

**Determinación del efecto del coagulante natural de Moringa en el proceso de
desinfección de acuerdo con la dosis de cloro requerida**

Julián David Martínez Pedraza y Zorangie Lorena Pedraza Torres

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

Director

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Ingeniero Ambiental

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de ingenierías y arquitectura

Ingeniería civil

2022

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo ante todo a Dios, por permitirme estar aquí y llegar a este momento trascendental de mi formación profesional. A mis padres Juan Pedraza Lozano y Marleny Torres Mondragón, que con su amor, paciencia, trabajo, sacrificio y apoyo incondicional me han permitido llegar a cumplir mis sueños. A mi hermano, el cual siempre sentí conmigo a pesar de su ausencia física y aunque no estuviésemos juntos y nos faltaron tantas experiencias y momentos, sé que este sería tan especial para él como lo es para mí. A mi familia por siempre estar pendiente y dispuestos a celebrar mis logros y a mis amigos que conocí a lo largo de este proceso y los cuales me extendieron su mano en los momentos difíciles.

Zorangie Lorena Pedraza Torres.

Este trabajo es dedicado a todas las personas que lo lean. Es el resultado de las motivaciones no sólo de uno de sus autores, sino de muchas personas y seres que de forma directa o indirecta aportaron en su desarrollo, cuya ayuda fue desde una palabra de ánimo hasta la guía académica.

Julián David Martínez Pedraza.

Contenido

Introducción	11
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
2. Marco referencial	18
2.1. Recurso hídrico	19
2.2. Tratamiento de agua.....	20
2.3. Coagulación.....	22
2.3.1. Coagulantes metálicos.....	23
2.3.2. Coagulantes naturales o Bio-coagulantes.....	24
2.4. Filtración	25
2.5. Desinfección.....	25
3. Metodología	27
3.1. Etapa 1. Caracterización física y química de las muestras en sus condiciones iniciales ...	27
3.1.1. Actividad 1.1. Recolección y preparación de las muestras	27
3.1.2. Actividad 1.2. Determinación de los parámetros iniciales de las muestras.....	29
3.2. Etapa 2. Preparación y aplicación del proceso de coagulación.....	30
3.2.1. Actividad 2.1. Preparación del coagulante	30
3.2.2. Actividad 2.2. Control de pH y dosis óptima de coagulante	34

3.2.3. Actividad 2.3. Simulación de coagulación	36
3.3. Etapa 3. Análisis de la influencia de la moringa en el proceso de desinfección y de las dosis requeridas.	37
3.3.1. Actividad 3.1. Análisis de coliformes totales y filtración	37
3.3.2. Actividad 3.2. Análisis de dosis de cloro y formación THM	38
4. Resultados	38
4.1. Etapa 1. Caracterización física y química de las muestras en sus condiciones iniciales ...	38
4.2. Etapa 2. Preparación y aplicación del proceso de coagulación	40
4.3. Etapa 3. Análisis de la influencia de la moringa en el proceso de desinfección y de las dosis requeridas.	52
6. Conclusiones	62
Referencias	63

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Tecnologías para el tratamiento</i>	21
Tabla 2. <i>Cálculo de dosis de coagulante de Moringa en mL</i>	35
Tabla 3. <i>Cálculo de dosis de coagulante de Sulfato de Aluminio en mL</i>	35
Tabla 4. <i>Parámetros iniciales In Situ</i>	39
Tabla 5. <i>Parámetros iniciales de las muestras en laboratorio</i>	39
Tabla 6. <i>Remoción de turbidez luego del uso del coagulante de Moringa</i>	40
Tabla 7. <i>Camino de máximo ascenso para remoción de turbidez del coagulante de Moringa</i> ...	45
Tabla 8. <i>Datos de la proyección con el modelo de regresión polinómica para el coagulante de Moringa</i>	47
Tabla 9. <i>Dosis requerida coagulante de Moringa</i>	47
Tabla 10. <i>Camino de máximo ascenso para remoción de turbidez del sulfato de aluminio</i>	48
Tabla 11. <i>Datos de la proyección con el modelo de regresión polinómica para el Sulfato de aluminio</i>	49
Tabla 12. <i>Dosis requerida coagulante de Sulfato de Aluminio</i>	50
Tabla 13. <i>Ensayo final de coagulante de Moringa con la dosis requerida</i>	50
Tabla 14. <i>Ensayo final del coagulante de sulfato con la dosis requerida</i>	51
Tabla 15. <i>Resultados del análisis de coliformes totales y su remoción de acuerdo con el coagulante utilizado</i>	53
Tabla 16. <i>Análisis de correlación</i>	54
Tabla 17. <i>Análisis de eliminación de coliformes luego de la filtración</i>	55
Tabla 18. <i>Análisis de remoción de turbidez luego de la filtración.</i>	56
Tabla 19. <i>Valores de K (mg-min/L) para inactivación Giardia por cloro libre log 2</i>	57

Tabla 20. *Tiempo de detención con pH 6 y temperatura 15 °C para Sulfato de Aluminio 58*

Tabla 21. *Valores de K (mg-min/L) para inactivación Giardia por cloro libre log 3..... 59*

Tabla 22. *Tiempo de detención con pH 7,5 y temperatura 15 °C para Moringa 60*

Lista de figuras

Figura 1. <i>Esquema sistema convencional</i>	22
Figura 2. <i>Etapas de la metodología</i>	27
Figura 3. <i>Toma de temperatura y pH en el punto de captación</i>	28
Figura 4. <i>Semillas de Moringa descascaradas</i>	30
Figura 5. <i>Semillas de Moringa secadas</i>	31
Figura 6. <i>Proceso de trituración de la materia prima y pesado del polvo</i>	31
Figura 7. <i>Mezcla del polvo de semilla de Moringa con la solución NaCl</i>	32
Figura 8. <i>Filtración del coagulante y refrigeración.</i>	33
Figura 9. <i>Balanza para medición de coagulantes</i>	34
Figura 10. <i>Ajuste de pH de muestra de agua cruda de río</i>	34
Figura 11. <i>Proceso de mezcla de coagulante</i>	36
Figura 12. <i>Proceso de sedimentación en vasos de precipitado</i>	37
Figura 13. <i>Diagrama de Pareto estandarizado para coagulante de Moringa</i>	42
Figura 14. <i>Diagrama de contorno para los efectos de la dosis y el pH en la remoción de turbidez</i>	43
Figura 15. <i>Efectos de los factores en el porcentaje de remoción (Moringa)</i>	44
Figura 16. <i>Interacción entre factores para el coagulante de Moringa</i>	45
Figura 17. <i>Determinación de la dosis requerida del coagulante de Moringa</i>	46
Figura 18. <i>Determinación de la dosis requerida del Sulfato de aluminio</i>	49
Figura 19. <i>Proceso de sedimentación luego del uso la dosis requerida del coagulante de Moringa</i>	51

Figura 20. <i>Proceso de sedimentación luego del uso la dosis requerida del coagulante Sulfato de Aluminio.....</i>	52
Figura 21. <i>Relación de remoción de coliformes y turbiedad luego del uso de los dos coagulantes</i>	54
Figura 22. <i>Correlación entre tiempo de detención para Sulfato de Aluminio y Moringa</i>	60

Resumen

El objetivo de este trabajo fue conocer el efecto de la semilla de Moringa Oleífera como coagulante natural del agua en el proceso de desinfección, de acuerdo con la dosis de cloro requerida, teniendo en cuenta que el cloro al reaccionar con la materia orgánica de la materia prima puede producir cloroformo. El cloroformo puede generar un riesgo para la salud de los habitantes de zonas rurales que suelen potabilizar el agua de esta manera. Este proyecto se realizó con muestras de agua cruda del río Magdalena, tratadas por medio del ensayo de jarras con coagulante de moringa y un coagulante químico como parámetro de referencia, midiendo posteriormente el porcentaje de remoción de coliformes. Los resultados de los ensayos indicaron que la semilla de moringa tiene una alta efectividad de remoción de turbidez, sin embargo, no presenta esta misma acción en cuanto a la eliminación de coliformes totales. Se concluyó que al emplear la moringa como coagulante se necesita el uso de una mayor dosis de cloro en el proceso de desinfección, por lo que es recomendable hacer un control de la concentración de trihalometanos luego de la desinfección final, esto debido a que el coagulante de Moringa produce hasta 10.5 veces más trihalometanos, incrementando el riesgo del consumo de compuestos químicos como el cloroformo.

Palabras clave: coagulante natural, moringa oleífera, turbiedad, dosis de cloro, coliformes totales

Abstract

The objective of this work was to find the effect of the *Moringa Oleifera* seed as a natural coagulant of the water in the disinfection process, according to the dosage of chlorine required, considering that the chlorine react with the organic matter of the raw material can produce chloroform, this can pose a health risk to residents of rural areas who typically purify water by this way. The present project was carried out with samples of raw water from the Magdalena River, treated by means of the jar test with moringa coagulant and a chemical coagulant as a reference parameter, subsequently measuring the percentage of coliform removal. The results of the tests indicated that the moringa seed has a high effectiveness for turbidity removal, however, it does not present the same action regarding the elimination of total coliforms. It was concluded that using moringa as a coagulant requires the use of a higher dosage of chlorine in the disinfection process, so it is advisable to control the concentration of trihalomethanes after the final disinfection, because the coagulant of *Moringa* produces up to 10.5 times more trihalomethanes, increasing the risk of consuming chemical compounds such as chloroform.

Keywords: natural coagulant, moringa *Oleifera*, turbidity, chlorine dosage, total coliforms.

Introducción

El servicio de agua potable para una comunidad está determinado por diversos factores que van desde un aspecto administrativo hasta condiciones ambientales que afectan la disponibilidad y la calidad de las fuentes hídricas, esto ha provocado que una parte de la población se vea afectada negativamente por no contar con acceso al servicio público básico que cumpla los estándares de calidad para el consumo, pues de acuerdo con un nuevo informe de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud “Miles de millones de personas en todo el mundo aún carecen de acceso al agua, el saneamiento y la higiene” [1] en especial aquellas comunidades en zonas apartadas de los espacios urbanos.

A lo largo de los años se han empleado diversos procesos para mejorar la calidad del agua luego de su captación, dentro de estos [2] se nombra que el uso de la Moringa Oleífera como coagulante natural ha sido una de las alternativas más novedosas para los habitantes de condiciones socioeconómicas bajas, que no tienen acceso a un servicio de agua potable y que, de acuerdo con los estudios, es uno de los más efectivos en cuanto a la remoción de turbidez. Sin embargo, estas personas suelen potabilizar el agua a su manera, de acuerdo con la Comisión Nacional de Agua “la desinfección con cloro es el tratamiento más utilizado en las zonas rurales” sin embargo, las dosis de cloro activo pueden generar un riesgo para la salud humana [3], citado en [4, p. 50].

Este coagulante natural de acuerdo con [5], presenta efectos negativos que conllevan a la creación de cloroformo a causa de la reacción del cloro con la materia orgánica que ésta libera. Por esta razón es importante conocer la influencia de este coagulante en la dosis de cloro requerida en la etapa de desinfección de modo que se eviten riesgos en la salud de las personas que usan esta técnica, así mismo, realizar un aporte teórico, ya que de acuerdo con la revisión bibliográfica no se encuentra ningún documento que especifique el impacto de este coagulante en la etapa de

desinfección, la mayoría se centra en la efectividad como removedor de turbiedad en la fase de coagulación y floculación del tren de tratamiento.

El presente proyecto se realiza con muestras de agua del río Magdalena tomadas en el municipio de Barrancabermeja en el departamento de Santander, buscando mejorar las condiciones de calidad de vida de los habitantes mediante la potabilización segura del agua, que se espera pueda ser aplicada no solo a esta zona en específico sino que pueda replicarse en comunidades de Colombia que presentan condiciones similares, apoyando el desarrollo de conocimiento y el mejoramiento de problemáticas que esperan ser solucionadas con urgencia por su impacto social.

En este informe se expone la situación problemática que se desea resolver, el impacto que generaría este proyecto, así como sus objetivos y los antecedentes más relevantes, además, contiene un marco referencial y conceptual donde se encontrarán los aspectos que permiten fundamentar la investigación, un marco contextual y legal que permite localizar el proyecto y tener en cuenta la normativa y reglamentación respectivamente. Por otra parte, se describe la metodología por medio de fases explicando con brevedad como se realizó la ejecución del proyecto y finalmente se encuentran los respectivos resultados, conclusiones y recomendaciones.

1. Determinación del efecto del coagulante natural de Moringa en el proceso de desinfección de acuerdo con la dosis de cloro requerida.

1.1 Planteamiento del problema

El ministerio de la protección social [6] describe que el agua potable hace referencia a aquella que es apta para el consumo humano debido a sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas. Por lo que, para el cumplimiento de estas características es necesario el proceso de coagulación, definido en [7] como el proceso más importante en el tratamiento convencional del agua. Su utilización incluye la eliminación de sólidos en suspensión, a través de la adición de coagulantes químicos para lo cual, el coagulante de uso común es el sulfato de aluminio, que ha demostrado ser un buen agente removedor de turbidez y de color [8]. No obstante, este procedimiento puede ser muy costoso, necesita de un sistema de remediación para su utilización y además puede afectar el pH del agua tratada.

Sin embargo, de acuerdo con [2] los habitantes de zonas de escaso acceso y condiciones socioeconómicas bajas utilizan coagulantes naturales para potabilizar el agua, lo cual ha sido una buena alternativa para la potabilización. Por su parte, [8], [7] plantean en sus investigaciones que la Moringa Oleífera así como otras plantas se pueden utilizar y empelar en el tratamiento del agua. Además de este, muchos estudios han puesto en práctica el uso de la Moringa Oleífera como coagulante en la potabilización del agua, presentando resultados de porcentajes de reducción de la turbidez mayores en comparación con el aluminio.

El uso de las semillas de Moringa Oleífera según [9] es una planta que sobresale por su efecto clarificante que desde la época de los 90's era conocido y usado por las mujeres de las zonas rurales de Sudán para tratar la aguas de considerablemente turbias del río Nilo. Ésta, además, se

ha examinado como desinfectante para el tratamiento del agua en muchos países de África y América Latina inicialmente por las comunidades indígenas [10]. Y desde entonces y hasta el momento se ha utilizado como coagulante pero no se ha llevado a cabo ninguna implementación de los estudios con el fin de conocer su reacción en el proceso de desinfección.

El ministerio de vivienda, ciudad y territorio [11] revela que históricamente la zona urbana ha presentado mejor calidad del agua que la zona rural, debido a que las zonas rurales se abastecen de agua cruda la cual es poco atractiva y muy desagradable para el consumo humano. Por anterior, esta situación se centra en esas comunidades que se encuentran en zonas lejanas del centro poblado, que se abastecen del agua del Río Magdalena y que se ven obligadas a usar coagulantes naturales para purificar el agua de su consumo.

Ahora bien, de acuerdo con [12] la técnica de desinfección más utilizado en las estructuras de zonas rurales es el cloro por medio del hipoclorito, debido a que es práctico, fácil de usar y de transportar. Sin embargo, el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico [13] describe que este producto es costoso, inestable y además contiene una baja concentración de cloro activo, lo que implica que su uso sea en mayor medida para que logre desinfectar el agua. Conforme a esto último es importante resaltar que de acuerdo con [4], el mal uso de este o uso excesivo y durante largos periodos de tiempo debido al desconocimiento de las comunidades puede generar subproductos del cloro como trihalometanos (cloroformo) y ácidos acéticos halógenos, que puede ocasionar dificultades en la salud humana.

Según [14] en su estudio “Sustancias Naturales: Alternativa para el Tratamiento de Agua del Río Magdalena en Palermo, Colombia” investigó que de acuerdo con la Resolución [15] del Ministerio del Ambiente que establece la normativa de calidad de agua para el consumo humano, el Río Magdalena cuenta con una alta carga de sedimento y contaminantes debido a que atraviesa

todo el país. Esto aumenta los riesgos para la salud de la población local, por ello en su investigación usó la Moringa como coagulante para tratar el agua obteniendo resultados efectivos para deshacerse de la turbidez y el mal color del agua recolectada en el río Magdalena.

En efecto, de acuerdo con investigaciones anteriormente nombradas las semillas de moringa oleífera permiten obtener un coagulante natural efectivo, sin embargo, no se conoce su influencia en los siguientes procesos del tren de tratamiento. De acuerdo con [5] en su estudio a las aguas del río Magdalena, el empleo del extracto acuoso de Moringa oleífera como coagulante tiene inconvenientes relacionados con la liberación de materia orgánica de las semillas al agua durante su purificación, de lo cual se puede deducir, que el uso la moringa puede tener un comportamiento inadecuado en el proceso de desinfección, por lo que es importante conocer cómo influye ésta en la dosis de cloro, ya que como se menciona en el mismo estudio “el cloro al reaccionar con la materia orgánica genera presencia de sustancias químicas nocivas ya que supera el número permitido de Trihalometanos”. Es por esta razón, que un aporte de información en cuanto a si la moringa contribuye o no a un mayor porcentaje de remoción de coliformes, con el fin de reducir la dosis de cloro activo en el proceso de desinfección, es una buena alternativa, ya que este componente teórico beneficiaría a todas aquellas personas que hacen uso de éste sin ninguna restricción.

1.2 Justificación

En el campo investigativo se ha evidenciado mayor interés en el análisis de diferentes plantas que tienen propiedades que permiten usar una parte de ellas para la fabricación de coagulantes naturales. Este fenómeno se ha presentado en Colombia llevando incluso a la presentación de artículos como [16] en donde se presenta información de este tipo de coagulantes

a partir del año 2000. En el documento se presenta un coagulante a base de las semillas de Moringa oleífera, en dónde las investigaciones confieren eficiencias de remoción de hasta 99.9%, esto resalta más los diversos usos de la planta como los mencionados en [17] quién además de las aplicaciones industriales, cosméticas y medicinales, emplea a la moringa en la purificación de aguas crudas con la extracción de harina de las semillas bajo un procedimiento netamente físico. Adicionalmente, la gran variedad de usos y el creciente interés por esta planta ha llevado a diversos autores a analizar su viabilidad como coagulante. En [18] presentan aspectos importantes para el desarrollo de un coagulante a nivel comercial, con la información recolectada acerca de la obtención de materia prima, los procesos empleados para su modificación y los costos asociados llegan a concluir una viabilidad del producto según las condiciones del país.

La aplicación de las semillas de moringa como método de purificación del agua en zonas rurales es una opción mucho más ventajosa en comparación con coagulantes convencionales como el sulfato. De acuerdo con [4] éste último es relativamente sensible al pH, lo que dificulta su purificación en estas zonas, por otro lado, la efectividad de la moringa oleífera sólo depende de la turbiedad y la temperatura, independientemente del pH. Así mismo, estudios como [19], afirman que todos los materiales de construcción son heterogéneos formados por una combinación de diferentes materiales mineralógicamente similares, entre los cuales se encuentra el sulfato, los cuales pueden ser atacados por el mismo tipo de microorganismos. Lo anterior, provoca decoloración en las superficies e incremento en el desgaste no biológico por acción fisicoquímica, además capaz de con el tiempo llegar a destruir un aglutinante del concreto.

Por otra parte, investigaciones como [20] (citado por [21, p. 13]), emplean muestras de agua de río como en el caso de los autores es el Sinú en el departamento de Córdoba, allí analizan el uso de la semilla de Moringa como coagulante y los efectos de esta sobre el pH y la alcalinidad.

Para el proyecto estas muestras de fuentes naturales serán obtenidas del río Magdalena debido a su importancia a nivel nacional y al número elevado de comunidades que pueden llegar a captar sus aguas. Según lo presentado por [14] respecto a [15] y la información contenida en ella se considera importante al río Magdalena por su recorrido en gran parte del territorio colombiano y como esto hace que su nivel de cargas sedimentarias y contaminantes sea elevado. Adicionalmente [22] informa que la calidad de la potabilización y tratamiento del agua en el Magdalena es muy baja, ya que el 22% de las ciudades de la cuenca Magdalena han demostrado mediante estudios que sus habitantes presentan enfermedades a causa de la calidad del mismo río, esto señala la importancia de realizar investigaciones que permitan alternativas a los procesos de potabilización a comunidades que usen como fuente de captación al Río Magdalena.

La consideración de revisar si en el proceso de coagulación se remueve un porcentaje mayor o menor de coliformes se realiza con el fin de conocer la dosis de agentes desinfectantes requerida a emplear de manera que esto no llegue a ocasionar daños en la salud. [23], citado en [5, p. 38] resalta que el uso de cloro y la materia orgánica presente genera reacciones químicas que dan lugar a una variedad de subproductos tóxicos y cancerígenos que incluyen trihalometanos. Por otra parte, esta investigación sería un aporte a la literatura, ya que en la revisión bibliográfica no se encuentra información acerca de la influencia de la moringa como coagulante natural en la dosis de cloro, es decir, no se ha hallado ningún documento donde se mencione este parámetro en el proceso de desinfección.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el efecto que presenta el coagulante natural de moringa respecto a la dosis requerida de cloro en el proceso de desinfección, mediante la eficiencia de remoción de coliformes en muestras de agua cruda del río Magdalena.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las condiciones iniciales correspondiente a los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua cruda del río Magdalena.
2. Establecer la eficiencia de remoción de turbidez de acuerdo con la dosis óptima de coagulante empleado a base de Moringa y sulfato de aluminio.
3. Distinguir las dosis de cloro requeridas posterior al uso del coagulante natural y su efecto en la desinfección de acuerdo con el porcentaje de eliminación de coliformes totales.

2. Marco referencial

La información que se presenta en el siguiente marco referencial, permite identificar los antecedentes, teorías y conceptos fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Inicialmente se define el recurso hídrico para establecer las características y parámetros del agua. De igual forma, se presenta el concepto de tratamiento de agua que está compuesto por etapas, de las que se definen coagulación, filtración y desinfección.

Dentro de la etapa de coagulación se exponen los coagulantes naturales con un énfasis especial en los coagulantes de Moringa y se presentan de la misma forma los coagulantes metálicos

que son considerados de uso convencional y que se emplean como parámetro de referencia en esta investigación. Adicionalmente, se explica el ensayo de jarras el cual es empleado en la investigación para determinar la eficiencia de los coagulantes en el proceso de coagulación.

Para la etapa de filtración se presentan los conceptos normativos de filtración lenta y filtración rápida seguido de las condiciones de calidad del agua con las que se define el tipo de filtración requerida.

Con la desinfección como última etapa, se definen los parámetros normativos que determinan el tipo de desinfectante a emplear y las condiciones del agua que determinan la dosis de este. Adicionalmente, se expone en qué consiste el método de filtración de membrana el cual es empleado en la investigación para determinar la calidad de las muestras de agua a desinfectar a partir de la definición de coliformes totales. Finalmente, se mencionan los parámetros del agua que se deben controlar luego de la desinfección, incluyendo la definición de los trihalometanos como principal indicador de riesgo para la calidad del agua luego del tratamiento.

2.1. Recurso hídrico

El agua cruda es definida como aquella que no ha sido sometida a ningún proceso a tratamiento que busque modificar sus parámetros a rangos de potabilización [6, p. 1]. El agua con estas características iniciales se obtiene de una fuente de abastecimiento que consiste en un depósito o cuerpo de agua que puede ser superficial o subterráneo y que es identificado como punto de origen del suministro para un sistema de abastecimiento a una población [6, p. 2].

Para garantizar el consumo del recurso por parte de la población, se realizan un conjunto de operaciones o procesos cuyo objetivo es modificar las características químicas, físicas y microbiológicas del agua cruda [15, p. 2]. Los rangos de cada parámetro que permiten considerar

que el agua es potable son definidos por las diferentes normas nacionales que garantizan que es segura para el consumo humano [6, p. 1]. En Colombia el sector se encuentra regido por el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS), resolución 2115 de 2007 y Decreto 1575 de 2007.

Uno de los criterios físicos de la calidad del agua reglamentado para permitir su consumo es la turbiedad, que no puede superar 2 unidades nefelométricas de turbidez (UNT) [15], este criterio se basa en una propiedad óptica que surge de la cantidad medida de luz reflejada por las partículas en suspensión [24].

En cuanto a las características microbiológicas, se debe garantizar que en coliformes totales el agua destinada al consumo humano tenga un valor de 0 unidades formadoras de colonias por cada 100 centímetros cúbicos ($\frac{UFC}{cm^3}$) a través de la técnica de laboratorio de filtración por membrana [15], en dónde se retienen microorganismos que tienen un tamaño mayor a $0.45 \mu m$ y que consisten en bacterias Gram negativas con la capacidad de fermentación de lactosa a temperaturas entre 35 y $37^\circ C$ produciendo ácido y gas [25].

2.2. Tratamiento de agua

El conjunto de procesos que se emplean para modificar el agua cruda con el fin de lograr condiciones de consumo humano se determina a partir de los contaminantes que contiene el agua proveniente de la fuente de abastecimiento, formando así un tren de tratamiento a partir de procesos unitarios de potabilización [24].

Tabla 1. *Tecnologías para el tratamiento*

Tecnología	Aireación	Coagulación+ Floculación+ Sedimentación	Filtración convencional	Ablandamiento	Oxidación Química	Microfiltración	Ultrafiltración	Nanofiltración	Ósmosis inversa	Electrodialisis Inversa	Intercambio iónico	Filtración por adsorción	Filtración optimizada
Contaminante													
Características físicas													
Color aparente		x	x		x	x	x	x	x			x	x
Olor y sabor	x				x							x	
Turbiedad		x	x			x	x						x
Sólidos disueltos totales		x	x			x	x		x	x	x		x
Características químicas													
Astimonio									x	x			
Arsénico		x	x	x					x	x	x	x	x
Bario				x					x	x	x		
Cadmio		x	x	x					x	x	x		x
Cianuri Libre y disociable					x								
Cloruros							x		x	x			
Cobre		x		x					x		x		
Cromo		x	x	x					x	x	x		x
Dureza				x				x	x	x	x		
Fluoruros				x					x	x		x	
Fosfatos			x						x			x	x
Hierro	x	x	x	x	x						x		x
Manganeso	x	x	x	x	x						x		x
Mercurio				x					x	x			
Molibdeno												x	
Níquel				x					x	x	x		
Nitratos									x	x	x		
Nitritos									x	x	x		
Plomo		x							x		x		
Selenio		x							x	x	x	x	
Sulfatos								x	x	x			
Thialometanos totales	x				x			x			x	x	
Zinc				x					x	x	x		
Carbono orgánico Total		x				x	x	x	x			x	
Pesticidas/Herbicidas Orgánicos sintéticos								x	x			x	
Orgánicos volátiles	x								x			x	
Características Microbiológicas													
Escherichia Coli			x			x	x						x
Giardia y Cryptosporidium						x	x						x

Adaptado de “Resolución 0330 de 2017” por [24]

Con la identificación de cada uno de los procesos unitarios a emplear para tratar el agua cruda se deben tomar en consideración los diferentes parámetros de diseño y condiciones a controlar durante la operación del tren de tratamiento para estabilizar las características del agua a niveles aceptables de consumo para los usuarios [26].

Un sistema convencional de tratamiento de agua potable se encuentra conformado por los procesos representados en la figura 1, en este se observa a la desinfección como proceso adicional a los contenidos en la tabla 1 y esto es debido a que se ha establecido que independientemente de los procesos previos que se empleen, se debe incluir la desinfección para la eliminación de agentes a nivel microbiológico que potencialmente afectan la salud poblacional [26].

Figura 1. Esquema sistema convencional



Adaptado de “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: *título c. Sistemas de Potabilización*” por [26].

2.3. Coagulación

La coagulación es el proceso en el que se logra desestabilizar los coloides al eliminar las propiedades que les mantienen en suspensión [27]. Existen tres tipos de coagulación a partir del mecanismo empleado para la desestabilización de los coloides [26]:

- Adsorción y neutralización de carga: Se fundamenta en la acción de la energía electroquímica al accionar electrostáticamente el coagulante con las partículas suspendidas.
- Barrido: Se da por la adición de cantidades elevadas de sales metálicas como las sales de aluminio o de hierro, las cuales superan el límite de solubilidad del compuesto en el agua llegando a precipitar de forma rápida el hidróxido metálico que atrapa las partículas coloidales.
- Puente químico: Se logra cuando las cadenas poliméricas del coagulante se llegan a entrelazar con las partículas coloidales, uniéndose entre sí.

Para llevar a cabo esta etapa del tratamiento se ejecutan la dosificación y mezcla rápida de los coagulantes y auxiliares de la coagulación para lograr una dispersión rápida y homogénea de estos en el agua [26]. A nivel de laboratorio esto se logra mediante el ensayo de jarras que simula el proceso de coagulación en vasos de precipitado siguiendo las especificaciones de la norma técnica colombiana NTC 3903 con la que se pueden llegar a determinar las dosis óptimas de los coagulantes, tipo de mezcla rápida, pH óptimo, turbiedad residual y variación del pH luego de la coagulación [26].

2.3.1. Coagulantes metálicos

Son el tipo de coagulantes de mayor uso para el tratamiento de aguas crudas, estos tienen su capacidad como coagulantes al ser disueltos debido a que forman compuestos complejos hidratados, entre este tipo de coagulantes se encuentra el sulfato de aluminio, aluminio y el sulfato ferroso [28], citado en [7, p. 254].

2.3.2. Coagulantes naturales o Bio-coagulantes

Estos coagulantes se han empleado como una alternativa que tiene un gran potencial, su producción se da de forma espontánea debido a reacciones bioquímicas que ocurren con algunas plantas, generalmente tienen una baja toxicidad y en su gran mayoría consisten en proteínas solubles en agua [29], [30] (citados en [7, p. 254]).

Uno de los bio-coagulantes más estudiados ha sido el desarrollado a partir de las semillas de Moringa que contienen un aceite comestible con una sustancia soluble en agua, de la que se tienen informes en donde se reporta su uso para aclarar aguas turbias en comunidades rurales en países de África [31], citado en [7, p. 257].

Estas semillas provienen de un árbol que pertenece a la familia Moringaceae que en la actualidad se cultiva en casi la totalidad de las regiones tropicales, subtropicales y semiáridas [32]. Su función coagulante se da gracias a las proteínas tipo solubles que tienen una carga positiva de punto isoeléctrico, que al agregarse al agua atraen las partículas suspendidas con carga negativa. Este componente activo es un péptido catiónico con un alto contenido de glutamina (26%), prolina (6.9%), alanina (6.9%) y aminoácidos como la arginina e histidina [33], citado en [18, p. 35].

Existen diversos métodos para obtener coagulante a partir de semillas de Moringa, sin embargo, hay dos métodos que son los más empleados en los diferentes estudios [18]:

- Extracción acuosa: método en el que se emplea agua destilada con la que se conforma una solución al agregarle la harina de la semilla para obtener el componente activo.
- Extracción salina: técnica en la que se emplea una solución de cloruro de sodio que permite la extracción del componente activo de la harina de la semilla, ya que se ha demostrado un aumento en la eficiencia de la extracción de este componente gracias a la fuerza iónica de la solución.

2.4. Filtración

La filtración es el proceso que permite la separación de partículas y una reducida cantidad de microorganismos con el uso de un medio poroso determinado, permitiendo que el agua tratada llegue a los estándares necesarios para ser considerada agua potable [34].

Existen dos tipos de filtración de acuerdo con el RAS [13]:

- Filtración rápida: esta filtración se debe emplear agua que ha sido tratada de forma previa (Coagulación y/o floculación con o sin sedimentación o flotación) con el fin de lograr remover las partículas restantes que no se hayan retenido en un sedimentador. En este proceso se puede realizar filtración directa o convencional dónde el agua debe presentar valores de turbiedad y color inferiores a 8 UNT y 20-30 UC.
- Filtración lenta: Este tipo de filtración se puede emplear como tratamiento único en agua prefiltrada con el fin de remover partículas más finas, esta debe tener una turbiedad menor a 15 UNT, color inferior a 20 UPC y un NMP de coliformes fecales menor de 500. Mientras que se puede emplear filtración lenta en diversas etapas como un acondicionamiento o pretratamiento del agua obtenida de fuentes superficiales, cuya calidad tiene la posibilidad de causar interferencia en los mecanismos de purificación. En estos casos se debe tener un color menor a 30 UPC y turbiedad inferior a 80 UNT.

2.5. Desinfección

Este es un proceso obligatorio en los sistemas de potabilización sin importar qué unidades previas de tratamiento se hayan empleado. Una de las formas más comunes para su realización es la cloración, que consiste en la utilización de cloro gaseoso o sales de cloro debido a su reducido costo relativo y a su alto efecto germicida residual [26].

La determinación de la dosis del desinfectante se debe realizar mediante el método concentración-tiempo que es definido en el RAS. En este método se establece una constante “K” que parte de la multiplicación de la concentración aplicada de desinfectante “C” por el tiempo de detención “t” que corresponde al tiempo desde que se aplica la dosis hasta el momento en el que se consume el agua. De esta forma el RAS establece ciertas condiciones para los valores de K y a partir de los tiempos de detención se determinan las dosis a emplear [26].

La cantidad de cloro requerida depende de la cantidad de contaminación microbiológica del agua, por lo tanto, entre más organismos patógenos logren pasar los tratamientos previos a la desinfección, más alta deberá ser la dosis empleada. Adicionalmente, estos patógenos pueden llegar a presentar una resistencia mayor a los desinfectantes en situaciones en las que el agua contiene una turbiedad mayor de 2.0 UNT, debido a que las partículas en suspensión llegan a encapsular al patógeno, protegiéndolo de la acción germicida del cloro [26].

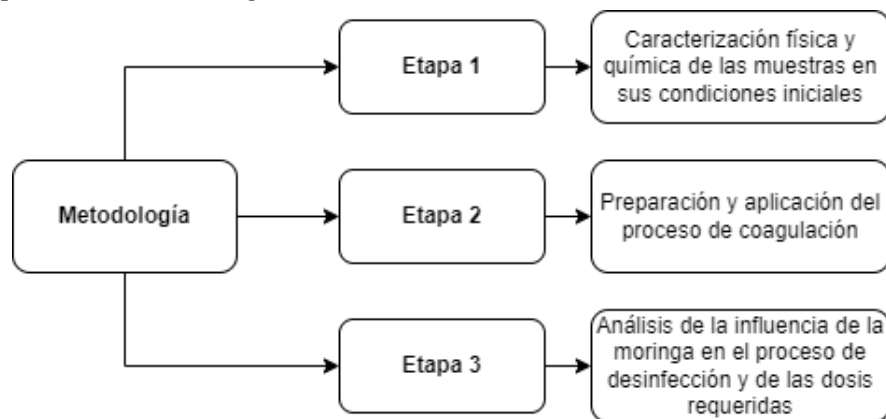
Para la determinación de la dosis óptima es necesario hallar la eficiencia de las unidades de sedimentación y filtración previas a la desinfección para establecer la remoción de turbidez y coliformes totales. De igual forma, se debe tener en cuenta la posibilidad de formación de subproductos de la desinfección (SPD) al generarse una reacción del desinfectante con la materia orgánica, llegando a producir trihalometanos (THMs) [26].

Algunos factores que tienen influencia en la formación de trihalometanos son cambios en el pH, temperatura, la fuente y concentración del precursor, dosis de cloro y los niveles de yoduro y bromuro, así como el tiempo de reacción [47], citado en [46, p. 232]. Dentro de los compuestos de trihalometanos se encuentran el cloroformo, dibromoclorometano y bromoformo, identificados previamente como compuestos químicos de riesgo potencial debido a su probado carácter cancerígeno [26].

3. Metodología

Esta investigación se desarrolló mediante un diseño experimental, con un alcance descriptivo, de modo que fuese posible identificar la influencia de la moringa en el proceso de desinfección, esto, además, con ayuda de un aporte teórico del estado del arte. Esta metodología se dividió en 3 etapas las cuales corresponden a los objetivos específicos planteados previamente, y se representan de la siguiente manera:

Figura 2. *Etapas de la metodología*



3.1. Etapa 1. Caracterización física y química de las muestras en sus condiciones iniciales

Para lograr el cumplimiento de esta fase, se plantearon 2 actividades, la primera consistió en la recolección y preparación de las muestras y la segunda en la determinación de los parámetros iniciales de las muestras.

3.1.1. Actividad 1.1. *Recolección y preparación de las muestras*

En esta etapa inicial se estableció como punto de toma de especímenes de agua cruda y zona de interés el puerto de Barrancabermeja sobre el río Magdalena. La recolección de las muestras se realizó de acuerdo con el manual de instrucciones para la toma, preservación y

transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio [35], el cual es establecido por el Instituto Nacional de Salud.

Para que las muestras fueran homogéneas y representativas como se describe en [35], de acuerdo con los ensayos a realizar, se empleó un recipiente de 20L para la captación del agua cruda, posteriormente se separaron en recipientes de 1L color ámbar para evitar la alteración de las muestras por la exposición a los rayos, de acuerdo con [18]. Debido a que el punto de captación queda en una ciudad diferente a la ubicación de los laboratorios en dónde se realizaron los ensayos, se procedió a refrigerar las muestras para mantener una temperatura constante que evitara la alteración del parámetro de coliformes totales que sería analizado en un tiempo máximo de 24h luego de la captación de las muestras, teniendo en cuenta lo descrito por [36].

La medida del pH *In situ* se realizó con papel medidor de pH por lo que se ofrece un rango de acuerdo con la comparación visual en la escala de colores.

Figura 3. Toma de temperatura y pH en el punto de captación



También se modificó la temperatura de la fuente con el fin de evitar un aumento en la temperatura que permitiera un crecimiento anormal de los microorganismos o la producción de ácido, gas y aldehído por fermentación de lactosa que ocurre a una temperatura de 35 a 37 °C [37] durante el tiempo de transporte y análisis en el laboratorio. La medición de la temperatura *In situ* y en el laboratorio se realizó con un termómetro de líquidos con un rango de medición de -10 a 110 °C.

3.1.2. Actividad 1.2. Determinación de los parámetros iniciales de las muestras.

Durante la ejecución de esta actividad se realizaron 3 tomas de recolección de muestras en diferentes días, debido a que las muestras debían ser analizadas en el laboratorio dentro de un rango de 24 horas según [36], con el fin de no alterar los resultados.

Al momento de tomar las muestras en el sitio se tomaron mediciones de los parámetros de pH y temperatura (°C) del agua. Posterior al transporte de las muestras refrigeradas a una temperatura constante, se realizó una medición del pH, temperatura (°C) y turbidez inicial [38]. Adicionalmente, se realizó la medición de coliformes totales de acuerdo con [25] al agua de la tercera captación, ya que estas muestras fueron empleadas para la simulación de coagulación de la etapa 2 y el análisis de coliformes de la etapa 3.

Para la medición de la turbidez se empleó un turbidímetro Hach 2100Q01, debido a que en algunas muestras se presentó una turbidez alta fue necesario disolver la muestra al 50% debido a que el valor se encontraba fuera del rango del turbidímetro (0-1000 UNT).

3.2. Etapa 2. Preparación y aplicación del proceso de coagulación.

Esta fase se desarrolló por medio de 3 actividades, la primera consistió en el proceso de preparación del coagulante, la segunda hace referencia al control del pH y dosis óptima de coagulante y la tercera a la simulación del proceso de coagulación.

3.2.1. Actividad 2.1. Preparación del coagulante

Se inició el proceso del coagulante con la obtención de las semillas de Moringa a granel, éstas fueron seleccionadas de manera que se iban desechando las que tuvieran defectos en su maduración, teniendo en cuenta que se mantuvieran las que tenían su cubierta color café oscuro, ya que estas son las que poseen mayor acción coagulante de acuerdo con [18].

Figura 4. *Semillas de Moringa descascaradas*



Una vez teniendo las semillas se procedió a realizar el descascarado manual, luego fueron lavadas con agua destilada para eliminar las impurezas y se llevaron a la mufla en papel aluminio a una temperatura de 104°C durante una hora para realizar el respectivo secado, como se detalla en [18].

Figura 5. *Semillas de Moringa secadas*

A continuación, con ayuda de una licuadora del laboratorio, se realizó la trituración de las semillas, luego se pasaron por un mortero hasta que se pulverizaron y después este polvo fue pasado por el tamiz N. 35 con abertura de $450\ \mu\text{m}$ para que este quedara más fino, esto de acuerdo con el procedimiento de [18].

Figura 6. *Proceso de trituración de la materia prima y pesado del polvo*

Seguidamente se realizó una solución con NaCl a una concentración 1M, por lo que se disolvieron 58.44g de NaCl en 1L de agua destilada de acuerdo con la ecuación 1.

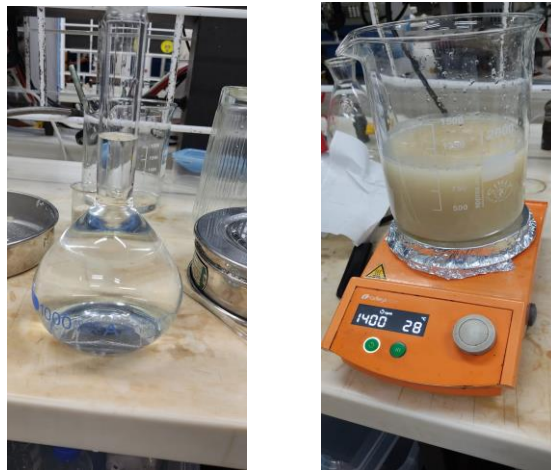
$$1 \text{ mol NaCl} \times \frac{58.44 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 58.44 \text{ g NaCl} \quad (1)$$

A partir de los resultados obtenidos en [18] el coagulante de moringa tiene un buen desempeño a una concentración de 20.000ppm por lo que se disolvieron 20 gramos de harina de moringa sin extracción de aceite por litro de NaCl 1M basados en la ecuación 2.

$$\frac{20 \text{ g harina}}{1 \text{ L NaCl } 1 \text{ M}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 20.000 \text{ ppm} \quad (2)$$

Para mezclar el coagulante se utilizó un agitador magnético como se especifica en [18], a 1400rpm durante 30 minutos para obtener una mezcla óptima y aumentar la solubilidad de las sustancias coagulantes de la semilla.

Figura 7. Mezcla del polvo de semilla de Moringa con la solución NaCl



Luego para eliminar partículas restantes se usó la bomba de vacío, embudo Buchner y papel de filtro para de realizar filtración, este proceso también permitió alargar la vida útil del coagulante. Finalmente se procedió a embazar el coagulante en un recipiente de vidrio color ámbar el cual se

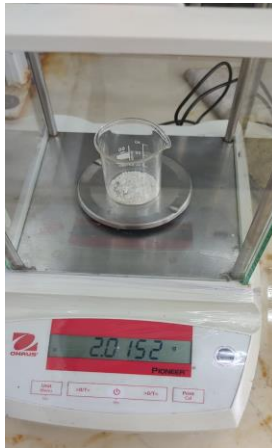
almacenó a una temperatura constante de 4°C para evitar afectaciones del coagulante a temperatura ambiente, cómo se especifica en [18].

Figura 8. *Filtración del coagulante y refrigeración.*



Por otro lado, con el fin de tener un parámetro de referencia se realizó también la preparación del coagulante químico de sulfato de aluminio tipo A, para este se tuvo en cuenta una concentración de 10.000ppm que presenta un adecuado rendimiento como se documentó en [39] por lo que se disolvieron 2g de sulfato de aluminio tipo A en 0.2L de agua destilada como indica la ecuación 3.

$$\frac{2g \times Al_2(SO_4)_3}{0.2L \text{ Agua destilada}} \times \frac{1000mg}{1g} = 10.000ppm \quad (3)$$

Figura 9. *Balanza para medición de coagulantes*

3.2.2. Actividad 2.2. Control de pH y dosis óptima de coagulante

Antes de ejecutar el ensayo de jarras se realizó un ajuste de pH para las muestras de agua con el fin de verificar la eficiencia a diferentes rangos, estos se ajustaron por medio del uso de ácidos (HCl) para reducir y bases (NaOH) para aumentar el pH de las muestras de agua de 1L. Para el coagulante de moringa se estableció ajustar el pH en 5, 7 y 9, para el sulfato de aluminio se estableció el pH en 6 y 7.

Figura 10. *Ajuste de pH de muestra de agua cruda de río*

Con el pH de las muestras definido se pasó al cálculo de las dosis a partir de las concentraciones de coagulante a emplear con ayuda de la ecuación 4.

$$Dosis (mL) = \frac{Concentración \left(\frac{mg}{L}\right) * Volumen muestra (L) * 1000}{Concentración coagulante (ppm)} \quad (4)$$

Con esta fórmula se calcularon las siguientes dosis a emplear de coagulante.

Tabla 2. Cálculo de dosis de coagulante de Moringa en mL

Coagulante Moringa	
Concentración (mg/L)	Dosis (mL)
40	2
60	3
80	4
120	6
160	8
200	10
222	11,1

Tabla 3. Cálculo de dosis de coagulante de Sulfato de Aluminio en mL

Coagulante Sulfato de aluminio	
Concentración (mg/L)	Dosis (mL)
40	4
60	6
80	8
100	10
120	12

Inicialmente para el coagulante de moringa se usaron dosis de (2, 3 y 4) mL y para el coagulante del sulfato de aluminio se usaron dosis de (4, 6 y 8) mL. Luego se ensayaron dosis con pH 9 y 7 hasta obtener porcentajes de remoción cercanos al 99.5% que permitía un valor aceptable

del proceso de coagulación para llegar al rango permitido de turbidez para el agua de consumo humano según [13].

Para encontrar la dosis óptima inicialmente se realizó con la experimentación por medio del ensayo de jarras. Todos los ensayos de jarras se realizaron en el floculador digital del laboratorio, empleando vasos de precipitados de 1L y adicionando el coagulante por medio de una pipeta graduada. Inicialmente se realizó una mezcla rápida con velocidad de rotación a 100 rpm durante un tiempo de 1 minuto, luego para la mezcla lenta se ajustó la velocidad de rotación a 40 rpm durante 15 minutos, como se detalla en la metodología de [18]. Al terminar este tiempo se dejaron sedimentar las muestras en los vasos de ensayo durante 30 minutos.

3.2.3. Actividad 2.3. Simulación de coagulación

Para simular el proceso de coagulación en un tren de tratamiento se empleó el ensayo de jarras aplicando las dosis requeridas de ambos coagulantes. Para esta simulación con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados como se indica en [38] se replicó el ensayo de jarras 5 veces con las dosis requeridas de cada coagulante.

Figura 11. *Proceso de mezcla de coagulante*

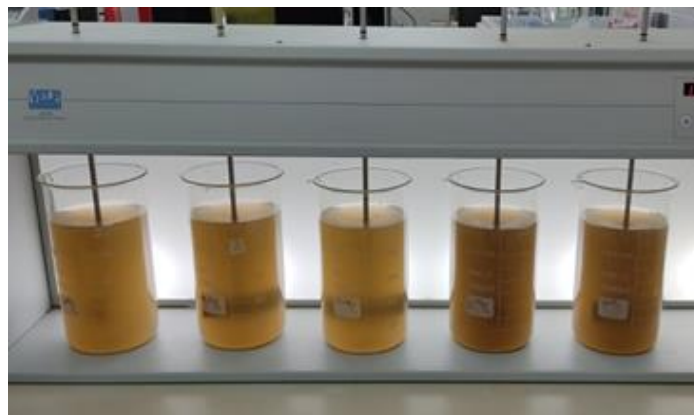


Figura 12. *Proceso de sedimentación en vasos de precipitado*

3.3. Etapa 3. Análisis de la influencia de la moringa en el proceso de desinfección y de las dosis requeridas.

Para el cumplimiento de esta etapa se desarrollaron las siguientes 2 actividades:

3.3.1. Actividad 3.1. Análisis de coliformes totales y filtración

Luego del proceso de coagulación se realizaron las mediciones correspondientes a la turbidez con un turbidímetro Hach 2100Q01, el pH con un pH metro Hach Q11D y la determinación de los coliformes totales por medio de la técnica de análisis de filtración por membrana en un laboratorio certificado por el IDEAM [25], con el fin de observar las variaciones de las 10 muestras tratadas con coagulante respecto a 1 muestra de agua cruda del río Magdalena.

Para la filtración se realizó un análisis teórico con base en la información documentada en [40] debido a que la información más relevante es la remoción promedio conseguida durante el proceso de filtración, independientemente de la tecnología que se desee aplicar para esta unidad del tren de tratamiento.

3.3.2. Actividad 3.2. Análisis de dosis de cloro y formación THM

Al observar los resultados de las caracterizaciones previas y posteriores al proceso de coagulación, se determinó la eficiencia del coagulante y la alteración de este a las características del agua, especialmente en la turbidez y la presencia de coliformes totales. En esta fase final se determinó las dosis requeridas para la desinfección de las muestras tratadas de acuerdo con [13] y se determinó el efecto de la Moringa al comparar los resultados con los valores obtenidos con el parámetro de referencia establecido (Sulfato de aluminio).

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio e investigación realizado en el laboratorio de química de la Universidad Santo Tomás, estos están planteados por etapas y por actividades de acuerdo con la metodología desarrollada.

4.1. Etapa 1. Caracterización física y química de las muestras en sus condiciones iniciales

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las actividades 1.1 y 1.2 descritos anteriormente en la metodología para esta fase del proyecto. Dando cumplimiento con esta etapa al objetivo específico 1.

En la tabla 4 se presentan los resultados de las mediciones realizadas a los parámetros de temperatura y pH de las muestras, tomadas *In Situ* durante las 3 captaciones de agua cruda del río magdalena.

Tabla 4. *Parámetros iniciales In Situ*

Parámetros In Situ		
Valor/Parámetro	Temperatura (°C)	pH
Media	28	6
Σ	1	0
CV	3,57%	0,00%

De acuerdo con las tres tomas realizadas se obtuvo un valor promedio de la temperatura del agua de 28°C y un pH de 6 que no presentó desviación estándar debido a que se realizó una medición visual de acuerdo con la escala de color del papel medidor de pH, resultando todas las mediciones con el mismo valor.

A partir del valor obtenido de pH se puede establecer con [26] que la fuente se clasifica como aceptable de acuerdo con el reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Respecto a la temperatura no hay un rango establecido en la normativa colombiana que determine el grado de contaminación térmica del agua.

De esta manera las condiciones iniciales con mediciones en laboratorio se muestran en la tabla 5, que representa los valores promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los parámetros de temperatura, pH y turbiedad de las 3 captaciones de muestras realizadas en el río Magdalena.

Tabla 5. *Parámetros iniciales de las muestras en laboratorio*

Parámetros iniciales laboratorio			
Valor/Parámetro	Temperatura (°C)	pH	Turbidez (UNT)
Media	14	8,42	935
Σ	0,58	0,07	104,89
CV	4,03%	0,77%	11,22%

El valor promedio para la temperatura luego del proceso de transporte con refrigeración correspondió a 14°C, el pH con las mediciones del medidor de pH digital tuvo un promedio de

8.42 que según [26] permite clasificar a la fuente como aceptable, sin embargo, la turbiedad promedio de 935 UNT clasifica la fuente como muy deficiente [26], además, las muestras presentaron un valor de coliformes totales de 490 (UFC/100mL) que se encuentra dentro del rango de fuentes de captación regulares [26] este parámetro no presentó un valor promedio ya que se midió en el agua de la tercera captación del río que fue empleada para la simulación de la coagulación.

4.2. Etapa 2. Preparación y aplicación del proceso de coagulación.

En esta etapa se compilan los resultados obtenidos de las actividades 2.1, 2.2. y 2.3 del desarrollo metodológico. Al culminar esta etapa se obtiene la dosis requerida de coagulante de moringa para lograr la mayor eficiencia de remoción de turbidez, dando así cumplimiento al objetivo específico 2.

Coagulante Moringa : para establecer la dosis requerida del coagulante de Moringa se realizó un diseño experimental que se presenta en la tabla 6, este diseño está compuesto por 2 factores (pH, dosis de coagulante) y 3 niveles. Se ejecutó 1 réplica por lo que se analizaron un total de 18 muestras de 1L de agua cruda del río Magdalena.

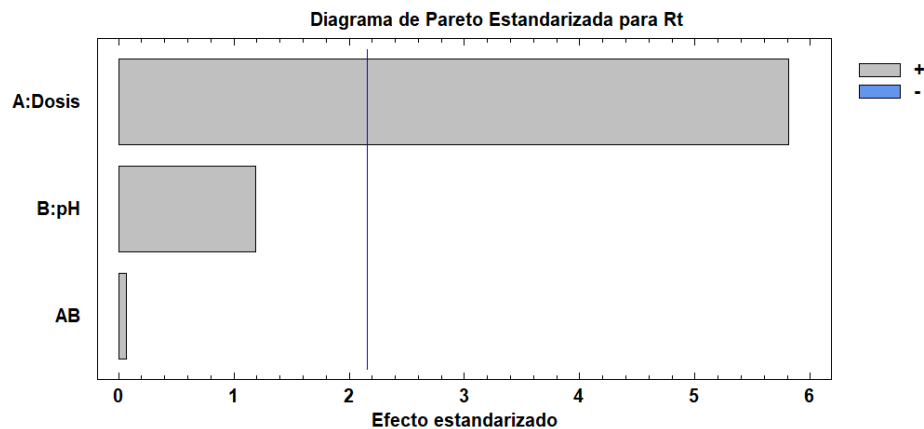
Tabla 6. Remoción de turbidez luego del uso del coagulante de Moringa

Moringa										
Parámetros iniciales			Factores codificados		pH Final			% Remoción (Rt)		
Dosis	pH	UNT Inicial	Dosis	pH	Media	σ	CV	Media	σ	CV
2		902	-1	-1	5,50	0,09	1,67%	73,8%	0,03	3,6%
3	5		0	-1	5,25	0,13	2,42%	84,6%	0,00	0,4%
4			1	-1	5,17	0,21	3,97%	90,0%	0,05	6,1%
2			-1	0	6,97	0,58	8,32%	73,9%	0,07	9,2%
3	7		0	0	7,04	0,30	4,32%	86,0%	0,05	5,3%
4			1	0	7,20	0,04	0,59%	92,0%	0,03	3,7%

Moringa									
Parámetros iniciales		Factores codificados		pH Final			% Remoción (Rt)		
2		-1	1	8,56	0,04	0,50%	76,7%	0,11	14,2%
3	9	0	1	8,90	0,04	0,40%	88,9%	0,08	8,7%
4		1	1	8,98	0,09	1,02%	93,3%	0,05	5,5%

Dentro de las muestras analizadas con los factores empleados el mayor porcentaje de remoción de turbidez se obtuvo con un pH 9 y una dosis de 4mL para una media de 93.3% y el porcentaje más bajo se presentó con un pH 5 y una dosis de 2mL con una media de 73.8%. Los porcentajes máximos de remoción de turbidez obtenidos en cada nivel de pH confirman que el coagulante preparado a base de semillas de Moringa presentó remociones máximas en las muestras analizadas, que están dentro del rango mencionado por diferentes autores correspondiente a 90%-96% [18], [39], [20].

ANOVA de los resultados obtenidos en la tabla 6, permitió determinar que con un Valor- $P < 0,05$ el factor A: dosis, tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de remoción. El diagrama de Pareto que compara los efectos de los parámetros y la interacción entre ellos se presenta en la figura 13, en dónde A corresponde a la dosis de coagulante y B al pH del agua previo a la coagulación.

Figura 13. Diagrama de Pareto estandarizado para coagulante de Moringa

Elaboración propia con base en Statgraphics

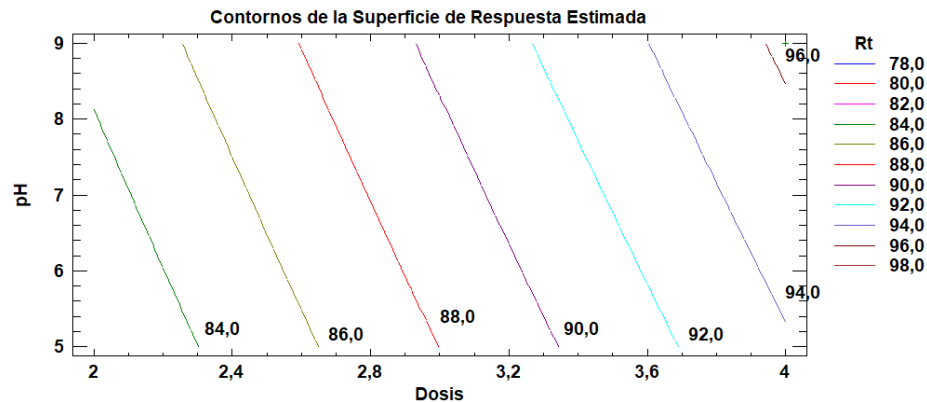
Para el coagulante de Moringa empleado se determinó que el efecto estadísticamente más significativo [41] está dado por el factor A. En la figura 15, se puede evidenciar que este factor tiene un efecto de incremento en el porcentaje de remoción de turbidez del agua. Con respecto al factor B, no se tiene una significancia tan representativa, sin embargo, también tiene un efecto en el incremento del porcentaje de remoción de turbidez. La relación entre ambos factores AB obtuvo la menor significancia dentro del análisis.

A partir del análisis de datos de la tabla 6 se obtuvo la ecuación para el modelo estadístico:

$$\text{Remoción turbidez (\%)} = 68,3335 + 5,56865 * \text{Dosis} + 0,476271 * \text{pH} + 0,0403125 * \text{Dosis} * \text{pH} \quad (5)$$

La ecuación (5) representa un modelo con un ajuste de $R^2=73,72\%$. La gráfica de contorno del modelo de la ecuación (5) se observa en la figura 14.

Figura 14. Diagrama de contorno para los efectos de la dosis y el pH en la remoción de turbidez

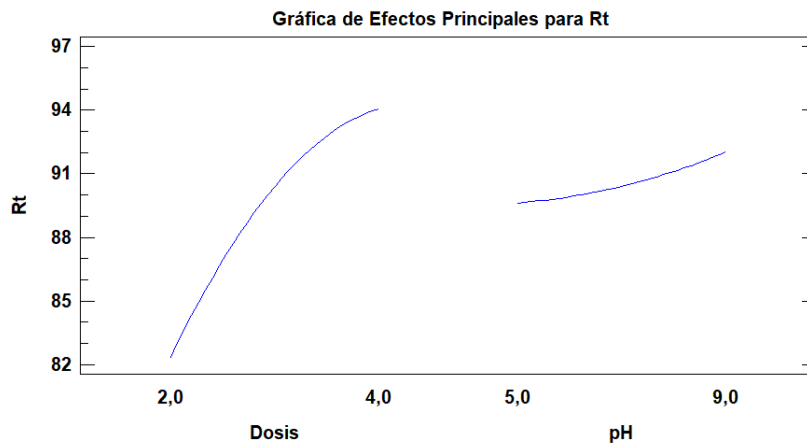


Fuente: Elaboración propia con base en Statgraphics

De acuerdo con los resultados, se determina que con los niveles empleados para cada uno de los factores no se logra llegar al punto máximo de eficiencia del coagulante de Moringa para la remoción de turbidez.

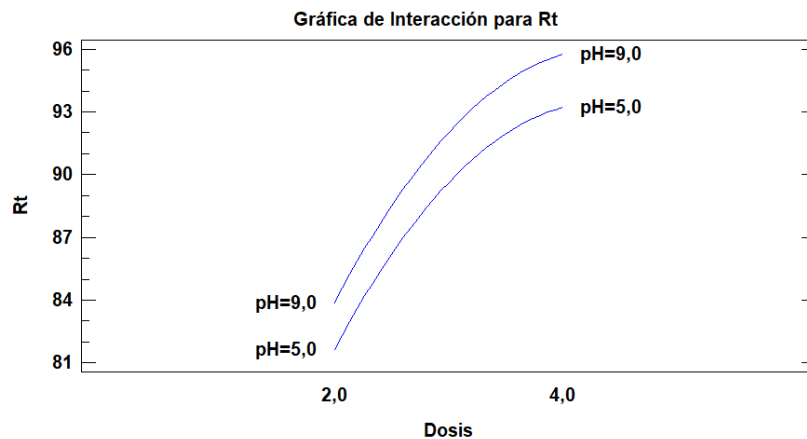
Para probar experimentalmente los valores de los parámetros que permiten una remoción óptima se ejecutó un camino de máximo ascenso buscando mantener una remoción cercana al 100%, para determinar este camino de máximo ascenso se analizaron los efectos principales de cada factor y la interacción entre estos sobre la remoción.

La figura 15 presenta los efectos principales de los factores (dosis, pH) en la remoción de turbidez obtenida con el coagulante de Moringa. A partir de la gráfica se observa que a medida que se incrementa la dosis el porcentaje de remoción aumenta en menor proporción, sin llegar a decrecer con las dosis empleadas. Por otro lado, con el pH se presenta un incremento mayor en la remoción a medida que se aumenta su nivel, presentando un mejor rendimiento con el pH más alto empleado.

Figura 15. Efectos de los factores en el porcentaje de remoción (*Moringa*)

Elaboración propia con base en Statgraphics

En la figura 16 se encuentran los valores de remoción con la interacción entre ambos factores. A partir de allí es posible determinar que la interacción con mejores remociones se da con el pH 9 y que dentro del rango de dosis empleados no se logró el punto máximo de remoción posible ya que aún no hay una reducción del porcentaje de remoción alcanzado, tal como sucede luego de alcanzar la dosis requerida en donde todos los coloides llegan a neutralizarse por el efecto de parche electrostático que causa una distribución desbalanceada de cargas, causando velocidades muy bajas de sedimentación [42], [43] citados en [18, p. 58].

Figura 16. Interacción entre factores para el coagulante de Moringa

Elaboración propia con base en Statgraphics

Debido a la limitación de muestras y con las observaciones del comportamiento del coagulante a partir de la modificación de ambos factores, se determinó emplear un pH constante del agua con variaciones de la dosis para la ejecución del camino de máximo de ascenso.

Tabla 7. Camino de máximo ascenso para remoción de turbidez del coagulante de Moringa

Máximo ascenso para Rt					
Parámetros iniciales			Parámetros finales		
Dosis	pH	UNT Inicial	pH Final	UNT Final	%Remoción
6	9	1052	9,02	83,7	92,04%
8			9,09	38	96,39%
10			9,16	15,9	98,49%
12			9,31	16,5	98,43%

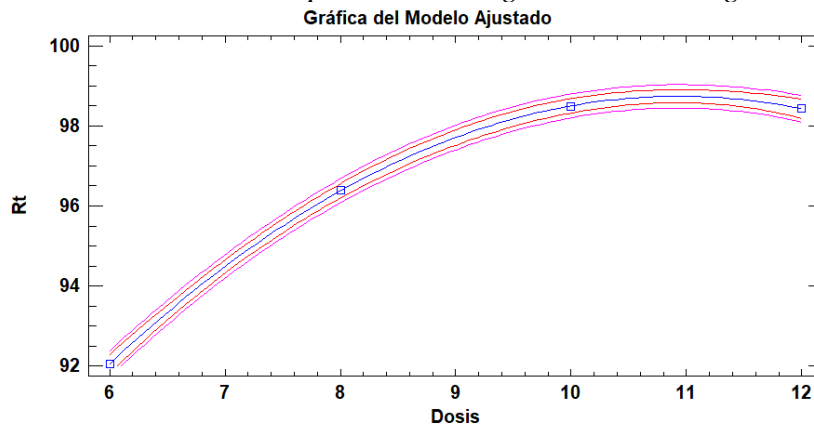
ANOVA de los resultados de la tabla 7 permitió determinar que el parámetro *dosis*² tiene una significancia estadística significativa (valor P=0,0055), por lo que un polinomio de orden 2 permite la descripción de la relación entre la remoción de la turbidez y la dosis cuando esta se aplica al agua con un pH 9.

A partir de los resultados de la regresión se obtuvo la ecuación 6:

$$\text{Remoción turbidez} = 65,8643 + 6,01437 * \text{dosis} - 0,275062 * \text{dosis}^2 \quad (6)$$

La ecuación (6) representa un modelo con un ajuste de $R^2=99,9\%$. La gráfica del modelo ajustado se presenta en la figura 17.

Figura 17. Determinación de la dosis requerida del coagulante de Moringa



Elaboración propia con base en Statgraphics

Con la ecuación 6 se halló el punto crítico determinando que, con una dosis de 10,9mL se obtiene una predicción del porcentaje de remoción de 98.74%. Debido a la exactitud de la pipeta aforada se aproxima a 11,0mL durante la aplicación del coagulante.

La tabla 8 contiene los valores predichos a partir de las diferentes dosis aplicadas de coagulante con la ecuación (6) obtenida de la regresión:

Tabla 8. Datos de la proyección con el modelo de regresión polinómica para el coagulante de *Moringa*

Datos proyectados	
Dosis (ML)	% Remoción
6	92,05
8	96,38
10	98,5
11	98,74
12	98,43
14	96,15

Se ejecutó un ensayo de verificación de la dosis requerida con el que se obtuvo un porcentaje de remoción de 99.32%. Con la ejecución de los ensayos adicionales se comprobó la remoción de la dosis requerida para las muestras a emplear en la simulación de la coagulación que implicó el uso de 6,2mL adicionales de coagulante con respecto a la dosis optima obtenida con el modelo del diseño de experimentos representado con la ecuación (5). Lo que representa un aumento significativo de la dosis a medida que varía la turbiedad inicial del agua a tratar.

En la tabla 9 se presenta la información de la dosis requerida para la simulación de la coagulación:

Tabla 9. Dosis requerida coagulante de *Moringa*

Coagulante Moringa			
Concentración (mg/L)	Dosis (mL)	pH muestra	T (°C) muestra
220	11,0	9	14,5

Coagulante sulfato de aluminio: al ser el sulfato de aluminio un producto químico de grado reactivo como lo especifica la NTC 3903 [38], se garantiza precisión en la determinación de las eficiencias de remoción de turbidez. Esto permitió tomar ensayos de referencia realizados en [39],

para definir un pH constante del agua con el que se ejecutaron variaciones de la dosis en el camino de máximo ascenso para la remoción de turbidez.

Tabla 10. Camino de máximo ascenso para remoción de turbidez del sulfato de aluminio

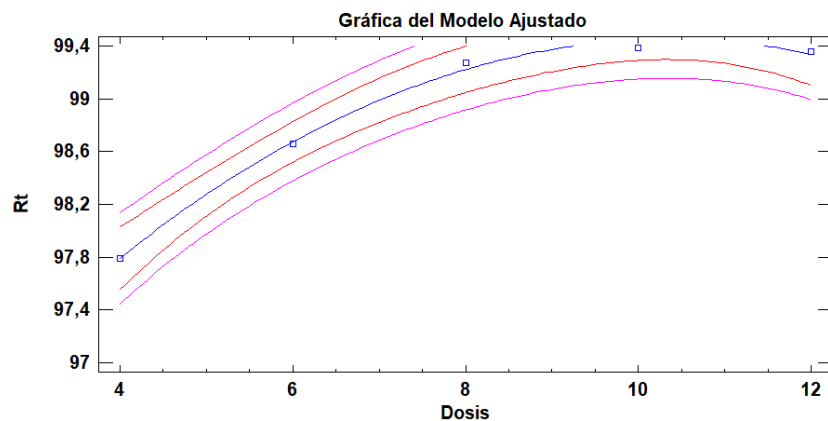
Máximo ascenso para Rt sulfato					
Parámetros iniciales			Parámetros finales		
Dosis	pH	UNT Inicial	pH Final	UNT Final	%Remoción
4			6,81	23,25	97,79%
6			6,83	14,11	98,66%
8	7	1052	6,53	7,62	99,28%
10			6,23	6,46	99,39%
12			5,98	6,73	99,36%

ANOVA de los resultados de la tabla 10 permitió determinar que el parámetro *dosis*² tiene una significancia estadística significativa (valor P=0,0090), por lo que un polinomio de orden 2 permite la descripción de la relación entre la remoción de la turbidez y la dosis cuando esta se aplica al agua con un pH 7.

A partir de los resultados de la regresión se obtuvo la ecuación 7:

$$\text{Remoción turbidez} = 95,0522 + 0,849064 * \text{dosis} - 0,0409821 * \text{dosis}^2 \quad (7)$$

La ecuación (7) representa un modelo con un ajuste de $R^2=99,6\%$. La gráfica del modelo ajustado se presenta en la figura 18.

Figura 18. *Determinación de la dosis requerida del Sulfato de aluminio*

Elaboración propia con base en Statgraphics

Con la ecuación 7 se halló el punto crítico determinando que, con una dosis de 10,6mL se obtiene una predicción del porcentaje de remoción de 99.45%. Debido a la exactitud de la pipeta aforada se aproximó a 10,0mL ya que se obtuvo una mayor remoción proyectada que con 11,0mL.

La tabla 11 contiene los valores predichos a partir de las diferentes dosis aplicadas de coagulante con la ecuación (7) obtenida de la regresión:

Tabla 11. *Datos de la proyección con el modelo de regresión polinómica para el Sulfato de aluminio*

Datos proyectados	
Dosis (ML)	% Remoción
4,0	97,81
6,0	98,68
8,0	99,22
10,0	99,44
11,0	99,43
12,0	99,34

Tabla 12. *Dosis requerida coagulante de Sulfato de Aluminio*

Coagulante Sulfato de aluminio			
Concentración (mg/L)	Dosis (mL)	pH muestra	T (°C) muestra
100	10	7	14,5

Luego de la identificación de las dosis requeridas para el coagulante de Moringa y el sulfato de aluminio, se procedió a realizar la ejecución de la simulación de la coagulación en donde a cada una de las muestras ensayadas se les asignó un identificador para las demás etapas del análisis. La simulación de la coagulación se presenta en primera instancia para la Moringa, seguido del análisis del sulfato de aluminio como parámetro de referencia.

Coagulante Moringa: la simulación de la coagulación en las 5 muestras tratadas con coagulante de Moringa arrojó los parámetros presentados en la tabla 13.

Tabla 13. *Ensayo final de coagulante de Moringa con la dosis requerida*

Moringa ensayo dosis requerida						
Muestra	Parámetros iniciales			Parámetros finales		
	Dosis (mL)	pH	UNT Inicial	pH Final	UNT Final	%Remoción
M6				8,17	8,61	99,18%
M7				8,36	7,4	99,30%
M8	11	9	1052	8,62	6,88	99,35%
M9				8,57	6	99,43%
M10				8,48	4,92	99,53%

Las muestras tratadas con coagulante de Moringa tuvieron una media de remoción de 99,36%, una desviación estándar de 0,0013 y un coeficiente de variación de 0,13%. En la figura 19 se puede evidenciar el resultado de remoción de la simulación realizada con las dosis requeridas de coagulante de moringa.

Figura 19. *Proceso de sedimentación luego del uso la dosis requerida del coagulante de Moringa*



Coagulante sulfato de aluminio: la simulación de la coagulación en las 5 muestras tratadas con sulfato de aluminio arrojó los parámetros presentados en la tabla 14.

Tabla 14. *Ensayo final del coagulante de sulfato con la dosis requerida*

Muestra	Sulfato ensayo dosis requerida					
	Parámetros iniciales			Parámetros finales		
	Dosis (mL)	pH	UNT Inicial	pH Final	UNT Final	%Remoción
M1				6,38	6,07	99,42%
M2				6,30	7,11	99,32%
M3	10	7	1052	6,19	3,84	99,63%
M4				6,12	5,42	99,48%
M5				6,03	5,41	99,49%

Las muestras tratadas con sulfato de aluminio como coagulante tuvieron una media de remoción de 99,47%, una desviación estándar de 0,0011 y un coeficiente de variación de 0,11%. En la figura 20 se puede evidenciar el resultado de remoción de la simulación realizada con las dosis requeridas de coagulante de moringa.

Figura 20. *Proceso de sedimentación luego del uso la dosis requerida del coagulante Sulfato de Aluminio.*



Ambos coagulantes presentaron porcentajes de remoción similares con una diferencia en la media de 0,11%. Sólo 1 de las muestras que fue tratada con coagulante de moringa presentó una turbiedad mayor a 8 UNT que es valor máximo recomendado según [13] para un proceso de filtración rápida luego de la coagulación.

4.3. Etapa 3. Análisis de la influencia de la moringa en el proceso de desinfección y de las dosis requeridas.

Con esta etapa se obtuvo el efecto de la moringa en el proceso de desinfección y la diferencia de dosis de cloro de acuerdo con el coagulante utilizado, dando así cumplimiento al objetivo específico 3 y finalmente al objetivo general.

Se realizó el conteo de coliformes totales por medio del método de Filtración por membrana S.M 9222 J Ed. 23 como se observa en la tabla 15:

Tabla 15. Resultados del análisis de coliformes totales y su remoción de acuerdo con el coagulante utilizado

Análisis de coliformes totales		
Muestra	Resultado (UFC/ 100 mL)	% Remoción
R1	490	N/A
M1	104	78,78%
M2	106	78,37%
M3	70	85,71%
M4	78	84,08%
M5	66	86,53%
M6	249	49,18%
M7	180	63,27%
M8	256	47,76%
M9	199	59,39%
M10	240	51,02%

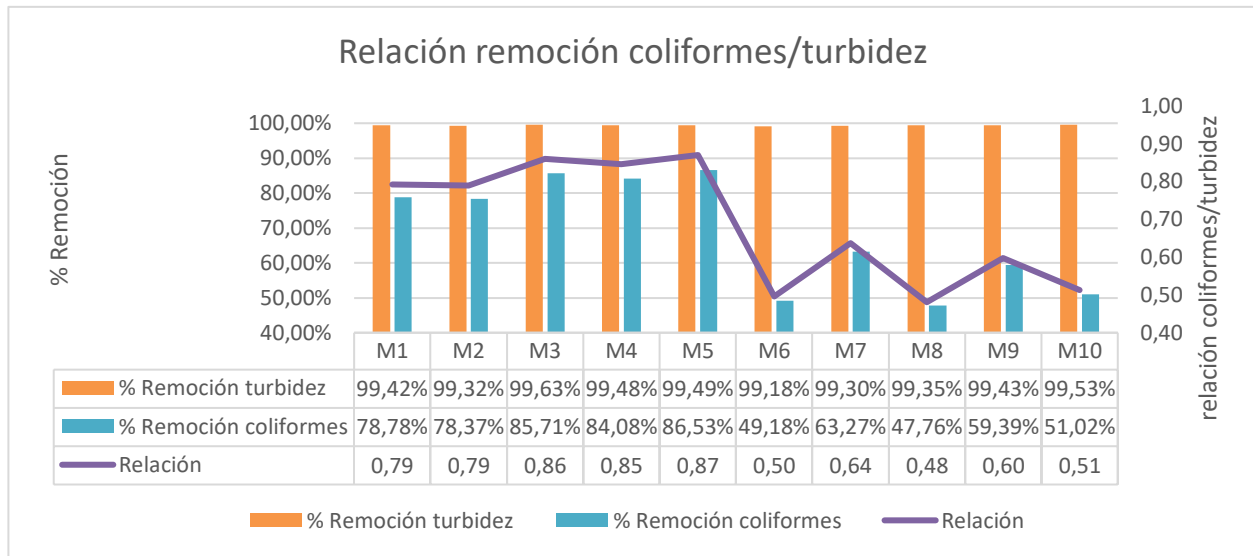
Nota: Para el análisis de coliformes totales se usó el método de filtración por membrana. La muestra R1 hace referencia a la muestra de agua cruda del río, la muestra M1 a M5 pertenecen a las muestras de río tratadas con el coagulante de sulfato de aluminio, y las muestras M6 a M10 corresponden a las muestras tratadas con el coagulante natural de moringa.

Este análisis fue realizado por el laboratorio de aguas y suelos del centro de estudios e investigaciones ambientales CEIAM – UIS.

Adaptado de informe de resultados N. 14 CEIAM – UIS [36]

Las muestras tratadas con sulfato de aluminio tipo A presentaron una media de remoción de coliformes totales de 82,69% y las muestras tratadas con coagulante de moringa tuvieron una media de remoción de coliformes totales de 54,12%.

De acuerdo con la figura 21 se observa que las muestras M1 a M5 presentaron mayores valores en la relación de la remoción de coliformes/turbiedad a pesar de que los porcentajes de remoción de turbidez en todas las muestras es similar.

Figura 21. Relación de remoción de coliformes y turbiedad luego del uso de los dos coagulantes

La relación entre ambas remociones no se mantiene constante en ninguno de los dos coagulantes, pero se presenta una menor desviación estándar relativa en las muestras M1 a M5 (4.59%) que corresponden a las tratadas con Sulfato de aluminio tipo A en comparación con la desviación estándar relativa de las muestras M6 a M10 (12.59%) que corresponden a las tratadas con Moringa. Adicionalmente no se encontró un coeficiente de correlación lineal que determinara algún tipo de comportamiento estándar a partir del porcentaje de remoción obtenido para la turbiedad y los coliformes totales de cada una de las muestras analizadas.

Tabla 16. Análisis de correlación

Coagulante	Muestras	Media	Desv. estándar	Desv. estándar relativa (%)	Coef. correlación lineal
Sulfato de aluminio	M1 a M5	0,83	0,04	4,59%	0,797
Moringa	M6 a M10	0,54	0,07	12,59%	0,062

Análisis teórico de filtración: de acuerdo con [13] antes de ejecutar el proceso de desinfección se debe determinar la eficiencia de los procesos previos de sedimentación y filtración. Cómo la filtración es independiente del tipo de coagulante empleado y solo depende de las condiciones de turbiedad y coliformes del agua de ingreso se realiza un análisis teórico de remoción final de coliformes.

Tabla 17. *Análisis de eliminación de coliformes luego de la filtración*

Análisis teórico de Coliformes Totales				
Muestra	Ingreso filtro (UFC/ 100 mL)	% Remoción filtro	Salida filtro	% Remoción final
R1	490	N/A	N/A	N/A
M1	104	80%	21	95,76%
M2	106	80%	21	95,67%
M3	70	80%	14	97,14%
M4	78	80%	16	96,82%
M5	66	80%	13	97,31%
M6	249	80%	50	89,84%
M7	180	80%	36	92,65%
M8	256	80%	51	89,55%
M9	199	80%	40	91,88%
M10	240	80%	48	90,20%

Nota: Para el análisis de remoción final de coliformes totales se usó un valor teórico de remoción proporcionado en [37]. La muestra R1 hace referencia a la muestra de agua cruda del río, la muestra M1 a M5 pertenecen a las muestras de río tratadas con el coagulante de sulfato de aluminio, y las muestras M6 a M10 corresponden a las muestras tratadas con el coagulante natural de moringa.

Se consideró un porcentaje de remoción constante del filtro sobre el parámetro de coliformes totales de ingreso que es el valor obtenido luego del tratamiento con los coagulantes. La remoción final se obtiene al calcular el porcentaje con el valor final de las muestras y el valor inicial obtenido a partir de la muestra R1.

El reglamento [13] establece que para aguas tratadas por medio de coagulación y/o floculación con o sin sedimentación, se emplea filtración rápida que permite la eliminación de las últimas partículas suspendidas. De acuerdo con lo mencionado en [37] con la filtración rápida se

llega a obtener aproximadamente el 80% de retención de coliformes, por lo que con este porcentaje se puede calcular un valor final de remoción a partir de los resultados obtenidos en las tablas 17 y 18.

Tabla 18. *Análisis de remoción de turbidez luego de la filtración.*

Análisis teórico de turbiedad				
Muestra	Ingreso filtro (UNT)	% Remoción filtro	Salida filtro	% Remoción final
R1	1052	N/A	N/A	N/A
M1	6,07	95,50%	0,27	99,97%
M2	7,11	95,50%	0,32	99,97%
M3	3,84	95,50%	0,17	99,98%
M4	5,42	95,50%	0,24	99,98%
M5	5,41	95,50%	0,24	99,98%
M6	8,61	95,50%	0,39	99,96%
M7	7,4	95,50%	0,33	99,97%
M8	6,88	95,50%	0,31	99,97%
M9	6	95,50%	0,27	99,97%
M10	4,92	95,50%	0,22	99,98%

Nota: Para el análisis de remoción final de coliformes totales se usó un valor teórico de remoción proporcionado en [40]. La muestra R1 hace referencia a la muestra de agua cruda del río, la muestra M1 a M5 pertenecen a las muestras de río tratadas con el coagulante de sulfato de aluminio, y las muestras M6 a M10 corresponden a las muestras tratadas con el coagulante natural de moringa.

Se consideró un porcentaje de remoción constante del filtro sobre el parámetro de turbidez de ingreso que es el valor obtenido luego del tratamiento con los coagulantes. La remoción final se obtiene al calcular el porcentaje con el valor final de las muestras y el valor inicial obtenido a partir de la muestra R1

Con los resultados de la tabla 17 se obtiene una media de remoción de coliformes totales final de 96.54% y 90.82% para las muestras tratadas con sulfato de aluminio y Moringa respectivamente.

De acuerdo con el reglamento [13] uno de los lechos filtrantes empleados para la filtración rápida es la arena en diferentes tamaños de partícula. En [40, p. 12] se analizó la eficiencia de un

filtro de arena continuo y se llegó a un 95.5%. de remoción. Con este valor teórico se obtienen los valores de turbiedad final de la tabla 18, con una media de remoción de turbidez final de 99.98% y 99.97% para las muestras tratadas con Sulfato de aluminio y Moringa respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos en las tablas 17 y 18. Se determina con el reglamento [13, pp. C.79-80] los valores de la constante K (mg-min/L) para el proceso de desinfección presentes en la tabla 19 y la tabla 21.

Para las muestras tratadas con sulfato de aluminio se debe emplear la tabla 19 debido a que se obtuvo una remoción de coliformes totales entre 95 al 99% y una turbiedad inferior a 1.0 UNT [13, p. C.79]. con estos valores de la constante K se obtiene una reducción de quistes de *Giardia* correspondiente a Log 2 que equivale a un 99% [26, p. 275].

Tabla 19. Valores de K (mg-min/L) para inactivación *Giardia* por cloro libre log 2

Dosis de Cloro Aplicada mØl	10°C				15°C				20°C				25°C			
	Ph				Ph				Ph				Ph			
	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5
«=0.4	24	29	35	42	16	20	23	28	12	15	17	21	8	10	12	14
0,6	25	30	36	43	17	20	24	29	13	15	18	21	8	10	12	14
0,8	26	31	37	44	17	20	24	29	13	15	18	22	9	10	12	15
1	26	31	37	45	18	21	25	30	13	16	19	22	9	10	12	15
1,2	27	32	38	46	18	21	25	31	13	16	19	23	9	11	13	15
1,4	27	33	39	47	18	22	26	31	14	16	19	23	9	11	13	16
1,6	28	33	40	48	19	22	26	32	14	17	20	24	9	11	13	16
1,8	29	34	41	49	19	23	27	33	14	17	20	25	10	11	14	16
2	29	35	41	50	19	23	28	33	15	17	21	25	10	12	14	17
2,2	30	35	42	51	20	23	28	34	15	18	21	26	10	12	14	17
2,4	30	36	43	52	20	24	29	35	15	18	22	26	10	12	14	17
2,6	31	37	44	53	20	24	29	36	15	18	22	27	10	12	15	18
2,8	31	37	45	54	21	25	30	36	16	19	22	27	10	12	15	18
3	32	38	46	55	21	25	30	37	16	19	23	28	11	13	15	18

Adaptado del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS 2000. [13].

De acuerdo con la información de la tabla 5 las muestras se encuentran en un rango de temperatura de 15°C haciendo la selección de las posibles dosis con el pH. Las muestras tratadas

con sulfato obtuvieron una media en el pH de 6.2 tomando así los valores de pH 6.0 de la tabla 19 como la columna más cercana. No se eleva el nivel de pH debido a que el reglamento especifica que no se debe alcalinizar el agua previo a la desinfección y se debe mantener este en un rango de 6-7 [13, p. C.84]

Tabla 20. *Tiempo de detención con pH 6 y temperatura 15 °C para Sulfato de Aluminio*

Sulfato de aluminio		
Dosis (mg/L)	K (mg-min/L)	Tiempo (min)
0,4	16	40,00
0,6	17	28,33
0,8	17	21,25
1	18	18,00
1,2	18	15,00
1,4	18	12,86
1,6	19	11,88
1,8	19	10,56
2	19	9,50
2,2	20	9,09
2,4	20	8,33
2,6	20	7,69
2,8	21	7,50
3	21	7,00

A partir de los valores de la constante (K) y la dosis (C), se calcula el tiempo de detención (t) con la ecuación 8.

$$Ct = K \quad [13, p. C.79] \quad (8)$$

Para las muestras tratadas con Moringa se debe emplear la tabla 21 debido a que se obtuvo una remoción de coliformes totales entre 90 al 95% y una turbiedad inferior a 1.0 UNT [13, p. C.80]. con estos valores de la constante K se obtiene una reducción de quistes de Giardia correspondiente a Log 3 que equivale a un 99.9% [26, p. 275].

Tabla 21. Valores de K (mg-min/L) para inactivación *Giardia* por cloro libre log 3.

Dosis de Cloro Aplicada mØl	10°C Ph				15°C Ph				20°C Ph				25°C Ph			
	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5
«=0.4	37	44	52	63	25	30	35	42	18	22	26	31	12	15	18	21
0,6	38	45	54	64	25	30	36	43	19	23	27	32	13	15	18	22
0,8	39	46	55	66	26	31	37	44	20	23	28	33	13	16	19	22
1	40	47	56	67	27	32	38	45	20	24	28	34	13	16	19	23
1,2	40	48	57	69	27	32	38	46	20	24	29	35	14	16	19	23
1,4	41	49	58	70	28	33	39	47	21	25	29	35	14	17	20	24
1,6	42	50	60	72	28	33	40	48	21	25	30	36	14	17	20	24
1,8	43	51	61	74	29	34	41	49	22	26	31	37	15	17	21	25
2	44	52	62	75	29	35	42	50	22	26	31	38	15	18	21	25
2,2	45	53	64	77	30	35	43	51	22	27	32	39	15	18	21	26
2,4	45	54	65	79	30	36	43	53	23	27	33	39	15	18	22	26
2,6	46	55	66	80	31	37	44	54	23	28	33	40	16	19	22	27
2,8	47	56	67	82	31	37	45	55	24	28	34	41	16	19	23	27
3	48	57	69	83	32	38	46	56	24	29	34	42	16	19	23	28

Adaptado del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS 2000.

[13].

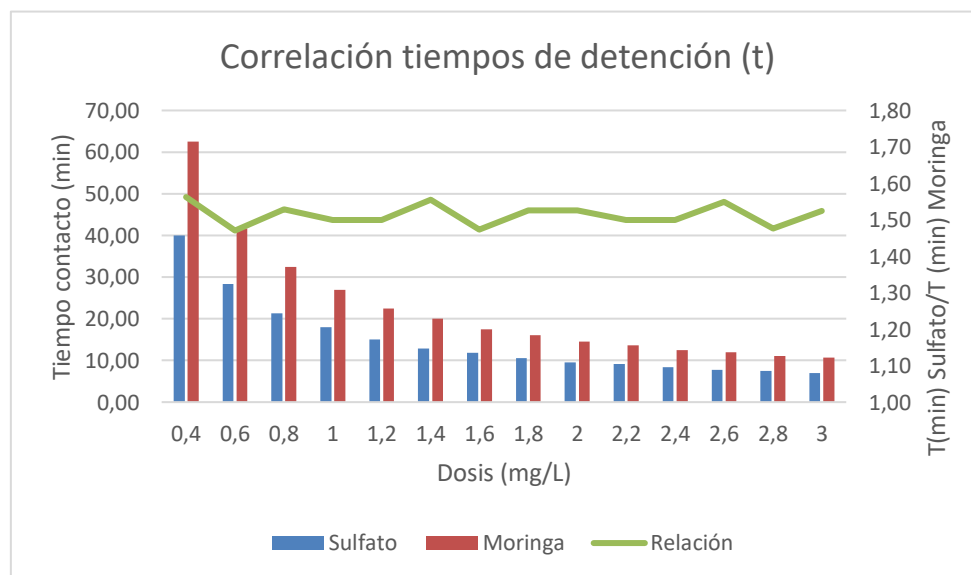
De acuerdo con la información de la tabla 5 las muestras se encuentran en un rango de temperatura de 15°C haciendo la selección de las posibles dosis con el pH. Las muestras tratadas con Moringa obtuvieron una media en el pH de 8,4. En este caso se hace necesario ajustar el pH del agua antes de la cloración debido a que debe desinfectarse el agua con niveles de pH inferiores a 7,5 ya que en un nivel mayor se retrasa la reacción del cloro con el amoniacó durante el proceso de desinfección [13, p. C.83], adicionalmente, se ajusta al mismo pH presentado por las muestras tratadas con sulfato de aluminio para realizar una comparación de los tiempos de concentración bajo las mismas condiciones de eficiencia de reacción del cloro.

Tabla 22. *Tiempo de detención con pH 7,5 y temperatura 15 °C para Moringa*

Moringa Oleífera		
Dosis (mg/L)	K (mg-min/L)	Tiempo (min)
0,4	25	62,50
0,6	25	41,67
0,8	26	32,50
1	27	27,00
1,2	27	22,50
1,4	28	20,00
1,6	28	17,50
1,8	29	16,11
2	29	14,50
2,2	30	13,64
2,4	30	12,50
2,6	31	11,92
2,8	31	11,07
3	32	10,67

Para el cálculo de los tiempos de detención se empleó la ecuación 8.

Con los tiempos de detención obtenidos para las condiciones de temperatura y pH de las muestras, se observa el análisis de correlación en la figura 22.

Figura 22. *Correlación entre tiempo de detención para Sulfato de Aluminio y Moringa*

Con esta información es posible determinar que bajo las mismas condiciones existe una relación con una media de 1.5 veces más tiempo de detención bajo la misma dosis para las muestras tratadas con Moringa respecto de las tratadas con sulfato de aluminio. Estos valores están directamente relacionados ya que presentan un coeficiente de correlación de 0.99 mostrando un comportamiento proporcional entre los tiempos requeridos para las muestras tratadas con ambos coagulantes.

Debido a que el tiempo de detención (t) y la dosis (C) son directamente proporcionales a la constante (K) como se observa en la ecuación 8, se determina que bajo condiciones de diseño en dónde se presente un tiempo de detención objetivo para un tren de tratamiento, se requeriría de una dosis 1,5 veces mayor de desinfectante si el agua es tratada con Coagulante de Moringa en comparación con el Sulfato de Aluminio.

Respecto a los parámetros de control luego del proceso de desinfección, se ha demostrado en [5, p. 40] que el coagulante de Moringa en comparación con coagulantes químicos como el sulfato de aluminio produce hasta 10.5 veces más trihalometanos bajo las mismas condiciones en el proceso de desinfección, haciendo necesaria una especial atención en la medición de este parámetro cuando se emplea el coagulante de Moringa.

6. Conclusiones

Debido a las variaciones en el caudal del río Magdalena a causa de las condiciones climáticas, se presentan diferencias en la turbiedad inicial en los grupos muestrales que tuvieron una turbiedad promedio de 935 UNT. De acuerdo con este parámetro el agua se clasifica como de una fuente muy deficiente, sin embargo, en cuanto a su pH presentó un valor promedio de 8,42 lo que se considera de una fuente aceptable, pero referente a los coliformes totales con el promedio de 490 (UFC/100mL) se encuentra dentro de una fuente de captación regular, lo cual clasifica a las muestras sin tratamiento como agua no apta para su consumo.

Para el coagulante natural de Moringa fabricado se obtuvo una remoción media de 98.74% con un pH 9 y una dosis de 11.0 mL, mientras que el sulfato de aluminio tipo A que fue empleado como parámetro de referencia, obtuvo un porcentaje de remoción medio de 99.47% con un pH 7 y una dosis de 10mL.

El uso del coagulante de Moringa implica en el proceso de desinfección la aplicación de dosis 1.5 veces mayores de desinfectante para un tiempo de detención determinado en comparación a coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio. Esto incurre en un incremento de la producción de Trihalometanos que se espera sea 10.5 veces mayor con respecto al sulfato de aluminio bajo las mismas condiciones de desinfección.

Bajo condiciones similares de remoción de turbidez, el coagulante natural de moringa presenta un efecto de aumento de dosis de cloro frente al coagulante químico tipo A de sulfato de aluminio, demostrando un menor efecto desinfectante ya que las muestras luego de la coagulación contienen más coliformes totales que las tratadas con sulfato.

Referencias

- [1] The United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), «Progress on drinking water, sanitation and hygiene 2000–2017. Special focus on inequalities,» UNICEF and WHO, New York, 2019.
- [2] J. Joshi y O. Sahu, «Azadirachta Indica Leaves as Antibacterial Treatment on Drinking Water,» *International Journal of Clinical Nutrition 2*, vol. 2, nº 2, pp. 36-40, 2014.
- [3] M. T. Olmedo Sánchez , «Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud,» *Higiene y Sanidad Ambiental*, nº 8, pp. 335-342, 2008.
- [4] I. López, «Estudio de alternativas para el tratamiento de agua en sistemas rurales de la república democrática del Congo,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2020.
- [5] C. H. Sampayo y J. J. Feria, «Determinación preliminar de productos secundarios de cloración (SPD), en aguas crudas del rio Magdalena tratadas con coagulantes naturales y sintéticos,» *BISTUA*, vol. 15, nº 2, pp. 37-42, 2017.
- [6] Ministerio de la protección social, «Decreto 1575 de 2007,» Ministerio de la protección social, 2007.
- [7] L. Guzmán, A. Villabona, C. Tejada y R. García, «Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión,» *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 16, nº 1, pp. 253-262, 2013.

- [8] I. Mendoza, N. Fernández, G. Ettiene y A. Díaz, «Uso de la Moringa Oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas,» *CIENCIA*, vol. 8, n° 2, pp. 235-242, 2000.
- [9] M. M. Sandoval y J. R. Laines, «Moringa Oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales,» *Ingeniería*, vol. 17, n° 2, pp. 93-101, 2013.
- [10] K. A. Yongabi, «Biocoagulants for Water and Waste Water Purification: a Review,» *International Review of Chemical Engineering*, vol. 2, n° 3, pp. 444-458, 2010.
- [11] Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, «Informe Nacional de Calidad del Agua para consumo Humano,» Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, Bogotá, Colombia, 2019.
- [12] Universidad de Concepción, Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos, Primera ed., G. Vidal y F. Araya, Edits., Universidad de Concepción, 2014.
- [13] Ministerio de desarrollo económico, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS2000: SECCIÓN 2, TÍTULO C. Sistemas de Potabilización, Bogotá, Colombia: Ministerio de desarrollo económico, 2000.
- [14] S. E. Aguirre, N. V. Piraneque y R. K. Cruz, «Sustancias Naturales: Alternativa para el Tratamiento de Agua del Río Magdalena en Palermo, Colombia.,» *Información Tecnológica*, vol. 29, n° 3, pp. 59-70, 2018.
- [15] Ministerio de la protección social. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, «Resolución 2115 de 2007 "Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano".,» Ministerio de la protección social. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2007.

- [16] F. Castellanos, *Revisión del uso de coagulantes naturales en el proceso de clarificación del agua en Colombia*, Universidad Militar Nueva Granada, 2017.
- [17] E. 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",» Universidad de Santander, 2019.
- [18] L. S. Castellanos y M. A. Martín, *Desarrollo de un coagulante orgánico a partir de la semilla de moringa para la empresa comercial Dacetex LTDA*, Fundación Universidad de América, 2020.
- [19] A. Turris, L. Ocando, M. Romero y M. Fernández, «¿Pueden los microorganismos impactar los materiales de construcción? Una revisión,» *Gaceta técnica*, n° 10, pp. 23-33, 2013.
- [20] J. J. Ferial, S. Bermúdez y A. M. Estrada, «Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú,» *Producción+Limpia*, vol. 9, n° 1, pp. 9-22, 2014.
- [21] J. L. Lugo, «Evaluación de alternativas de potabilización a bajo costo en comunidades palafíticas en el caribe norte colombiano,» Universidad del norte, Barranquilla, Colombia, 2017.
- [22] Procuraduría General de la nación, «Informe social, económico y ambiental, Río Magdalena, Procuraduría delegada para asuntos ambientales y agrarios,» 2013.
- [23] I. Meléndez, E. Pardo y A. Quijano, «Actividad genotóxica de aguas antes y después de clorar en la planta de potabilización Empopamplona,» *Bistua*, vol. 13, n° 2, pp. 12-23, 2015.
- [24] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Resolución 0330 de 2017 "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y

se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009",» Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017.

[25] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Determinación de Escherichia Coli y Coliformes Totales en agua por el método de filtración por membrana en Agar Chromocult,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2007.

[26] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO C. Sistemas de Potabilización, A. Vargas, Ed., Bogotá, Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010.

[27] J. Suárez, A. Jácome y P. Ures, «Coagulación-Floculación (FT-PRI-001),» Publicación Water Action Plan, 2014.

[28] J. Romero, Calidad del agua, Escuela colombiana de ingeniería, 2000.

[29] S. H. Lee, S. O. Lee, K. L. Jang y T. H. Lee, «Microbial flocculant from Arcuadendron sp. TS-49,» *Biotechnology letters*, vol. 17, n° 1, pp. 95-100, 1995.

[30] H. Ganjidoust, K. Tatsumi, T. Yamagishi y R. N. Gholian, «Effect of synthetic and natural coagulant on lignin removal from pulp and paper wastewater,» *Water Sci Technol*, vol. 35, n° 2-3, pp. 291-296, 1997.

[31] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah y B. G. Talbot, «Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera,» *Water Research*, vol. 29, n° 2, pp. 703-710, 1995.

- [32] C. Martín, G. Martín, A. García, T. Fernández, E. Hernández y J. Puls, «Potenciales aplicaciones de Moringa oleífera. Una revisión crítica,» *Pastos y Forrajes*, vol. 36, nº 2, pp. 137-149, 2013.
- [33] M. A. Bravo Gallardo, «Coagulantes Y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales,» Universidad distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia, 2017.
- [34] N. Chulluncuy, «Tratamiento de agua para consumo humano,» *Ingeniería Industrial*, nº 29, pp. 153-170, 2011.
- [35] Instituto Nacional de Salud, «Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio,» Bogotá D.C., 2011.
- [36] Centro de Estudios e Investigaciones CEIAM UIS, «Informe de resultados No. 014,» Laboratorio de Aguas y Suelos - UIS Piedecuesta, 2022.
- [37] Comisión Nacional del Agua, «Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento,» Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tlalpan, México, 2007.
- [38] Instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC), «Norma técnica colombiana (NTC 3903) Procedimiento para el método de jarras en la coagulación-floculación del agua.,» Instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC), Bogotá, Colombia, 2001.
- [39] M. Meza, K. Riaños, I. Mercado, R. Olivero y M. Jurado, «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, n° 2, pp. 95-103, 2018.

- [40] A. H. Mahvi, R. Sheikhi y K. Naddafi, «Total Coliforms and Turbidity Removal of Water in the Continuous Sand Filter,» *Iraní J Public Health*, vol. 32, n° 3, pp. 7-13, 2003.
- [41] STATPOINT TECHNOLOGIES, INC, «STATGRAPHICS Centurion XVII, Manual de usuario,» STATPOINT TECHNOLOGIES, INC, Estados Unidos de América, 2014.
- [42] Y. Andía Cárdenas, «Tratamiento de agua: Coagulación y floculación,» Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - Sedapal S.A., Lima, 2000.
- [43] W. A. Arismendi Espinosa, «Evaluación y comparación de la capacidad floculante de taninos modificados (quebracho, acacia, castaño) y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2016.