en iguales concentraciones bajo las mismas condiciones de tratamiento.

La semilla de *M. Oleífera* para la primera extracción fue obtenida en el departamento de Boyacá y presentó características y condiciones óptimas. Se trataba de una semilla fresca y con un tamaño abundante. Para la segunda extracción (cuatro meses después), no fue posible llegar a un acuerdo con este mismo distribuidor, por lo tanto, la compra de esta semilla se realizó en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. Las características de estas eran totalmente distintas a la primera, se trataba de una semilla mucho más seca y de menor tamaño, pero fue posible aprovechar la suficiente cantidad para obtener las mismas concentraciones de coagulante, logrando así culminar el proceso sin fallas.

Ahora bien, se dió inicio a la extracción del agente coagulante a partir de la semilla de *M. Oleífera* para lo cual se propuso llevar a cabo la metodología planteada por Perdomo, *et al.* en su estudio “Determinación de la eficiencia de coagulantes de origen natural en el tratamiento de las aguas residuales de una unidad de producción minera en la vereda el Tamboral en el municipio de Suárez – Cauca [53], la cual está dividida en dos fases:

- ✓ *Pulverización de la semilla:* Mediante mortero cerámico y molino eléctrico.
- ✓ *Extracción de grasas y aceites:* Se planteó dos métodos por prensado y por disolución en alcohol etílico.

Una vez retirada la cascara de la semilla de *M. Oleífera*, se procedió a realizar el proceso de pulverización por medio de un mortero y un molino eléctrico, lo cual hizo aún más útil dicho procedimiento. Ya obtenida la semilla en polvo se pasó por el proceso de extracción de grasas y aceites los cuales son necesarios retirar debido a que no presentan ninguna propiedad importante para este proceso y por el contrario dejan un residuo lipídico en el agua. Dicho proceso se realizó con tela de muselina y con papel filtrante. Primeramente, 50 g de polvo de mezclaron con 200 mL de alcohol etílico (C₂H₆O) al 95 % para lograr la extracción de grasas y aceites, se agitó por 2 minutos con un agitador magnético a 1300 revoluciones por minuto

(RPM) y finalmente se pasó por prensado a través de la tela muselina, repitiendo este proceso por 5 veces todas a temperatura ambiente. La **Figura 11** representa el esquema metodológico seguido para la extracción del agente coagulante natural *M. Oleífera*.



Figura 11. Diagrama extracción del agente coagulante *M. Oleífera*

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Preparación del coagulante natural

Del proceso de la extracción se obtuvo dos resultados, el polvo de semilla prensado en la tela de muselina el cual se almacenó en bolsas selladas herméticamente y se secó a temperatura ambiente durante 24 horas.

Por otro lado, se observó que en el alcohol etílico residuo del proceso de extracción de grasas y aceites se formaba un precipitado de partículas más pequeñas de *M. Oleífera* que lograban pasar a través de la muselina, de modo que fueron filtradas por medio del papel filtro; sin embargo, el resultado aún era bastante húmedo por lo que se propuso con el fin de aprovecharlo llevarlo a un proceso de secado al horno por un periodo de 30 minutos a una temperatura de 150 °C y así obtener una pasta seca la cual se pulverizó nuevamente en el mortero. Por tal motivo a este resultado se la conoció con el nombre de Horno nuevo.

Una vez extraídas las grasas y los aceites se continuaron a preparar la solución estándar de *M. Oleífera*. Para ello se disolvió 292,5 g de cloruro de sodio (NaCl) en 1 L de agua destilada y se agitó por 20 minutos a una velocidad de 200 RPM, obteniendo una solución estándar 5,0 M de NaCl.

Esta solución se plantea debido a que la teoría propone resultados óptimos en la extracción con solución salina debido a que se logra aumentar la fuerza iónica, lo cual causa un aumento en la solubilidad de los componentes activos, mejorando su capacidad neutralizadora de cargas superficiales en las partículas en disolución [54].

Finalizado este proceso se continuó con la preparación de diferentes concentraciones del coagulante aplicando la **ecuación 1**, donde es necesario conocer las cantidades en gramos de *M. Oleífera* para 1 L de solución salina como se muestra en la **Tabla 3**. Una vez obtenido estos valores se procedió a realizar dicha mezcla y agitar a 60 RPM por un tiempo de 10 min; posteriormente se filtró y se retiró el producto de la semilla, logrando así obtener el coagulante en estado líquido. El producto final se almacenó en recipientes plásticos de 1 L a una temperatura de 3 °C debidamente rotulados con sus respectivas concentraciones.

$$\frac{\text{gramos de } M.Oleífera}{\text{Litros de NaCl } 5 M} = \frac{g}{L} \text{ Concentración} \quad \text{Ecuación (1)}$$

A continuación, la **Tabla 3** indica las concentraciones de los coagulantes naturales resultantes del proceso anteriormente descrito junto a sus abreviaturas. Estas concentraciones se prepararon teniendo en cuenta estudios preliminares que demuestran que el coagulante de *M. Oleífera* a altas concentraciones tiende a perder efectividad [55];

Adicionalmente se buscó optimizar las cantidades de semilla resultante con el fin de obtener coagulantes que fueran fácilmente desarrollables y viables económicamente.

Tabla 3. Coagulantes y concentraciones del coagulante *M. Oleífera*

COAGULANTE	ABREVIATURA	CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE (g/L)
Semilla <i>M. Oleífera</i> prensada noviembre 2020	<i>M. Oleífera A</i>	10, 20 y 30
Semilla <i>M. Oleífera</i> prensada marzo 2021	<i>M. Oleífera B</i>	10, 20 y 30
Semilla <i>M. Oleífera</i> filtrada y secada al horno marzo 2021	<i>M. Oleífera al horno B</i>	10 y 20

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los coagulantes se propuso realizar una prueba de solubilidad de la semilla *M. Oleífera* con el fin de determinar si el uso de estos aporta residuos en soluciones acuosas o si presentan reacción química en presencia de ácidos. Para esto se utilizaron solventes como agua y H₂SO₄ al 5 % y la prueba consistió en colocar con una micro espátula aproximadamente 0,1 g de la muestra problema en un tubo de ensayo y agregar en porciones aproximadamente 3,0 mL de agua destilada y 3,0 mL de H₂SO₄ al 5 % agitando constantemente, si el compuesto es soluble debe desaparecer gradualmente [56].

3.2.3 Preparación del coagulante químico

El sulfato de aluminio, Al₂(SO₄)₃ tipo A con un 17 % de pureza, fue adquirido en estado sólido en la empresa Quimpo de la ciudad de Popayán. Se debe tener en cuenta que la dosis de Al₂(SO₄)₃ usada para aguas superficiales varía normalmente de 5 a 50 mg/L [57], para este caso en particular se utilizaron 2,5 mg de sulfato de aluminio Al₂(SO₄)₃ con 0,5 L de agua destilada para obtener una concentración de 5 mg/L la cual es dada por la **ecuación (2)**, de esta manera se procedió a preparar la solución por medio de un agitador magnético a 200 revoluciones por minuto (RPM) por un tiempo de 10 min.

$$\frac{\text{gramos de Sulfato de aluminio}}{\text{Litros de H}_2\text{O}} = \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{Concentración} \quad \text{Ecuación (2)}$$

3.2.4 Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación

Con el fin de dar respuesta al objetivo se realizó una serie de ensayos de coagulación y floculación mediante la prueba de jarras para el cual se adoptó la metodología propuesta en la Norma Técnica Colombiana 3903 de 1996 [58]; estos

ensayos permitieron realizar una simulación a escala de laboratorio del comportamiento de los coagulantes en el agua residual de la subcuenca del río Molino. Esta actividad se ejecutó en su totalidad en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

La concentración, tiempo de mezcla rápida y lenta, velocidades y sedimentación se estandarizaron. Por lo tanto, solo se varió los volúmenes de coagulante en cada jarra dando como resultado 8 pruebas de jarras por cada coagulante solo con variación de volumen desde 1 hasta 8 mL; esto se realizó tanto para el sulfato de aluminio como para los distintos porcentajes del coagulante natural. Al inicio de cada montaje se tomaron los valores iniciales de turbidez (NTU). Para este proceso se usó 1 L de muestra de agua residual para cada jarra a la cual se le aplicó inicialmente los coagulantes de sulfato de aluminio y *M. Oleífera* por separado. Una vez tenido estos resultados se procedió a realizar 2 repeticiones más para las mejores dosis de cada muestra de los coagulantes, donde se demostró que las pruebas eran replicables.

Se realizaron diversas pruebas de jarras, donde el objetivo final era establecer la dosis óptima de cada coagulante. Para esto se establecieron los siguientes valores iniciales de cada prueba como se enseña en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Parámetros estandarizados de la prueba de jarras

Coagulantes	Concentración	Tiempo de mezcla rápida a 250 RPM	Tiempo de mezcla lenta a 45 RPM	Sedimentación
<i>Sulfato de Aluminio</i>	5 (mg/L)	30 s	30 min	30 min
<i>M. Oleífera A</i>	10,20 y 30 (g/L)	30 s	30 min	30 min
<i>M. Oleífera B</i>	10,20 y 30 (g/L)	30 s	30 min	30 min
<i>M. Oleífera al horno B</i>	10 y 20 (g/L)	30 s	30 min	30 min

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con este proceso midió el valor de la turbidez con el tubímetro (NTU) antes y después del tratamiento [59]. Una vez obtenidos los resultados se sometieron a un análisis inferencial mediante la herramienta ofimática Microsoft Excel con el fin de determinar cuáles son las condiciones y dosis óptimas de la semilla *M. Oleífera*, sulfato de aluminio y la mezcla de estos dos anteriores como sustancia coagulante en el proceso de coagulación.

3.3 COMPARACIÓN EX SITU DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES

3.3.1 Elección y mezcla de la dosis óptima para cada concentración de coagulante

La elección de la dosis óptima en cada prueba se realizó según la mejor relación entre Reducción de turbidez / Coagulante aplicado, de esta manera es posible elegir la mayor reducción sin exceso de coagulante; una vez seleccionadas las dosis óptimas por separado tanto del coagulante del sulfato de aluminio como de *M. Oleífera*, se procedió a realizar la combinación de estos dos coagulantes teniendo en cuenta la siguiente metodología.

Sabiendo que ninguna dosis de *M. Oleífera* alcanza por sí sola el valor de turbidez obtenido con el sulfato de aluminio, se realizó el siguiente procedimiento: Se tomó la mejor dosis de cada concentración de *M. Oleífera* y se empezó a agregar cantidades graduales de sulfato de aluminio sin que esta cantidad sobrepase la cantidad que normalmente se usaría para esta agua, obteniendo así las siguientes adiciones 0,5 mL – 1,0 mL – 1,5 mL – 2,0 mL del coagulante químico.

3.3.2 Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación

Para este ciclo de pruebas se aplicó el proceso metodológico de la actividad **3.2.3** del presente documento correspondiente a la prueba de jarras, aplicando las 4 mezclas de coagulantes propuestas.

Una vez finalizadas estas pruebas se propuso saber qué pasaría si se aplicaran estas dosis óptimas a un agua con mayor turbidez, esto con el uso de muestras en época de alta pluviosidad; de esta forma fue posible evaluar de qué manera está influyendo la aplicación de estos coagulantes con las características y por consiguiente el índice de calidad de agua de la muestra. Este seguimiento se realizó por medio de una ficha de observación en la que se pudo analizar los contaminantes iniciales presentes y los resultantes después de la aplicación del tratamiento [60].

Para el proceso de tratamiento y análisis de datos se utilizaron en conjunto la estadística inferencial y descriptiva mediante herramientas ofimáticas principalmente Microsoft Excel, este programa fue de gran ayuda para realizar el traslado de datos que contienen las fichas de observación obteniendo gráficos, cuadros y tablas para finalmente continuar con el análisis comparando el antes y después del procedimiento.

3.3.3 Medición de *E. Coli* y coliformes totales inicial y final

En busca conocer de qué manera se está favoreciendo los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la muestra hídrica a estudiar, se propuso

verificar la reducción de contaminantes como nitritos y nitratos; sin embargo, en la medición preliminar se obtuvo el valor más bajo que es capaz de medir el espectrofotómetro por lo que si se quería verificar la disminución no iba a ser posible mediante el equipo disponible.

Parámetros como coliformes totales y *E. Coli* fueron determinados y se realizaron 3 pruebas por medio del kit de prueba de agua COLITAG. La primera prueba se realizó a una muestra de agua sin tratamiento y las dos siguientes con previo tratamiento utilizando las dos mejores dosis encontradas. Esta prueba consiste en agregar a 100 mL de la muestra de agua el producto de la papeleta agitando hasta conseguir una mezcla homogénea, teniendo en cuenta de esterilizar el ambiente por medio de calor se realiza su cultivo en recipientes especiales que permitirán un conteo de número más probable. Estos contenedores se dispusieron a una temperatura de 35 °C por un lapso de 24 horas. Una vez obtenidos los resultados de forma tanto cualitativa como cuantitativa se observaron los cambios realizados antes y después de la aplicación combinada del sulfato de aluminio y *M. Oleífera* [61].

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD HÍDRICA

4.1.1 Medición de parámetros físico - químicos

La alcalinidad es un indicador muy importante en el tratamiento de aguas residuales y naturales ya que de este depende el proceso de coagulación química y ablandamiento que tendrá el agua. Además, este parámetro funciona como conservador de la vida acuática debido a que es la capacidad del agua para resistir cambios ácidos en el pH; esencialmente la alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar el ácido. Esta capacidad se conoce como capacidad de almacenamiento en búfer. Un cuerpo de agua con un alto nivel de alcalinidad tiene niveles más altos de carbonato de calcio CaCO_3 .

Con el fin de determinar la alcalinidad en mg de CaCO_3 se debe tomar la totalidad del ácido sulfúrico 0.02 N consumido y se determina con la **ecuación 3**.

$$mg \text{ CaCO}_3 = \frac{A * N * 50000}{mL \text{ de muestra}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

A: mL de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) al 0,02 N

N: Normalidad del Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) al 0.02 N

$$mg \text{ CaCO}_3 = \frac{1.9 \text{ mL} * 0.02 * 50000}{100 \text{ mL}}$$

$$mg \text{ CaCO}_3 = \mathbf{19 \text{ mg}}$$

Dado que este valor corresponde a una alcalinidad baja y sabiendo que los iones H^+ reaccionan según la alcalinidad para favorecer la reacción de desestabilización, es decir que influye en la velocidad de reacción de un coagulante en el agua, se deduce que la velocidad de coagulación para este punto de muestreo es lenta; sin embargo, esto no representa un problema, por el contrario, teniendo en cuenta el propósito del presente trabajo que es reducir la cantidad de coagulante usado se vería afectado por una alta alcalinidad debido a que estas aguas suelen necesitar mayores niveles de coagulantes.

pH.

El pH es una de las variables más importante para tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada tipo de agua existe un rango de pH óptimo en el cual

la coagulación tiende a producirse rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

Las principales ventajas de los coagulantes químicos son que pueden funcionar de manera eficiente en amplios rangos de pH y temperaturas, sin embargo, siempre se tratara de optimizar lo máximo posible el proceso, sabiendo que coagulantes a base de aluminio se ven fuertemente afectados por el pH, para este proceso se estandarizó y se estableció que el pH óptimo varía de 6,0 a 7,5 según la teoría [62], lo que para este caso es propicio debido a que el resultado de pH de la muestra de estudio se mantiene en un valor con muy pocas variaciones de **6,46**.

Turbidez.

Al realizar los dos muestreos se observó que el agua era muy poco transparente dando un rango de resultados entre **20 NTU** en tiempo soleado, en tiempo lluvioso **60 NTU**, dando así como se muestra en la **Tabla 5** que el resultado 1 se encuentra en rango medio y en altas precipitaciones cambia a un rango alto; por tal motivo es importante tener en cuenta que para el proceso de coagulación realizado con el coagulante de *M. Oleífera* presentará un mejor desempeño en aguas con alta turbidez [45].

Es importante tener en cuenta la turbidez como parámetro ya que esta puede hacer referencia a una gran variedad de materiales en suspensión como sustancias coloidales, minerales u orgánicas en el agua, por lo que puede ser un importante indicio de contaminación [45], por este motivo en Colombia aunque no se establece un límite permisible de este valor la resolución 0631 de 2015 si los establece para parámetros que están directamente ligados como lo son los sólidos suspendidos totales y solidos sedimentable.

Tabla 5. Clasificación del agua de acuerdo con su turbidez

Masa de agua	Nivel de turbidez (NTU)
Masa de agua con pocas plantas y animales	0
Agua potable	< 0.5
Agua subterránea típica	<1.0
Masas de agua con cantidad moderada de plantas y animales.	1-8
Masas de agua con cantidades grandes de vida planctónica	10-30
Agua turbia o flujos en ríos de las tormentas de invierno	20-50

Fuente: [63]

Nitritos y Nitratos.

Estos son compuestos químicos formados básicamente por nitrógeno y oxígeno los cuales se encuentran normalmente en el ambiente, cuando se encuentran altos

valores de estos se asume que pueden ser provenientes de productos nitrogenados como fertilizantes, sin embargo las mediciones realizadas en este estudio dieron resultados relativamente bajos con valores de $< 2,0 \frac{mg}{l}$ nitratos, $< 0,02 \frac{mg}{l}$ nitritos, por lo que lo más probable es que la fuente hídrica no esté teniendo descargas de aguas residuales provenientes de cultivos de ningún tipo, inclusive teniendo en cuenta la norma Colombiana en la Resolución 2115 de 2007, la concentración de nitritos en el agua para consumo humano debe ser menor o igual a 0,1 mg/L y la concentración de nitratos debe ser menor o igual a 10 mg/L, es decir las condiciones actuales de esta fuente son aptas por lo menos para este parámetro.

Conductividad.

La conductividad indica la presencia de sales ionizadas, como cloruros o iones de sodio, carbonatos, etc. Además, este parámetro permite relacionar e interpretar resultados con los sólidos disueltos en las descargas o cuerpos de agua; para este caso de estudio se obtuvo un valor de conductividad de $373 \frac{uS}{cm}$. Esto indica según la **Tabla 6** que se encuentra muy cercana al tipo de agua doméstica, debido a la contaminación que esta fuente hídrica recibe desde su cuenca alta ya esta ha dejado de ser un agua natural para convertirse en un agua residual.

Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo con su conductividad

Tabla de conductividad del agua	
Agua ultrapura	$0,055 \frac{uS}{cm}$
Agua destilada	$0,5 \frac{uS}{cm}$
Agua de montaña	$1,0 \frac{uS}{cm}$
Agua doméstica	$500 - 800 \frac{uS}{cm}$
Max. Para agua potable	$1055 \frac{uS}{cm}$
Agua de mar	$55 \frac{uS}{cm}$
Agua salobre	$100 \frac{uS}{cm}$

Fuente: [64]

Oxígeno Disuelto (OD).

Es una propiedad muy importante para medir las condiciones de tipo aerobias o anaerobias de un medio, las variaciones de esta dependerán de las concentraciones y la estabilidad de materia orgánica que está presente en los medios [45].

El valor del Oxígeno Disuelto (OD) presentado en la **Tabla 7** exhibe un valor de **6,5 mg/L**, esto quiere decir que según los rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas presentadas en la tabla 7, la condición es aceptable cuando los valores se encuentran entre 5,0 a 8,0 mg/L, por lo tanto, esto causa que el nivel de OD sea adecuado para la vida de la gran mayoría de especies acuáticas.

Tabla 7. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas presentes

(OD) mg/L	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0-5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5-8	Aceptable	(OD) adecuada para la vida de la gran mayoría de especies
8-12	Buena	Favorece especies de peces y organismos acuáticos
>12	Sobresaturada	Sistema en plena producción fotosintética

Fuente:[65]

Sin embargo, en el momento de realizar el muestreo del agua se observó que ésta presentaba un color amarillento y un mal olor a causa de los vertimientos o descarga de sustancias orgánicas, debido que el oxígeno disuelto afecta a un vasto número de indicadores, no solo bioquímicos, también estéticos como el olor, claridad del agua y sabor

A continuación, en la **Tabla 8** se encuentran contenidos los resultados finales de los parámetros físico-químicos obtenidos en el laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

Tabla 8. Resultados de los parámetros físico-químicos del agua residual río Molino sector Camilo Torres

Parámetros	Unidad	Valor
Alcalinidad	mg/L	19
Turbidez	NTU	20,00
Nitritos	$\frac{mg}{L}$	< 0,02
Nitratos	$\frac{mg}{L}$	< 2,0
Conductividad	$\frac{uS}{cm}$	37
pH	-	6,46
Oxígeno Disuelto	$\frac{mg}{L}$	6,50

Fuente: Elaboración propia

Coliformes totales y *E. Coli*.

El análisis microbiano incluyó mediciones de coliformes totales y de *E. Coli* realizadas utilizando métodos estándar. La **Tabla 9** presenta los resultados de estos dos parámetros en función del número más probable por cada 100 mL, encontrando que en el sitio de muestreo hubo presencia de estos patógenos con valores de $3.255.000 \frac{NMP}{100 \text{ mL}}$ para coliformes totales y $794.000 \frac{NMP}{100 \text{ mL}}$ de *E. Coli*, valores muy por encima de lo estipulado en el Decreto 1594 de 1984. Según el Decreto, las condiciones para poder realizar solamente tratamiento convencional y poder dar una destinación al recurso, los coliformes totales no debe superar los $20.000 \frac{NMP}{100 \text{ mL}}$, es decir que la detección de estos indica que existe una vía para la entrada de patógenos clasificando este tipo de agua como una de muy alto riesgo para la salud. Adicionalmente, la presencia de *E. Coli* indica contaminación fecal en agua, ya que este microorganismo es habitante normal del tracto digestivo de animales y humanos, es por ello se considera como indicador universal. Este microorganismo genera una alerta sobre cualquier cuerpo hídrico ya que su presencia por si sola puede generar gastroenteritis y causar la muerte [66].

En general, la alta concentración tanto de coliformes totales como de *E. Coli* en las muestras de agua se debe a que el punto de estudio se encuentra en la cuenca baja de la fuente hídrica, es decir estos contaminantes son transportados por las corrientes de agua hasta este punto final donde se recogen gran parte de los vertimientos de toda la ciudad de Popayán.

Tabla 9. Resultados parámetros físico – químicos medidos en el laboratorio del Acueducto de Popayán

Parámetro	Técnica	Unidad	Valor
Coliformes totales	Número más probable	NMP/100 mL	3255000
<i>E. Coli</i>	Número más probable	NMP/100 mL	794000
Demanda bioquímica de oxígeno	Incubación 5 días - luminiscencia	mg O ₂ /L	30,2

Fuente: Elaboración propia

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

Este parámetro permite medir la cantidad de oxígeno que usan los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable por medio de condiciones aeróbicas. Los resultados de laboratorio indican que actualmente el valor de DBO₅ de la fuente hídrica se encuentra en $30,2 \frac{mg \text{ O}_2}{L}$ (**Tabla 7**), es decir se está cumpliendo con el valor máximo permisible descrito en la

Resolución 0631 de 2015, el cual establece que para aguas residuales domésticas no podrá superar una cantidad de $90 \frac{mg\ O_2}{L}$.

Sin embargo, como se demuestra en la **Figura 12** el valor actual de DBO₅ indica un estado alto de contaminación y deterioro, así como bajos niveles de sostenimiento de la biota acuática provocando así un desequilibrio en el ecosistema, por lo que se genera aparición de malos olores y deterioro estético, así como afectación en su composición química, física y biológica.

La alta presencia de DBO₅ puede indicar contaminación fecal como se logró verificar en el presente estudio, sin embargo la medición e interpretación de este parámetro tiene limitaciones debido a que proporciona resultados empíricos y no absolutos; es decir ofrece una buena comparación entre muestras, pero no da una medida exacta de la concentración de ningún contaminante en particular [66].

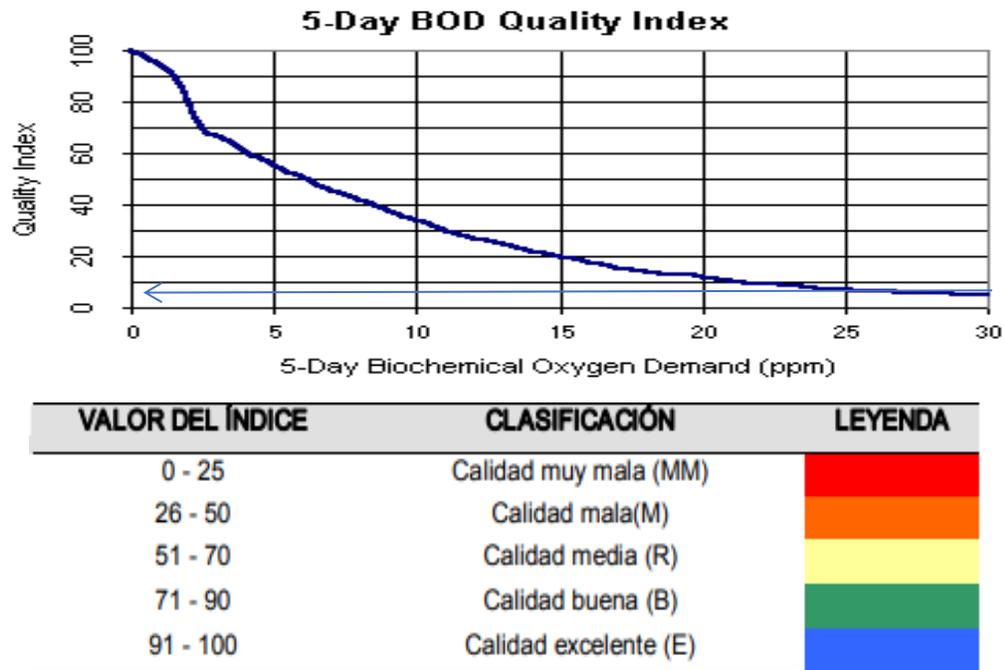


Figura 12. Índice de calidad de agua para BDO₅

Fuente:[66]

4.1.2 Determinación índice de contaminación del agua

Actualmente existen diversos índices para determinar el nivel de contaminación en el agua los cuales se desarrollaron con base en la legislación del país, para este estudio se determinó el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), el cual se formula a partir de tres variables con comportamientos no correlacionados, oxígeno, DBO₅ y coliformes totales, las cuales conjugan un espectro amplio de los fenómenos que ocasionan estos procesos de contaminación.

Este índice fue de fácil estimación, a continuación, en las **Figuras 13 y 14** se muestran los resultados tanto matemáticos como gráficos los cuales permiten puntualizar el tipo de problema ambiental existente; como ya se había determinado individualmente, la fuente hídrica presenta un grado de contaminación muy alto proveniente de la materia orgánica y patógenos presentes en el agua.

Parámetro:	Resultados	Subíndice
DBO	30 (mg/L)	0,984
Coliformes Fecales	3255000 (NMP/100mL)	1
Oxígeno Disuelto	55 (%Sat)	0,45

Valor del índice: 0,811	Ninguno	0 - 0,2	■
Grado de contaminación: Bajo	Medio	0,2 - 0,4	■
Muy Alto	Alto	0,4 - 0,6	■
Rango: 0,8 - 1	Muy Alto	0,6 - 0,8	■
Escala de color: Rojo		0,8 - 1	■

Figura 13. Resultados del Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO)

Fuente: Elaboración propia

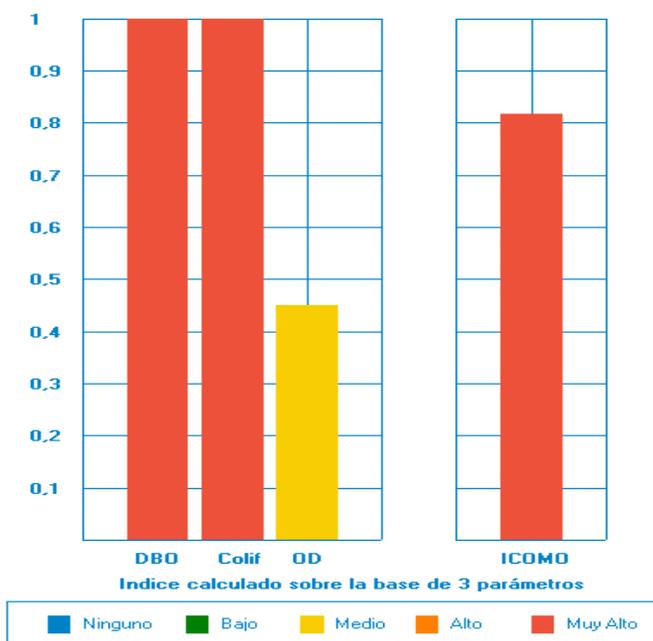


Figura 14. Gráfica resultado del Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO)

Fuente: Elaboración propia

4.2 DETERMINACIÓN DE LAS DOSIS Y CONDICIONES PARA LOS COAGULANTES

4.2.1 Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación

En esta fase del proyecto se realizaron dos pruebas de jarras las cuales comprenden un coagulante químico: Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ y un coagulante natural: *M. Oleífera*. Estas pruebas permitieron determinar la dosis del coagulante *M. Oleífera* óptima para llegar a valores de turbidez iguales o menores que el establecido por las Normas de Calidad del Agua de Colombia. En los siguientes apartados se encuentran los resultados de turbidez (NTU) con respecto de la cantidad de coagulante aplicado en mL.

4.2.2 Determinación de la dosis óptima para el coagulante químico sulfato de aluminio

En las pruebas de coagulación realizadas con el sulfato de aluminio se utilizó una muestra de agua tomada directamente de la fuente hídrica río Molino sector Camilo Torres la cual presentó una turbidez inicial promedio de **25 (NTU)** y un pH de **6,46**. Tras finalizar el ciclo de pruebas adicionando progresivamente 8 mL de sulfato de aluminio (5 mg/L) con incrementos de 1 mL, la muestra presentó una clara tendencia inicial a disminuir su turbidez teniendo valores que varían desde 8,78 hasta 0,87. En la **Figura 15** se puede observar que el mayor punto de eficiencia se encuentra en la dosis de 7 mL aplicados,

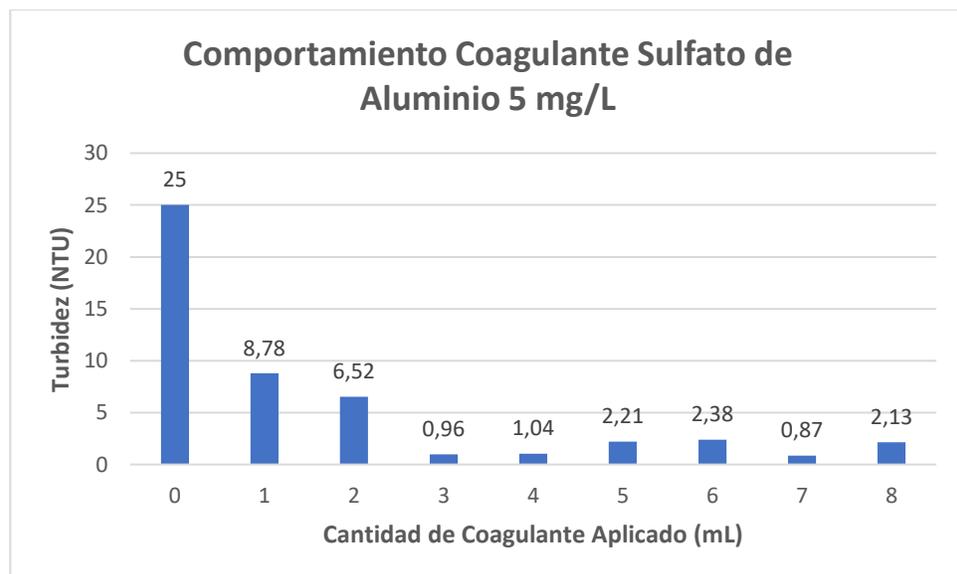


Figura 15. Prueba de jarras con el coagulante sulfato de aluminio (5 mg/L)

Fuente: Elaboración propia

Con una reducción de turbidez del 96,52 %, sin embargo, como se mencionaba anteriormente la dosis óptima busca la mejor relación entre remoción y dosis aplicada, por lo tanto se decidió tomar la adición de 3 mL aplicados como dosis óptima debido a que esta representa una remoción del 96,16 %; esta variación respecto al punto de mayor eficiencia es casi inapreciable, sin embargo en cuestión de dosis aplicada si representa una gran diferencia debido a que se logra obtener una misma remoción con mucho menos coagulante; además de esto se pudo observar que partir de la aplicación de 3 mL en adelante el coagulante empieza a tender a un comportamiento lineal tendiendo a perder efectividad.

A partir de lo mencionado con antelación y sabiendo que la Resolución 0631 de 2015 en la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales no indica valores en términos de turbidez, se optó por realizar la comparación bajo la Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico en el que se clasifican las fuentes hídricas en función de la calidad de agua como se muestra en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Clasificación de fuentes hídricas de acuerdo con la Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000

Fuente Aceptable (Art. 104)	Parámetros	Unidades	Resultados de los análisis en t ₉₀
	DBO 5 días		
Promedio mensual	mg/L		≤ 1.5
Máximo diario	mg/L		1 – 3
Coliformes totales		(NMP/100 mL)	
Promedio mensual			0 – 50
Oxígeno disuelto	mg/L		≥ 4
PH promedio			6.0 - 8.5
Turbiedad	(UNT)		< 2
Color verdadero	(UPC)		< 10
Gusto y olor			Inofensivo
Cloruros	(mg/L - Cl)		< 50
Fluoruros	(mg/L - F)		< 1.2

Fuente Regular (Art. 105)	Parámetros	Unidades	Resultados de los análisis en t ₉₀
	DBO 5 días		
Promedio mensual	mg/L		1.5 – 2.5
Máximo diario	mg/L		3 – 4
Coliformes totales		(NMP/100 mL)	
Promedio mensual			50 – 500
Oxígeno disuelto	mg/L		≥ 4
PH promedio			5.0 - 9.0
Turbiedad	(UNT)		2 – 40
Color verdadero	(UPC)		10 – 20
Gusto y olor			Inofensivo
Cloruros	(mg/L - Cl)		50 – 150
Fluoruros	(mg/L - F)		< 1.2

Fuente:[67]

Según esta Resolución, el río Molino sector Camilo Torres con una turbidez inicial de 25 (NTU) estaría contemplado como una *Fuente Hídrica Regular* ya que

se encuentra dentro del rango entre 2 – 40 (NTU); sin embargo, tras realizar el proceso de clarificación adopta características de turbidez de una *Fuente Aceptable*, con un valor de 0,96 (NTU) cumpliendo con la característica menor a 2 (NTU).

Con base en lo anterior se obtiene la base analítica de la cual se parte para realizar posteriores pruebas y comparaciones teniendo como objetivo la reducción de los 3 mL de sulfato de aluminio que se usarían normalmente para el tratamiento de esta fuente hídrica y que de igual forma se logre igualar esta disminución de turbidez.

4.2.3 Determinación de la dosis óptima para el coagulante natural *M. Oleífera*

En las pruebas de coagulación realizadas con la *M. Oleífera* se utilizó una muestra de agua tomada directamente de la fuente hídrica río Molino sector Camilo Torres la cual presentaba una turbidez inicial promedio de **20 (NTU)** y un pH de **6,46**. Las pruebas iniciales con el coagulante de *M. Oleífera* se realizaron con las ocho (8) concentraciones por separado, haciendo un barrido de ocho (8) dosificaciones distintas, teniendo así un total de sesenta y cuatro (64) datos como se muestra en la **Tabla 11**. En esta tabla se reportan los resultados obtenidos en cada prueba, junto a un análisis gráfico que permite ver de qué manera se comportó cada tratamiento resaltando la dosis óptima obtenida para cada concentración del coagulante natural.

Tabla 11. Resultados prueba de jarras con el coagulante *M. Oleífera*

Cantidad (mL)	M. Oleífera al horno B 10(g/L)	M. Oleífera al horno B 20(g/L)	M. Oleífera B 10(g/L)	M. Oleífera B 20(g/L)	M. Oleífera B 30(g/L)	M. Oleífera A 10(g/L)	M. Oleífera A 20(g/L)	M. Oleífera A 30(g/L)
1	15,83	8,52	10,73	10,93	11,07	17,73	15,07	8,50
2	12,67	7,80	10,03	7,57	7,33	14,90	12,20	5,20
3	10,17	7,82	7,40	9,77	6,35	8,44	5,37	3,86
4	8,33	5,70	6,85	9,50	7,99	7,72	5,36	5,36
5	6,60	6,16	5,73	9,37	5,15	7,08	7,10	4,92
6	6,95	5,69	5,98	7,75	6,32	7,27	8,74	3,89
7	5,46	5,66	5,10	4,08	3,85	6,55	7,26	6,23
8	3,51	6,04	4,90	5,29	6,08	6,44	9,21	5,21

Coag. Secado homo
Coag. 2020
Coag. 2021
Turbidez final (NTU)
Dosis óptima

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado se encontró que en su mejor rendimiento el coagulante natural *M. Oleífera* en general produjo una turbidez residual menor o muy cercana a la propuesta en la guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) la cual estipula

que sea de 5 NTU [66], es decir que después de su uso se valida su potencial para actuar realmente como un agente clarificador en el tratamiento del agua, ya que la proteína catiónica de la semilla de *M. Oleífera* neutraliza y adsorbe las partículas presentes en el agua; además de esto se demostró que la extracción de grasas y aceites condujo a una disminución significativa en el contenido de ácidos grasos y compuestos lipídicos (*M. Oleífera* al Horno B 10 y 20 g/L); indicando que la técnica de extracción de aceites utilizada en este estudio se puede emplear para extraer aceite de las semillas sin afectar su contenido de proteína, y en particular su contenido de proteína catiónica la cual es de principal interés.

La **Figura 16** ilustra el efecto de las diferentes dosis de coagulante *M. Oleífera* añadido a las aguas residuales sin tratar. Se puede ver en la figura que la eficiencia de remoción aumentó a mayor cantidad de dosis de *M. Oleífera*. El aspecto inicialmente era café oscuro en el momento de la recolección de la muestra, pero después de la adición de la semilla de *M. Oleífera*, el aspecto se volvió incoloro, inclusive el olor de la muestra de agua en el punto de recolección era desagradable, pero después del tratamiento, el agua se tornó inodora, especialmente con las dosis más altas.

Una vez que se realizó el tamizaje de resultados se obtiene como producto la **Figura 16** en la cual se presentan las dosis óptimas obtenidas para cada concentración de coagulante natural, además de esto con el fin de comprobar que las pruebas son replicables con los mismos resultados se realizaron dos (2) pruebas más a cada dosis óptima para un total final de dieciséis (16) pruebas más.

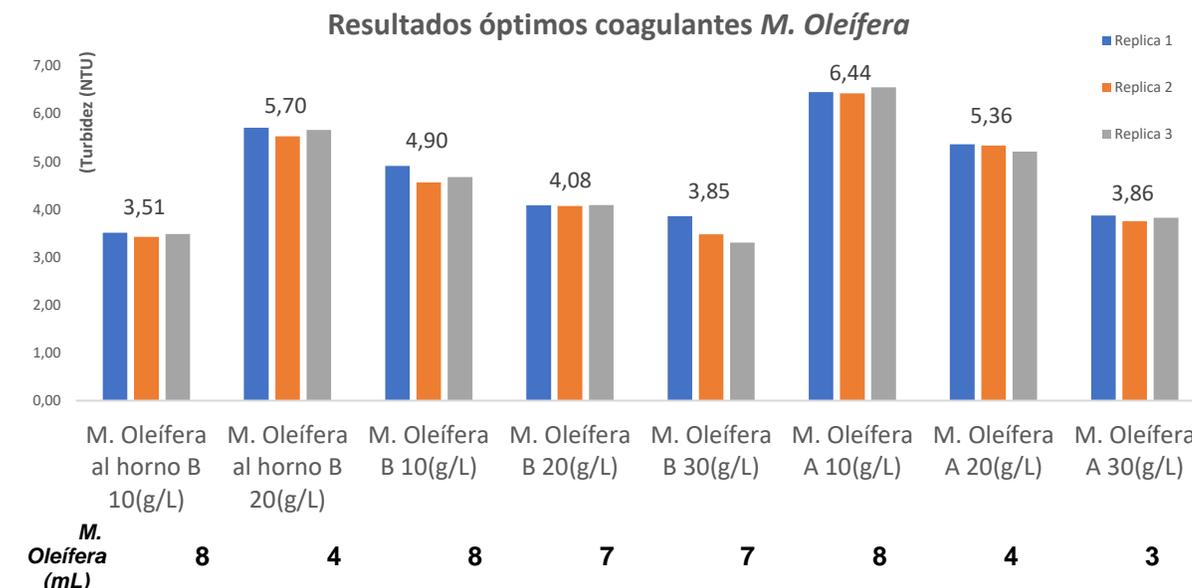


Figura 16. Resultados dosis óptima de las diferentes concentraciones y tratamientos del coagulante natural *M. Oleífera*

Fuente: Elaboración propia

Este resumen de datos reveló que la dosis óptima de semillas de *M. Oleífera* dió una turbidez residual de 3,51 (NTU) aplicando el coagulante que recibió el proceso de secado en el horno (*M. Oleífera* al horno B) aplicando una dosis de 8 mL y concentración 10 g/L; los resultados del proceso de coagulación en este estudio lograron una reducción de turbidez entre 82,45 y 67,80 % en su punto máximo y menos favorable respectivamente, teniendo presente que la muestra contaba con una turbidez inicial de 20 (NTU).

En comparación, las pruebas de jarras con muestras donde fue aplicado sulfato de aluminio arrojaron valores de NTU residuales menores a 1,0; es evidente que el coagulante de *M. Oleífera* por sí solo es menos eficaz; sin embargo, este sigue presentando ventajas ya que puede hacerlo preferible para ciertas aplicaciones debido a que aunque no alcance la turbidez para agua potable ya que estos son estudios de coagulación, la adición de extracto de coagulante natural no provocó un aumento notable del pH como se muestra en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Medición de pH antes y después de la prueba de jarras

pH Inicial	6.46
pH con <i>M. Oleífera</i> al Horno B, concentración 10 ($\frac{g}{L}$) y volumen 8 mL	6.48

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Solubilidad agente coagulante *M. Oleífera*.

Una vez obtenidos los coagulantes se propuso realizar una prueba de solubilidad de la semilla *M. Oleífera* con el fin de determinar si el uso de estos aporta residuos en soluciones acuosas o si presentan reacción química en presencia de ácidos, en la **Figura 17**.

La prueba (A) contiene 3,0 mL de agua destilada en cada tubo de ensayo, al agregar el coagulante líquido se observa que este no genera residuos de ningún tipo a la muestra de agua, por el contrario, el coagulante sólido sí genera un aporte de partículas las cuales no todas logran sedimentar generando una capa de sólidos tanto suspendidos como sedimentados.

La prueba (B) contiene 3,0 mL de H₂SO₄ en cada tubo de ensayo, de lo cual se puede además de observar el mismo efecto de la prueba anterior agregando el

coagulante tanto líquido como sólido, esta no genera ninguna reacción ante la presencia del ácido debido a que es un compuesto biológico.

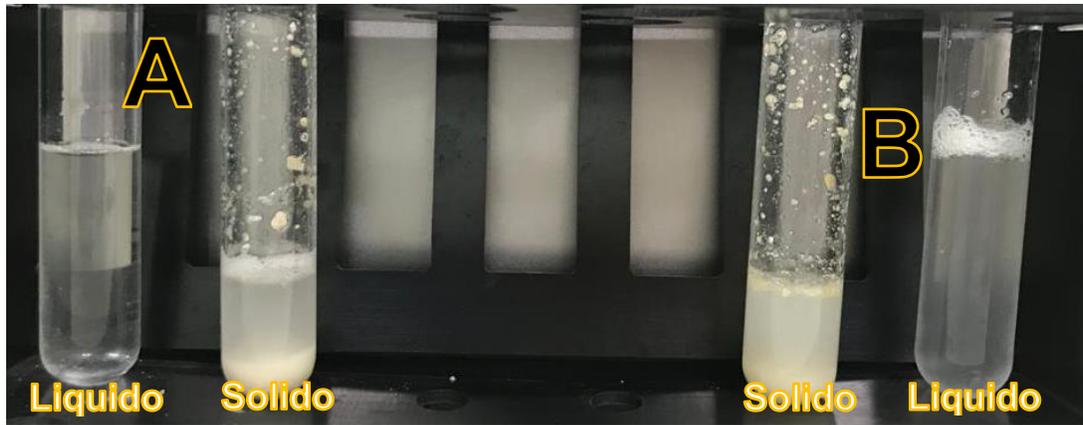


Figura 17. Solubilidad agente coagulante *M. Oleífera*.

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Comparación del coagulante natural *M. Oleífera* con 4 meses de diferencia

La comparación entre la turbidez residual del agua tratada con *M. Oleífera* extraída en el mes de noviembre de 2020 (*M. Oleífera* A) versus la extraída en marzo del 2021 (*M. Oleífera* B) reveló como resultado que a pesar de que la de noviembre estuvo en refrigeración por estos 4 meses, no presentó grandes variaciones de remoción con respecto a la que fue utilizada directamente después de la extracción, inclusive si se observa las dosis óptimas obtenidas para las concentraciones de 20 y 30 g/L son cantidades mucho menores a las del coagulante reciente, esto puede deberse a lo que se mencionaba con antelación respecto a las condiciones de las semillas, si se trata de semillas frescas pueden obtenerse dosis óptimas con cantidades menores; sin embargo se recomienda agitar vigorosamente los coagulantes antes de usarlos, de lo contrario se observó que pierden efectividad teniendo que repetir las pruebas.

4.2.5.1 Comparación del coagulante natural *M. Oleífera* secado a temperatura ambiente y secado en el horno eléctrico

En la **Figura 16**, se observan las dosis óptimas tanto para *M. Oleífera* B al horno 10 g/L y *M. Oleífera* al horno 20 g/L donde hubo una reducción de turbidez de 3,51 NTU y 5,70 NTU, respectivamente. Dado estos resultados se obtuvo que la

remoción fue efectiva, especialmente para el coagulante con la concentración del 10 g/L.

Por otro lado, los coagulantes secados a temperatura ambiente obtuvieron resultados de turbidez entre los rangos de 6,44 NTU a 3,85 NTU, que al compararlas con el coagulante secado en el horno resultaron ser un poco menos eficientes. De este modo, se puede inferir que el coagulante secado al horno fue mucho más eficiente debido a que sus partículas son más pequeñas provocando una mejor extracción del agente coagulante; sin embargo, no es factible tomar este valor como dosis óptima ya que la cantidad de semilla pulverizada y secada al horno era menor en comparación de la secada a temperatura ambiente, es decir que al tomar el coagulante secado al horno como dosis óptima implicaría el desperdicio del resto del agente coagulante.

4.3 COMPARACIÓN *EX SITU* DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES

4.3.1 Elección y mezcla de la dosis óptima para cada concentración de coagulante

Para la segunda sección de pruebas de coagulación realizadas con la combinación de *M. Oleífera* y sulfato de aluminio se utilizó una muestra de agua tomada directamente de la fuente hídrica río Molino sector Camilo Torres la cual presentó una turbidez inicial promedio de **20 (NTU)** y un pH de **6,46**. Para esta mezcla como se muestra en la **Tabla 13** se mantuvo constante la dosis ideal de cada concentración de *M. Oleífera* encontrada anteriormente y se procedió a agregar pequeñas cantidades de sulfato de aluminio que aumentan progresivamente desde 0,5 mL hasta 2,0 mL; en este punto se observó que la mayoría de muestras alcanzaron su máxima remoción de turbidez obteniendo así un total de cuatro (4) mezclas por cada uno de los ocho (8) coagulantes naturales para un total de treinta y dos (32) ensayos de jarras.

Tabla 13. Metodología mezcla de coagulantes

Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
<i>Dosis óptima M. Oleífera</i> +0.5 mL $Al_2(SO_4)_3$	<i>Dosis óptima M. Oleífera</i> +1.0 mL $Al_2(SO_4)_3$	<i>Dosis óptima M. Oleífera</i> +1.5 mL $Al_2(SO_4)_3$	<i>Dosis óptima M. Oleífera</i> +2.0 mL $Al_2(SO_4)_3$

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Ensayos y medición del proceso de coagulación y floculación

En la **Tabla 14 y 15** se encuentran comprendidos los resultados para cada prueba junto a un análisis gráfico que permite observar de qué manera se comportó

cada tratamiento, del cual se pudo deducir que el rango de remoción de turbidez de las dosis óptimas encontradas está entre el 86,7 % y 96.0 % lo que corresponde a una muy alta eficiencia, inclusive superando el valor máximo de remoción obtenido por el sulfato de aluminio de forma individual.

Tabla 14. Resultados mezcla M. Oleífera y sulfato de aluminio tiempo soleado

Cantidad de Coagulante (mL)	M. Oleífera al horno B 10(g/L)	M. Oleífera al horno B 20(g/L)	M. Oleífera B 10(g/L)	M. Oleífera B 20(g/L)	M. Oleífera B 30(g/L)	M. Oleífera A 10(g/L)	M. Oleífera A 20(g/L)	M. Oleífera A 30(g/L)
M. Oleífera	8,0	4,0	8,0	7,0	7,0	8,0	4,0	3,0
Sulfato Aluminio	8,0	4,0	8,0	7,0	7,0	8,0	4,0	3,0
0,5	4,62	3,62	3,27	5,69	9,84	2,74	3,48	5,53
1,0	2,92	3,57	2,00	5,16	10,04	1,42	4,45	3,72
1,5	1,59	0,99	1,33	2,42	6,59	0,80	3,03	3,21
2,0	1,12	0,83	0,99	1,89	6,48	0,73	2,12	2,66

Coag. Secado horno Coag. 2020 Coag. 2021 Turbidez final (NTU) Dosis optima

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Muestra de agua antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

A partir de este estudio se pudo deducir que cada concentración y dosis de *M. Oleífera* tiene su propio tiempo de sedimentación ideal, esto se debe a que existe una diferencia en la capacidad de la *M. Oleífera* de formar flóculos con respecto a los coagulantes químicos, ya que en presencia del coagulante natural se formaron sólidos ligeros de sedimentación lenta; es por ese motivo que estudios como el de Dorea en el 2006 [66], aseguran que la *M. Oleífera* no es adecuada para muestras

por debajo de 50 NTU; la razón es que estas aguas de baja turbidez generalmente contienen niveles bajos de material particulado en suspensión. En tales condiciones, la oportunidad de interacción entre partículas se reduce en gran medida, lo que resulta en una menor formación de flóculos y un efecto adverso en el rendimiento del tratamiento [15]. Sin embargo, para el presente caso incluso en aguas que tenían baja turbidez, su efecto mejoró notablemente cuando se combinó con sulfato de aluminio, lo que permitió asegurar que el coagulante natural de *M. Oleífera* es un buen coadyuvante del sulfato de aluminio.

Posterior a esta prueba, se propuso una tercera sección de ensayos de jarras donde se buscó observar el comportamiento de esta combinación de coagulantes propuestas anteriormente, cuando la muestra de agua presenta un aumento en su turbidez inicial debido al incremento en las precipitaciones en la zona a un promedio de **60 (NTU)**.

En la **Tabla 16** se presentan los resultados de esta prueba, en los cuales se observó que la eficacia de la *M. Oleífera* en combinación con el sulfato de aluminio en la coagulación es dependiente de los niveles de turbidez, en general, para todas las condiciones experimentales, la eficiencia de remoción de turbidez aumentó a medida que aumentaba la turbidez inicial de la muestra de agua, esto puede explicar el hecho de que a pesar del aumento en la turbidez de 20 (NTU) a 60 (NTU) se obtuvieron valores de remoción final muy parecidos; esto puede deberse a que con el incremento de las precipitaciones aumenta directamente el arrastre de sólidos, los cuales para la ciudad de Popayán los constituyen principalmente las arcillas, debido al tipo de suelo con el que cuenta el territorio, es decir sabiendo que los coagulantes tiene cargas fuertemente catiónicas, se esperaría que fueran más eficaces en este tipo de aguas con más turbidez.

Tabla 16. Resultados mezcla *M. Oleífera* y sulfato de aluminio tiempo lluvioso

Cantidad de Coagulante (mL)	M. Oleífera al horno B 10(g/L)	M. Oleífera al horno B 20(g/L)	M. Oleífera B 10(g/L)	M. Oleífera B 20(g/L)	M. Oleífera B 30(g/L)	M. Oleífera A 10(g/L)	M. Oleífera A 20(g/L)	M. Oleífera A 30(g/L)
M. Oleífera	8,0	4,0	8,0	7,0	7,0	8,0	4,0	3,0
Sulfato Aluminio	8,0	4,0	8,0	7,0	7,0	8,0	4,0	3,0
0,5	3,29	12,50	10,97	2,61	6,63	12,93	21,27	3,03
1,0	7,20	10,30	5,99	1,54	2,77	7,37	12,83	2,13
1,5	2,45	4,70	2,76	1,00	1,76	6,02	3,50	1,20
2,0	1,09	1,38	2,44	1,16	1,45	1,86	2,14	1,37

Coag. Secado horno Coag. 2020 Coag. 2021 Turbidez final (NTU) Dosis optima

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 18** se encuentran los mejores valores de turbidez final para cada tratamiento, de lo cual se puede concluir que exceptuando la prueba de *M. Oleífera* B 30 (g/L), todos los valores son bastante aceptables y están dentro del rango óptimo, sin embargo con el fin de darle cumplimiento al objetivo de reducir la

cantidad de sulfato de aluminio en el tratamiento las dosis con las que se propone tratar esta fuente hídrica se encuentran en la **Tabla 17**, logrando con estas una disminución del 50 % en el uso de este coagulante químico.

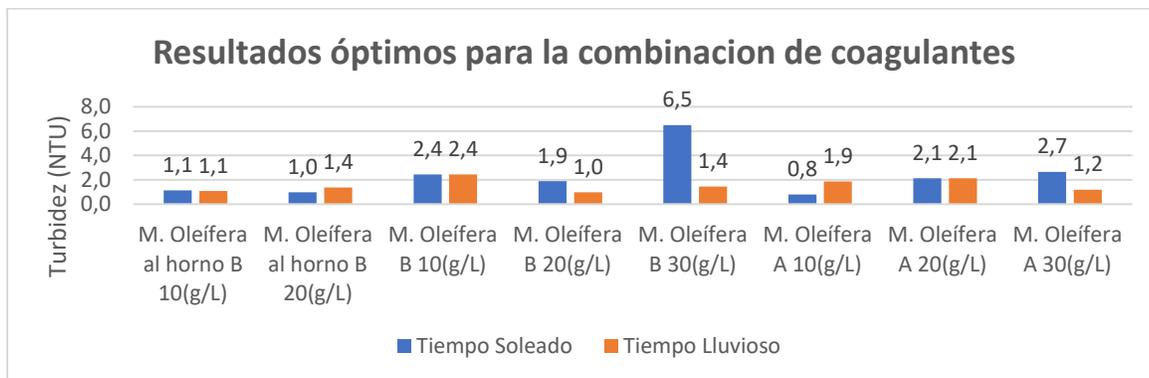


Figura 18. Resultados óptimos mezcla *M. Oleífera* y sulfato de aluminio tiempo soleado y lluvioso

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Dosis óptima de coagulante para el río Molino

Condición de la muestra	Coagulante natural	Coagulante químico	$\frac{M. Oleífera}{S. Aluminio}$ %	% Remoción
Tiempo Soleado, 20 NTU	<i>M. Oleífera</i> A 10 ($\frac{g}{L}$) 8 mL	Sulfato de aluminio 5 ($\frac{mg}{L}$) 1,5 mL	84.2% <i>M. O</i> 15.8% <i>S. A</i>	96 %
Tiempo Lluvioso, 60 NTU	<i>M. Oleífera</i> B 20 ($\frac{g}{L}$) 7 mL	Sulfato de aluminio 5 ($\frac{mg}{L}$) 1,5 mL	82.3% <i>M. O</i> 17.7% <i>S. A</i>	98.3 %

Fuente: Elaboración propia

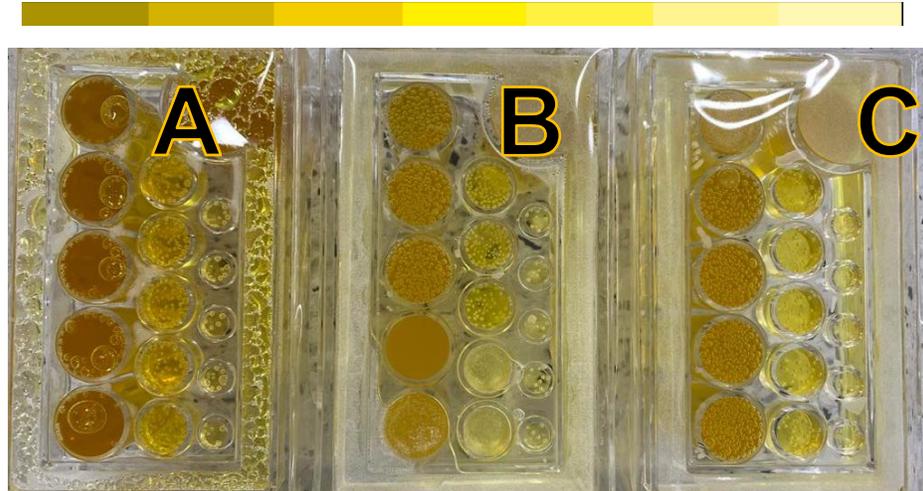
4.3.3 Medición de *E. Coli* y coliformes totales inicial y final

En esta sección, se discuten los resultados de los efectos de la concentración de *M. Oleífera* en combinación con el sulfato de aluminio y el tiempo de asentamiento en la reducción de estos patógenos en las aguas residuales. Con el fin de observar lo anterior se aplicó la prueba COLITAG a tres (3) muestras de agua, una (1) sin tratamiento y dos (2) con las mejores dosis encontradas.

Para coliformes totales correspondiente a la **Figura 19**, en la prueba A como se pudo demostrar anteriormente cuenta con una cantidad de $3.255.000 \frac{NMP}{100 mL}$, lo que representa una coloración con un amarillo intenso, en la prueba B y C la coloración tiende a disminuir, eso se debe a que estas pruebas presentaban un previo tratamiento por lo que se puede determinar que la adición de *M. Oleífera* y sulfato de aluminio ayudan en la reducción de las poblaciones microbianas en las aguas residuales, sin embargo con esta prueba no es posible determinar si esta remoción

fue óptima, debido a que no se tiene un valor numérico de estas, la prueba es netamente cualitativa, por lo que no se garantiza que las aguas residuales terminen 100 % libres de patógenos.

De la misma manera sucede al revisar los resultados para *E. Coli*, la **Figura 20** muestra como en las tres (3) pruebas existe presencia de este contaminante sin embargo no es posible determinar si el tratamiento aporta en la reducción de estos, ya que los tres (3) presentó fluorescencia bajo la luz ultravioleta en todos los tubos.



<i>Sin tratamiento</i>	M. Oleífera al horno B $20\left(\frac{g}{L}\right)$	M. Oleífera $10\left(\frac{g}{L}\right)$
	+ 1.5 mL Sulfato Aluminio	+ 1.5 mL Sulfato Aluminio

Figura 19. Resultados prueba COLITAG coliformes totales

Fuente: Elaboración propia



<i>Sin tratamiento</i>	M. Oleífera al horno B $20\left(\frac{g}{L}\right)$	M. Oleífera $10\left(\frac{g}{L}\right)$
<i>Sin tratamiento</i>	+ 1.5 mL Sulfato Aluminio	+ 1.5 mL Sulfato Aluminio

Figura 20. Resultados prueba COLITAG *E. Coli*

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio mostraron que, de acuerdo con los estándares del índice de calidad del agua, el río Molino se encuentra en un estado de muy alta contaminación y deterioro. Al realizar el análisis e investigar los resultados, se puede concluir que para estas aguas residuales su fuente de contaminación principal son los desechos provenientes por descargas de aguas residuales domésticas, las cuales generan el mayor aporte de coliformes totales.
- Este estudio demostró la alta eficiencia del índice de calidad del agua por materia orgánica (ICOMO) así como el software Ictest para analizar e interpretar un conjunto de datos para una evaluación efectiva de las aguas superficiales.
- Los resultados demostraron que tanto la extracción de grasas y aceites como la aplicación de calor (150 °C) para lograr un secado óptimo del precipitado de *M. Oleífera*, no interfirieron con la actividad coagulante de este, por lo tanto, se demostró que podría usarse para el tratamiento de aguas residuales.
- En este estudio fue posible concluir que la *M. Oleífera* puede usarse como un coagulante natural debido a que tiene el potencial de reducir la turbidez gracias a las proteínas que funcionan como polielectrolitos naturales, con un posible mecanismo que combina la adsorción, así como la neutralización de carga.
- De este estudio se logró concluir que la calidad en la que se encuentre la semilla en el momento de la extracción del agente coagulante es de vital importancia, debido a que si esta se encuentra demasiado seca conllevará a que se necesite una dosis más alta para alcanzar resultados óptimos.
- A través de las pruebas realizadas se comprobó que el coagulante a base de *M. Oleífera* se comporta de manera correcta sin importar el tiempo que transcurra después de la extracción, se demostró que cuatro (4) meses después sigue manteniendo el efecto coagulante siempre y cuando se mantenga las medidas de refrigeración constante y correcta agitación antes de su uso.
- Por otro lado, se demostró una mayor eficiencia de coagulación individual para el sulfato de aluminio en comparación con las muestras tratadas con *M. Oleífera*, sin embargo, la coagulación con *M. Oleífera* es ventajosa sobre la química, debido a que es un recurso natural disponible localmente, ecológico, no tóxico, biodegradable y que no afecta el pH del agua; así, su uso permite evitar numerosos inconvenientes de los coagulantes convencionales como el aluminio.

- Con base en los resultados obtenidos se logró establecer que el coagulante de *M. Oleífera* es un buen coadyuvante del sulfato de aluminio, logrando óptimos resultados de remoción hasta del 98,3% en su uso combinado, inclusive logrando valores de turbidez aptos para agua potable, la proteína de la semilla junto al sulfato de aluminio se une de forma correcta a las partículas cargadas negativamente que causan la turbidez, formando flóculos pesados que pueden precipitarse.
- Esta investigación confirma la eficiencia de la *M. Oleífera* en combinación con el sulfato de aluminio como un excelente agente coagulante, tanto para aguas con alta y baja turbidez, sin embargo, se logró concluir que su efecto es mucho mejor y puede ser más útil durante las estaciones húmedas donde los niveles de turbidez aumentan y potencialmente podría proporcionar ahorros significativos en la cantidad del coagulante químico.
- En general la *M. Oleífera* como coadyuvante del sulfato de aluminio se puede utilizar como una alternativa para aclarar las aguas residuales; cabe señalar que la aplicación de estos coagulantes es muy recomendable para la purificación de agua doméstica en los países en desarrollo, donde la gente, especialmente en las comunidades rurales, está acostumbrada a beber agua turbia no tratada contaminada; sin embargo, este estudio de la *M. Oleífera* en combinación con el sulfato de aluminio no garantiza que el agua termine completamente libre de gérmenes patógenos.
- Esta investigación se constituye en un punto de referencia para las empresas prestadoras de servicio de acueducto que deseen utilizar fuentes de abastecimiento con calidad de agua similar a la presentada en este caso de estudio. Esto, incluyendo la turbidez entre los parámetros básicos de mayor frecuencia para el monitoreo de la calidad del agua, dada la rapidez de la obtención del resultado y el bajo costo en su determinación.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se considera importante para futuras investigaciones de que la adquisición de la semilla de *M. Oleífera* se realice teniendo en cuenta el tiempo que lleva la semilla de cosechada, con el fin de que en el momento de la extracción la semilla se encuentra aún fresca.
- Se aconseja realizar una investigación más a fondo sobre la posible reutilización de la semilla de *M. Oleífera* que resulta después de la preparación del coagulante.
- Se recomienda en futuras investigaciones se indague más a fondo el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y reducción de poblaciones

microbianas post tratamiento que no se tuvieron en cuenta en el presente documento.

- Se recomienda cambiar el método analítico COLITAG por uno en donde los resultados sean cuantitativos con el fin de obtener valores de remoción exactos del tratamiento.
- Se sugiere emplear la metodología de este estudio a investigaciones cuya finalidad sea el agua potable o los lixiviados, debido a los excelentes resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Devrimci, M. Yuksel, and D. Sanin, "Algal alginate: A potential coagulant for drinking water treatment," *Desalination*, vol. 299, pp. 16–21, Aug. 2012.
- [2] B. Gandiwa and L. Moyo, "Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend)," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 34, pp. 158–164, 2020.
- [3] P. Gebbie, "An operator's guide to water treatment coagulants," *Proc. 31st Annu. Qld Water Ind. Work.*, 2006.
- [4] R. Rajendran and M. Abirami, "Biological treatment of drinking water by chitosan based nanocomposites," *African J. Biotechnol.*, vol. 14, no. 11, pp. 930–936, 2015.
- [5] M. Madsen and J. Schlundt, "Effect of water coagulation by seeds of Moringa oleifera on," *J. Trop. Med. Hyg.*, 1987.
- [6] J. Vinitha and S. Abubakar, "Extraction of Natural Coagulant from Royal Poinciana (Delonix regia) Seed to Treat Turbid Water," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2008.
- [7] L. Güiza, "Tecnologías de la información y las comunicaciones aplicadas a la gestión del agua: El caso del río Bogotá," *Rev. Ciencias Ambient.*, vol. 54, no. 1, pp. 76–94, Jan. 2020.
- [8] E. Durán, "Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos," *Din. Ambient.*, no. 1, pp. 83–102, 2016.
- [9] D. Yu, D. Yong, and S. Dong, "Toxicity detection of sodium nitrite, borax and aluminum potassium sulfate using electrochemical method," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 25, no. 4, pp. 785–790, Apr. 2013.
- [10] Y. Reyes, I. Vergara, O. Torres, M. Díaz, and E. González, "Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria.," *Indian J. Pediatr.*, vol. 16, no. 2, pp. 66–77, 2016.
- [11] A. Restrepo, "Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable.," 2009.
- [12] M. Meza, K. Riaños, I. Mercado, and R. Olivero, "Evaluation of the coagulant power of aluminum sulfate and Moringa oleifera seeds in the c," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 95–103, 2018.
- [13] D. Peña, C. Arana, and C. Ordoñez, "Modelo para la evaluación de alternativas de localización de una PTAR para una ciudad en el Valle del

Cauca Colombia.,” *Sci. Tech.*, vol. 21, no. 1, p. 43, Mar. 2016.

- [14] J. Acevedo, “Uso de semillas de moringa (moringa oleífera) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de río Negro, río de Oro y quebrada Floridablanca, Santander,” 2019.
- [15] N. Fuentes, E. Molina, and C. Ariza, “Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas,” *Prod. + Limpia*, vol. 11, no. 2, pp. 41–54, 2016.
- [16] M. Pritchard and T. Craven, “A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water - An alternative sustainable solution for developing countries,” *Phys. Chem. Earth*, vol. 35, no. 13–14, pp. 798–805, Jan. 2010.
- [17] K. A. Ghebremichael, *Moringa Seed and Pumice As Alternative*, no. November. 2004.
- [18] R. Nuñez, “Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización de la empresa aguas de cartagena s.a e.s.p y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante,” 2011.
- [19] N. Van Dyke *et al.*, “Association between aluminum in drinking water and incident Alzheimer’s disease in the Canadian Study of Health and Aging cohort,” *Neurotoxicology*, Apr. 2020.
- [20] M. A. Aboulhassan, S. Souabi, A. Yaacoubi, and M. Baudu, “Improvement of paint effluents coagulation using natural and synthetic coagulant aids,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 138, no. 1, pp. 40–45, Nov. 2006.
- [21] H. Castro, “Efecto coagulante de la semilla de moringa (Moringa Oleífera) para clarificar agua del canal monsefú, centro poblado Callanca,” DISTRITO MONSEFÚ, 2020.
- [22] M. Meza, K. Riaños, and I. Mercado, “Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 2. pp. 95–104, 2018.
- [23] A. Arias, J. Hernández, A. Castro, and N. Sánchez, “Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la m. oleífera como coagulante natural,” *Biotechnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. Edición Es, no. 1, p. 29, 2017.
- [24] P. Naranjo, N. Johanna, C. Triana, and W. Giovanni, “Evaluación de la semillas de moringa oleifera como coagulante natural para el tratamiento de aguas en el departamento del meta,” *reponameRepositorio Inst. Univ. Libr.*, 2012.
- [25] R. Gómez and K. Gutiérrez, “Eficiencia del coagulante de la semilla de

Moringa oleifera en el tratamiento de agua con baja turbidez,” 2010.

- [26] G. Folkard, “Moringa oleifera un árbol con enormes potencialidades 1,” 1996.
- [27] L. Bolaños and F. Castro, “Evaluación de la implementación de sistemas automatizados de alerta temprana en tiempo real dirigidos a disminuir los riesgos que representan las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales en la subcuenca río Molino, municipio de Popayán,” Universidad Católica De Manizales, Manizales - Caldas, 2016.
- [28] O. Tacha and M. Guevara, “Simulación hidráulica con flujo permanente y no permanente,” Lima, Perú, 2016.
- [29] L. Villaquirán, “Identificación de las condiciones naturales y antrópicas, que generan riesgo por inundación del río Molino,” Popayán, Cauca, 2017.
- [30] H. Ramírez and W. Pérez, “Mamíferos presentes en el municipio de Popayán, Cauca - Colombia,” Popayán, Cauca, 2014.
- [31] D. B. Walker, D. J. Baumgartner, C. P. Gerba, and K. Fitzsimmons, “Surface Water Pollution,” in *Environmental and Pollution Science*, Elsevier, 2019.
- [32] J. Fawell and M. Nieuwenhuijsen, “Contaminants in drinking water,” *British Medical Bulletin*, vol. 68. Br Med Bull, pp. 199–208, 2003.
- [33] J. Flórez and M. Cogollo, “Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio,” *DYNA*, vol. 78, no. 165, pp. 18–27, Jan. 2011.
- [34] Y. Acosta, *Tratamiento de aguas por coagulación y floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba*, vol. XL. 2006.
- [35] A. Cárdenas, “Tratamiento de agua coagulación y floculación,” Lima, 2000.
- [36] D. Trujillo and L. Duque, “Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano,” *Rev. ION*, vol. 27, no. 1, 2014.
- [37] W. L. Ang and A. W. Mohammad, “State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 262. Elsevier Ltd, p. 121267, Jul. 20, 2020.
- [38] P. Agarwal and G. Saini, “Use of natural coagulants (Moringa oleifera and Benincasa hispida) for volume reduction of waste drilling slurries,” *Mater. Today Proc.*, Feb. 2021.
- [39] C. Martín, “Potenciales aplicaciones de Moringa oleifera. Una revisión crítica,” *Pastos y Forrajes*, vol. 36, no. 2, 2013.
- [40] A. Al-Shoaibi and T. Boutraa, “Comparative study on germination, growth and

gas exchanges of the tropics' tree *Moringa oleifera* and its desert relative *Moringa peregrina* under saline conditions," *South African J. Bot.*, vol. 139, pp. 374–385, Jul. 2021.

- [41] M. Olson and J. Fahey, "Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas," *Rev. Mex. Biodivers.*, vol. 82, no. 4, 2011.
- [42] J. Feria, S. Roa, and A. Estrada, "Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú," *Prod. + Limpia*, vol. 9, no. 1, 2014.
- [43] M. Benitez, "APROVECHAMIENTO POSCOSECHA DE LA MORINGA (*Moringa oleifera*)," *Rev. Iberoam. Tecnol. Postcosecha*, vol. 13, no. 2, pp. 171–174, 2012.
- [44] M. Brandt, "Storage, Clarification and Chemical Treatment," in *Twort's Water Supply*, Elsevier, 2017.
- [45] K. Azil, A. Altuncu, K. Ferria, S. Bouzid, Ş. A. Sadık, and F. E. Durak, "A faster and accurate optical water turbidity measurement system using a CCD line sensor," *Optik (Stuttg.)*, vol. 231, p. 166412, Apr. 2021.
- [46] Foro Nacional Ambiental (FNA), "Política y legislación ambiental Colombiana," 2020. .
- [47] A. Carvajal and A. Gómez, "Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua," 2010.
- [48] IDEAM, "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales," Sep. 2007.
- [49] T. Reutelshöfer and L. Guzmán, *Guía para la toma de muestras de agua residual*. Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico, 2015.
- [50] D. Orozco, "Análisis fisicoquímicos de muestras ambientales, materias primas y alimentos e identificación de metales por espectroscopia de absorción atómica," 2005.
- [51] I. Cortés, "Curso 'Contaminación de aguas,'" *Universidad de Chile*, 2015. .
- [52] G. Acosta, "Caracterización físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundinamarca, Colombia.," Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2015.
- [53] A. Perdomo, "Determinación de la eficiencia de coagulantes de origen natural para el tratamiento de las aguas residuales de una unidad de producción minera en la vereda el Tamboral en el municipio de Suarez – Cauca -

Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca,” no. 2, 2018.

- [54] M. Bravo, “Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, solidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales,” Bogotá D.C, 2017.
- [55] L. Castellanos and M. Martín, “Desarrollo de un coagulante orgánico a partir de la semilla de moringa para la empresa comercial Dacetex Ltda,” Bogotá, D.C, 2020. Accessed: Jun. 07, 2021. [Online]. Available: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7789/1/6151576-2020-I-IQ.pdf>.
- [56] D. Delgado, G. Rodríguez, J. Martínez, J. Rojas, and F. Martínez, “Validación de una metodología analítica empleando espectrofotometría ultravioleta para el estudio de la solubilidad de algunas sulfonamidas en mezclas cosolventes alcohol + agua,” Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2013.
- [57] B. Grehs and A. R. Lopes, “Removal of microorganisms and antibiotic resistance genes from treated urban wastewater: A comparison between aluminium sulphate and tannin coagulants,” *Water Res.*, vol. 166, p. 115056, Dec. 2019.
- [58] Icontec, “Procedimiento Para El Método De Jarras En La Coagulación-Floculación Del Agua,” *Norma Tec. Colomb.*, vol. 1, p. 9, 2001.
- [59] E. Reyes and M. Carvajal, “Evaluación de un sistema de tratamiento por coagulación para las aguas residuales de la central termoeléctrica de cementos argos s.a. planta Ríoclaro, municipio de Sonsón – Antioquia, para fines de reúso. Universidad Nacional Abierta y a Distancia,” 2016. .
- [60] A. Condor and I. Naydhú, “Eficiencia de la semilla ‘Moringa oleífera Lam.’ como coagulante para reducir coliformes termotolerantes en los Pantanos de Villa - Chorrillos, 2017,” *Repos. Inst. - UCV*, 2017.
- [61] L. Villanueva and Y. Yance, “Mejoramiento de la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes termotolerantes en la ptar del distrito de huáchac-chupaca.,” Huancayo, 2017.
- [62] Z. Yang, B. Gao, Q. Yue, and Y. Wang, “Effect of pH on the coagulation performance of Al based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 178, no. 1–3, pp. 596–603, Jun. 2010.
- [63] J. Berbis, “Diseño e implementación de un sistema de control para la dosificación automática de reactivos de proceso en una planta de tratamiento de aguas blancas,” *Universidad Central de Venezuela*, 2012. .
- [64] A. Alurralde, “Consideraciones básicas para la interpretación de un análisis de agua,” *Divulg. Técnica Agrícola y Agroindustrial*, 2017.

- [65] Y. Huaraca and D. Meza, "Oxígeno disuelto, Distribución y relaciones con otros parámetros ambientales," *Universidad Alas Peruanas, Ingeniería Ambiental*, 2016.
- [66] R. Kwabena, F. Kuranchie, and S. Gyasi, "Antimicrobial and coagulation potential of Moringa oleifera seed powder coupled with sand filtration for treatment of bath wastewater from public senior high schools in Ghana," *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04627, Aug. 2020.
- [67] RAS, "Resolución No. 1096 del 17 de Noviembre de 2000," Santafé de Bogota D.C., 2000.

ANEXOS

7.1 Dosis óptima Sulfato de Aluminio Baja turbidez – Clima Soleado

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	5	10	15	20	25	30	35	40	
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
	30 Sg - 200 RPM								
	TIEMPO MEZCLA LENTA								
	20 min - 45 RPM								
	NTU FINAL								
	8,86	6,56	0,94	1,05	2,21	2,28	0,78	2,09	
	8,68	6,48	0,96	1,03	2,21	2,45	0,86	2,13	
	8,8	6,51	0,99	1,04	2,22	2,4	0,96	2,16	
25	8,78	6,52	0,96	1,04	2,21	2,38	0,87	2,13	

7.1.1 Coagulante M. Oleífera Horno 10(g/L)

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML COAGULANTE								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
	30 Sg - 200 RPM								
	TIEMPO MEZCLA LENTA								
	30 min - 45 RPM								
	NTU FINAL								
	15,50	12,70	10,30	8,23	6,51	6,95	5,46	3,59	
	15,90	12,60	10,10	8,40	6,63	6,88	5,48	3,43	
	16,10	12,70	10,10	8,35	6,65	7,02	5,45	3,50	
25	15,83	12,67	10,17	8,33	6,60	6,95	5,46	3,51	

7.1.2 Coagulante M. Oleífera Horno 20(g/L)

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	20	40	60	80	100	120	140	160	
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
30 Sg - 200 RPM									

TIEMPO MEZCLA LENTA								
30 min - 45 RPM								
NTU FINAL								
	8,51	7,69	7,81	5,87	6,12	5,71	5,68	6,08
	8,51	7,84	7,89	5,52	6,19	5,83	5,57	6,12
	8,53	7,86	7,77	5,71	6,17	5,52	5,73	5,93
20	8,52	7,80	7,82	5,70	6,16	5,69	5,66	6,04

7.1.3 Coagulante M. Oleífera 10(g/L)

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	CANTIDAD EN ML							
0	1	2	3	4	5	6	7	8
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS							
	10	20	30	40	50	60	70	80
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA							
	30 Sg - 200 RPM							
	TIEMPO MEZCLA LENTA							
	30 min - 45 RPM							
	NTU FINAL							
	10,8	10,1	7,37	7,03	5,7	5,84	5,14	4,87
	10,7	9,9	7,34	6,82	5,78	5,95	5,04	4,96
	10,7	10,1	7,5	6,7	5,72	6,16	5,11	4,87
20	10,73	10,03	7,40	6,85	5,73	5,98	5,10	4,90

7.1.4 Coagulante M. Oleífera 10(g/L) Antiguo.

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	CANTIDAD EN ML							
0	1	2	3	4	5	6	7	8
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS							
	10	20	30	40	50	60	70	80
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA							
	30 Sg - 200 RPM							
	TIEMPO MEZCLA LENTA							
	30 min - 45 RPM							
	NTU FINAL							
	18,2	15,1	8,48	7,89	7,1	7	6,56	6,47
	17,4	14,8	8,42	7,64	7,18	7,79	6,46	6,39
	17,6	14,8	8,43	7,63	6,96	7,01	6,63	6,47
20	17,73	14,90	8,44	7,72	7,08	7,27	6,55	6,44

7.1.5 Coagulante M. Oleífera 20(g/L)

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
	30 Sg - 200 RPM								
	TIEMPO MEZCLA LENTA								
	30 min - 45 RPM								
	NTU FINAL								
	10,7	7,63	9,84	9,5	9,42	7,85	4,07	5,25	
	11,2	7,33	9,73	9,31	9,44	7,58	4,05	5,32	
	10,9	7,75	9,74	9,7	9,26	7,82	4,11	5,31	
20	10,93	7,57	9,77	9,50	9,37	7,75	4,08	5,29	

7.1.6 Coagulante M. Oleífera 20(g/L) Antiguo

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
	30 Sg - 200 RPM								
	TIEMPO MEZCLA LENTA								
	30 min - 45 RPM								
	NTU FINAL								
	15	12,2	5,37	5,23	6,69	8,71	7,38	9,27	
	15,2	12,3	5,35	5,32	7,11	8,73	7,26	9,21	
	15	12,1	5,4	5,52	7,49	8,79	7,14	9,16	
20	15,07	12,20	5,37	5,36	7,10	8,74	7,26	9,21	

7.1.7 Coagulante M. Oleífera 30(g/L)

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	30	60	90	120	150	180	210	240	
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
	30 Sg - 200 RPM								
	TIEMPO MEZCLA LENTA								
	30 min - 45 RPM								

NTU FINAL								
	11,2	7,17	6,46	8,02	4,85	6,42	3,73	6,23
	11,2	7,25	5,99	7,96	5,19	6,22	3,98	5,71
	10,8	7,58	6,6	7,98	5,42	6,32	3,84	6,31
20	11,07	7,33	6,35	7,99	5,15	6,32	3,85	6,08

7.1.8 Coagulante M. Oleífera 30(g/L) Antiguo

NTU INICIAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
CANTIDAD EN ML								
0	1	2	3	4	5	6	7	8
CANTIDAD EN MILIGRAMOS								
	30	60	90	120	150	180	210	240
TIEMPO MEZCLA RÁPIDA								
30 Sg - 200 RPM								
TIEMPO MEZCLA LENTA								
30 min - 45 RPM								
NTU FINAL								
	8,46	5,01	3,91	5,25	5,26	3,87	5,64	5,14
	8,38	5,4	3,9	5,62	4,59	4,13	6,47	5,17
	8,66	5,19	3,78	5,2	4,9	3,67	6,57	5,31
20	8,50	5,20	3,86	5,36	4,92	3,89	6,23	5,21

7.1.9 Replica de resultados óptimos de cada coagulante

1	Coagulante	M. Horno 10(g/L)	M. Horno 20(g/L)	M. 10(g/L)	M. 20(g/L)	m. 30(g/L)	M. 10(g/L) A	M. 20(g/L) A	M. 30(g/L) A
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
Resultado	3,59	5,87	4,87	4,07	3,73	6,47	5,23	3,91	
	3,43	5,52	4,96	4,05	3,98	6,39	5,32	3,9	
	3,50	5,71	4,87	4,11	3,84	6,47	5,52	3,78	
Promedio	3,51	5,70	4,90	4,08	3,85	6,44	5,36	3,86	

2	Coagulante	M. Horno 10(g/L)	M. Horno 20(g/L)	M. 10(g/L)	M. 20(g/L)	m. 30(g/L)	M. 10(g/L) A	M. 20(g/L) A	M. 30(g/L) A
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
Resultado	3,40	5,75	4,65	4,10	3,65	6,32	5,24	3,83	
	3,55	5,34	4,32	4,01	3,54	6,40	5,54	3,71	
	3,32	5,47	4,70	4,08	3,23	6,52	5,20	3,69	
Promedio	3,42	5,52	4,56	4,06	3,47	6,41	5,33	3,74	

3	Coagulante	M. Horno 10(g/L)	M. Horno 20(g/L)	M. 10(g/L)	M. 20(g/L)	m. 30(g/L)	M. 10(g/L) A	M. 20(g/L) A	M. 30(g/L) A
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
	Resultado	3,62	5,34	4,56	4,10	3,45	6,43	5,19	3,89
		3,54	5,81	4,76	4,03	3,23	6,54	5,23	3,78
		3,29	5,80	4,69	4,12	3,22	6,65	5,19	3,79
Promedio	3,48	5,65	4,67	4,08	3,30	6,54	5,20	3,82	

7.2 Resultados mezcla de Coagulantes M. Oleífera– Sulfato de Aluminio Clima Soleado

7.2.1 M. Oleífera Horno 10(g/L) + Sulfato Aluminio 5 mg/L

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML DE SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	4,7	2,87	1,58	1,15
	4,5	2,87	1,58	1,12
	4,66	3,01	1,61	1,1
20	4,62	2,92	1,59	1,12

7.2.2 M. Oleífera Horno 20(g/L) + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	4	4	4	4
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			

	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	3,48	3,65	0,95	0,81
	3,69	3,49	1,04	0,86
	3,69	3,58	0,98	0,81
20	3,62	3,57	0,99	0,83

7.2.3 M. Oleífera 10(g/L) + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	3,17	1,94	1,34	0,98
	3,43	1,97	1,32	1,03
	3,22	2,08	1,34	0,96
20,00	3,27	2,00	1,33	0,99

7.2.4 M. Oleífera 20(g/L) + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	7	7	7	7
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			

	5,83	4,98	2,55	1,85
	5,56	5,14	2,33	1,91
	5,68	5,35	2,38	1,91
20,00	5,69	5,16	2,42	1,89

7.2.5 M. Oleífera 30(g/L) + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	7	7	7	7
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	9,77	9,92	6,71	6,52
	9,95	10	6,64	6,43
	9,8	10,2	6,41	6,5
20,00	9,84	10,04	6,59	6,48

7.2.6 M. Oleífera 10(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	2,76	1,45	0,79	0,7
	2,69	1,38	0,8	0,76
	2,76	1,43	0,82	0,72
20,00	2,74	1,42	0,80	0,73

7.2.7 M. Oleífera 20(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	4	4	4	4
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	3,48	4,48	2,97	2,1
	3,52	4,4	2,95	2,08
	3,43	4,47	3,18	2,19
20,00	3,48	4,45	3,03	2,12

7.2.8 M. Oleífera 30(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5 (mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	3	3	3	3
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	5,54	3,75	3,14	2,7
	5,59	3,75	3,15	2,73
	5,46	3,67	3,35	2,55
20,00	5,53	3,72	3,21	2,66

7.2.9 Replica de resultados óptimos de cada mezcla de coagulante

1	Coagulant e	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	M. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	1,5	2	2	2	1,5	2	2
	Cantidad (mL) MO	8	4	8	7	7	8	4	3
	Resultado	1,15	0,95	2,44	1,85	6,52	0,79	2,1	2,7
		1,12	1,04	2,45	1,91	6,43	0,8	2,08	2,73
		1,1	0,98	2,42	1,91	6,5	0,82	2,19	2,55
Promedio	1,12	0,99	2,44	1,89	6,48	0,80	2,12	2,66	

2	Coagulant e	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	M. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
	Resultado	1,16	0,97	2,44	1,86	6,51	0,88	2,10	2,72
		1,15	0,99	2,43	1,89	6,40	0,76	2,00	2,56
		1,03	1,01	2,43	1,91	6,49	0,81	2,20	2,63
Promedio	1,11	0,99	2,43	1,89	6,47	0,82	2,10	2,64	

3	Coagulant e	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	M. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
	Resultado	1,12	0,95	2,39	1,85	6,50	0,79	2,09	2,76
		1,12	0,89	2,40	1,88	6,40	0,77	2,01	2,77
		1,1	0,97	2,31	1,89	6,45	0,80	2,26	2,50
Promedio	1,11	0,94	2,37	1,87	6,45	0,79	2,12	2,68	

7.3 Resultados mezcla de Coagulantes M. Oleífera– Sulfato de Aluminio Clima Soleado

7.3.1 M. Oleífera Horno 10 (g/L) + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			

0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	8,29	7,24	2,46	1,13
	8,33	7,18	2,42	1,06
	8,26	7,19	2,48	1,07
60,00	8,29	7,20	2,45	1,09

7.3.2 M. Oleífera Horno 20(g/L) + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	4	4	4	4
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	12,5	10,4	4,74	1,39
	12,5	10,1	4,67	1,39
	12,5	10,4	4,68	1,35
60,00	12,50	10,30	4,70	1,38

7.3.3 M. Oleífera 10(g/L) + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2

	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	10,8	5,96	2,75	2,44
	11	6,02	2,78	2,45
	11,1	6	2,75	2,42
60,00	10,97	5,99	2,76	2,44

7.3.4 M. Oleífera 20(g/L) + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	7	7	7	7
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	2,6	1,56	0,95	1,14
	2,62	1,55	1	1,19
	2,62	1,51	0,99	1,14
60,00	2,61	1,54	1,00	1,16

7.3.5 M. Oleífera 30(g/L) + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	7	7	7	7
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			

TIEMPO MEZCLA LENTA				
20 min - 45 RPM				
NTU FINAL				
	6,65	2,79	1,68	1,45
	6,66	2,74	1,77	1,44
	6,59	2,77	1,82	1,45
60,00	6,63	2,77	1,76	1,45

7.3.6 M. Oleífera 10(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	8	8	8	8
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	12,7	7,51	6,04	1,92
	13	7,29	6,03	1,8
	13,1	7,31	5,99	1,85
60,00	12,93	7,37	6,02	1,86

7.3.7 M. Oleífera 20(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	4	4	4	4
	CANTIDAD EN ML SA mL			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	21,6	12,9	3,53	2,14

	21,1	12,8	3,46	2,17
	21,1	12,8	3,52	2,1
60,00	21,27	12,83	3,50	2,14

7.3.8 M. Oleífera 30(g/L) Antiguo + Sulfato Aluminio 5(mg/L)

P0	P1	P2	P3	P4
NTU INICIAL	CANTIDAD EN ML MO			
0	3	3	3	3
	CANTIDAD EN ML SA			
0	0,5	1	1,5	2
	CANTIDAD EN MILIGRAMOS SA			
	2,5	5	7,5	10
	TIEMPO MEZCLA RÁPIDA			
	30 Sg - 200 RPM			
	TIEMPO MEZCLA LENTA			
	20 min - 45 RPM			
	NTU FINAL			
	2,98	2,14	1,17	1,4
	3,04	2,13	1,23	1,33
	3,06	2,12	1,19	1,38
60,00	3,03	2,13	1,20	1,37

7.3.9 Replica de resultados óptimos de cada mezcla de coagulante

1	Coagulante	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	m. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5
Cantidad (mL) MO	8	4	8	7	7	8	4	3	
Resultado	1,13	1,39	2,44	0,95	1,45	1,92	2,14	1,17	
	1,06	1,39	2,45	1	1,44	1,8	2,17	1,23	
	1,07	1,35	2,42	0,99	1,45	1,85	2,1	1,19	
Promedio	1,09	1,38	2,44	0,98	1,45	1,86	2,14	1,20	

2	Coagulante	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	m. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5
Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3	

	Resultado	1,15	1,38	2,43	0,97	1,42	1,90	2,15	1,19
		1,06	1,39	2,40	1,40	1,44	1,72	2,16	1,20
		1,09	1,33	2,44	1,00	1,46	1,84	2,75	1,19
	Promedio	1,10	1,37	2,42	1,12	1,44	1,82	2,35	1,19

3	Coagulante	M. Horno 10(g/L) + SA	M. Horno 20(g/L) + SA	M. 10(g/L) + SA	M. 20(g/L) + SA	m. 30(g/L) + SA	M. 10(g/L) A + SA	M. 20(g/L) A + SA	M. 30(g/L) A + SA
	Cantidad (mL) SA	2	2	2	1,5	2	2	2	1,5
	Cantidad (mL)	8	4	8	7	7	8	4	3
	Resultado	1,14	1,38	2,42	0,96	1,44	1,93	2,15	1,20
		1,03	1,34	2,46	1,30	1,42	1,82	2,18	1,19
		1,08	1,36	2,43	0,90	1,45	1,83	2,80	1,18
	Promedio	1,08	1,36	2,44	1,05	1,44	1,86	2,38	1,19