

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DEL ÁRBOL *CASSIA  
FISTULA* COMO COAGULANTE NATURAL EN LA REMOCIÓN DE  
PARTÍCULAS COLOIDALES EN AGUAS CRUDAS DEL RIO GUATAPURÍ**

**AUTOR (ES):**

ÁVILA FERNÁNDEZ KEVIN DAVID  
VALERA CABALLERO LUIS RAFAEL

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
VALLEDUPAR - CESAR  
2023**



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DEL ÁRBOL CASSIA  
FISTULA COMO COAGULANTE NATURAL EN LA REMOCIÓN DE  
PARTÍCULAS COLOIDALES EN AGUAS CRUDAS DEL RIO GUATAPURÍ**

**AUTOR (ES):**

ÁVILA FERNÁNDEZ KEVIN DAVID  
VALERA CABALLERO LUIS RAFAEL

**DIRECTOR / ASESOR:**

FERNANDO ANAYA PAYARES

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
VALLEDUPAR - CESAR  
2023**



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



### **DEDICATORIA**

Dedico este logro primeramente a Dios que, me ha dado la sabiduría, salud, fuerzas y es el motor principal de mi vida. A mi familia que, me han apoyado en todo momento, han creído en mí; en los momentos en que mi vulnerabilidad sale a flote, están para recordarme que tengo que seguir adelante y alcanzar la meta propuesta, en especial a mi madre: Ladys María Fernández Hernández que, me ha enseñado a ser esforzado y valiente.

**Ávila Fernández Kevin David**

Dedico con todo mi corazón este trabajo a Dios, por derramar bendiciones sobre mi día a día, por mostrarme la luz en medio de la oscuridad y por enseñarme a ser fuerte en medio de las adversidades. A mis padres, Sirleth caballero Nieves y Luis Gregorio Valera Manjarrez. por apoyarme inalcanzablemente, por dejar a un lado sus necesidades y satisfacer las mías.

**Valera Caballero Luis Rafael**





**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



### **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer en primer lugar a Dios por permitirnos llegar hasta este punto, por llenarnos de inteligencia, sabiduría y disciplina para culminar este proyecto. Agradecer a nuestro director Fernando Anaya por ser guía en este proceso, por cada uno de sus aportes, sugerencias, por confiar y creer en los resultados de esta investigación. ¡Gracias por su dedicación y paciencia! Asimismo, gracias a los docentes en general y evaluadores de este estudio por siempre estar dispuesta a ayudar y compartir sus conocimientos; gracias por enseñarnos que antes de ser profesionales debemos aprender a ser personas.

También, queremos agradecer a la Universidad Popular del Cesar por abrirnos las puertas y darnos la oportunidad de crecer personal y profesionalmente y al programa de ingeniería ambiental y sanitaria.

Ávila Fernández Kevin David

Valera Caballero Luis Rafael



## Tabla de Contenido

	Pág.
Lista de Tablas.....	8
Lista de Figuras .....	9
Resumen .....	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1. Título .....	13
2. Planteamiento y Formulación del Problema.....	14
3. Justificación .....	16
4. Objetivos.....	18
4.1 Objetivo General.....	18
4.2 Objetivo Especifico .....	18
5. Marco Referencial .....	19
5.1 Antecedentes de la Investigación .....	19
5.2 Marco Teórico .....	23
5.2.1 El Agua.....	23
5.2.2 Coagulación y Floculación .....	26
5.2.3 Turbidez.....	29
5.2.4 Árbol <i>Cassia fistula</i> .....	32
5.2.5 Prueba de Jarras .....	34
5.2.6 Coagulantes para tratamiento de agua.....	35
5.3 Marco Conceptual.....	39

5.4 Marco Contextual .....	40
5.5 Marco Legal.....	42
6. Marco Metodológico .....	46
6.1 Tipo de Investigación .....	46
6.2 Nivel de Investigación .....	46
6.3 Población de Estudio .....	46
6.4 Muestra Poblacional .....	46
6.5 Desarrollo Metodológico.....	46
6.5.1 ETAPA 1: Determinar la actividad coagulante de las semillas del árbol <i>Cassia fistula</i> y el sulfato de aluminio. ....	48
6.5.2 ETAPA 2: Diseñar los diagramas de la actividad coagulante en función de la dosis utilizada y de la turbidez inicial de las muestras de agua.....	50
6.5.3 ETAPA 3: Establecer la eficiencia de remoción de las semillas de <i>Cassia fistula</i> frente al coagulante químico convencional (sulfato de aluminio).....	50
6.6 Diseño Experimental .....	51
7. Análisis de resultados .....	52
7.1 Etapa preliminar .....	52
7.2 Determinar la actividad coagulante de las semillas del árbol <i>Cassia fistula</i> .....	54
7.3 Determinar la actividad coagulante del sulfato de aluminio. ....	57
7.4. Diseñar los diagramas de la actividad coagulante .....	59
7.5 Eficiencia de remoción de las semillas de <i>Cassia fistula</i> frente al coagulante químico convencional (sulfato de aluminio). ....	60
7.6 Diseño experimental.....	63



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



8. Conclusiones.....	66
9. Recomendaciones .....	68
Referencias Bibliográficas.....	69



### Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Normatividad general. ....	42
Tabla 2. Normatividad específica. ....	44
Tabla 3. Caracterización del agua cruda. ....	54
Tabla 4. Réplicas de ensayo de jarras <i>Cassia fistula</i> . ....	55
Tabla 5. Porcentajes de actividad coagulante de <i>Cassia fistula</i> . ....	56
Tabla 6. Réplicas de ensayo de jarras del Sulfato de Aluminio. ....	57
Tabla 7. Porcentajes de actividad coagulante del Sulfato de Aluminio. ....	58
Tabla 8. Análisis de varianza para los tratamientos. ....	64
Tabla 9. Combinaciones. ....	65



### Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Turbidímetro. ....	32
Figura 2. Árbol Cassia fistula. ....	32
Figura 3. Hojas del árbol Cassia fistula. ....	33
Figura 4. Flores del árbol Cassia fistula. ....	34
Figura 5. Vainas del árbol Cassia fistula. ....	34
Figura 6. Equipo de prueba de jarras. ....	35
Figura 7. Río Guatapurí. ....	42
Figura 8. Semillas de Cassia fistula recogidas y clasificadas para el coagulante. ....	52
Figura 9. Proceso de exponer al sol, molienda y tamizaje. ....	53
Figura 10. <i>Disolución del polvo de semilla de Cassia fistula en agua destilada.</i> ....	53
Figura 11. <i>Ensayo de jarras.</i> ....	55
Figura 12. Actividad coagulante de Cassia fistula. ....	59
Figura 13. Actividad coagulante del Sulfato de Aluminio. ....	60
Figura 14. Porcentaje de eficiencia en época de Sequía. ....	61
Figura 15. Porcentaje de eficiencia en época de lluvia. ....	62





### **Resumen**

La calidad del agua para consumo humano requiere de tratamientos estrictos con el fin de no provocar efectos dañinos en la salud de las personas, uno de estos procesos es la coagulación; encargada de eliminar las partículas coloidales. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* como coagulante natural en la remoción de partículas coloidales en suspensión en aguas crudas del río Guatapurí. La metodología fue experimental, se establecieron tres etapas metodológicas: la primera fue determinar la actividad del coagulante de las semillas del árbol *Cassia fistula* y el sulfato de aluminio, luego se diseñaron los diagramas de esta actividad y, por último, se estableció la diferencia que existía entre los dos tratamientos, teniendo en cuenta la eficiencia, lo cual además fue comprobado mediante un diseño experimental de un factor. Encontrando en los resultados que, en la época de sequía, la semilla de *Cassia fistula* obtuvo una eficiencia de 96,1% con una dosis de 20 mg/l, mientras que el sulfato de aluminio presentó una eficiencia de 96,04%, pero con una dosis más alta de 25 mg/l y, en la época de lluvias se halló que, ambos coagulantes presentan la mayor eficiencia en la dosis 35 mg/l, sin embargo el resultado de *Cassia fistula* es mucho más alto alcanzando un umbral del 63,94% con una diferencia del 12,67% con respecto al sulfato de aluminio, resaltando que el pH en ninguno de los dos tratamientos se vio afectado de manera significativa.

Palabras clave: Agua cruda, Coagulación, *Cassia fistula*, Turbiedad, Tratamiento de agua.





**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



### **Abstract**

The quality of water for human consumption requires strict treatments in order not to cause harmful effects on people's health, one of these processes is coagulation; responsible for removing colloidal particles. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the seeds of the *Cassia fistula* tree as a natural coagulant in the removal of colloidal particles in suspension in the raw water of the Guatapurí River. The methodology was experimental, there were three methodological stages: the first was to determine the activity of the coagulant of the seeds of the *Cassia fistula* tree and aluminum sulfate, then the diagrams of this activity were designed and, finally, the differences that they existed between the two treatments, considering the efficiency, which was also verified by means of a one-factor experimental design. Finding in the results that, in the dry season, the *Cassia fistula* seed obtained an efficiency of 96.1% with a dose of 20 mg/l, while aluminum sulfate presented an efficiency of 96.04%, but with a higher dose of 25 mg/l and, in the rainy season, it was found that both coagulants have the highest efficiency at the 35 mg/l dose, however the result of *Cassia fistula* is much higher, reaching a threshold of 63.94% with a difference of 12.67% with respect to aluminum sulfate, highlighting that the pH in neither of the two treatments was significantly affected.

**Keywords:** Raw water, Coagulation, *Cassia fistula*, Turbidity, Water treatment.



## **Introducción**

La preocupación por la calidad del agua ha venido aumentando principalmente en países que están en vía de desarrollo, esto debido a que los cuerpos de agua están constantemente expuestos a la contaminación, los cuales arrastran partículas coloidales, generando turbidez por causa de los sedimentos; convirtiéndose en un medio de dispersión de patógenos que afectan principalmente la salud de los niños; impactando también el desarrollo económico y social de las comunidades (UNICEF; Joshi y Sahu, 2014).

Las sales inorgánicas de aluminio son las más utilizadas para ayudar en el proceso de potabilizar el agua cruda, específicamente en la etapa de coagulación, ya que crean flóculos que se precipitan por gravedad (Prasca y Vergara, 2017). Sin embargo, existen grandes desventajas asociadas su uso, como la producción de grandes cantidades de lodos, alta variación del pH del cuerpo hídrico tratado y sus altos costos de adquisición (Yin, 2010)

En la actualidad, con el fin de evitar los inconvenientes ya mencionados causados por este tipo de agentes químicos, se han venido estudiando los materiales vegetales extraídos de raíces, hojas, cortezas y semillas de plantas, como una alternativa eficiente y natural para remover la turbidez del agua, brindando beneficios como economía, fácil acceso, biodegradabilidad, y sin efectos negativos en la salud humana (Muthuraman y Sasikala, 2014), quedando demostrado que ciertas especies de plantas poseen una alta actividad coagulante, que actúan de forma parecida a los coagulantes químicos (Prasca y Vergara, 2017).

Dado lo anterior, la presente investigación pretende evaluar la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* como coagulante natural en la remoción de partículas coloidales en suspensión en las aguas crudas del río Guatapurí, comparándolo con el coagulante químico convencional más usado; el sulfato de aluminio.

## **1. Título**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DEL ÁRBOL *CASSIA FISTULA* COMO COAGULANTE NATURAL EN LA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS COLOIDALES EN AGUAS CRUDAS DEL RIO GUATAPURÍ.**



## **2. Planteamiento y Formulación del Problema**

Es bien sabido, que para que el agua sea apta para el consumo humano, esta requiere de tratamientos específicos dependiendo en gran medida del tipo de fuente que provenga (Navas, 2017). Por su parte, el agua cruda que proviene de fuentes de tipo natural, posee partículas coloidales debido a diferentes tipos de sedimentos y nutrientes, que deben ser removidos ya que producen turbiedad (Fuentes et al., 2008). En este sentido, la clarificación del agua, es fundamental para la potabilización de esta, principalmente en la fase de coagulación en donde se eliminan las partículas presentes en el agua y generalmente se utiliza una sustancia química para desestabilizarlas (Parra et al., 2011).

El uso de coagulantes químicos, tales como las sales de hierro y aluminio, se ha venido cuestionando en la actualidad debido, entre otras causas, a la dificultad técnica para conservar el pH de coagulación en un estado adecuado durante el proceso de operación; además de que se ha detectado una posible relación de su uso, con el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas, debido a la presencia de residuos de aluminio en el agua tratada (Guzmán et al., 2013).

Por otro lado, también hay evidencia de que el aluminio absorbido se puede acumular en diferentes tejidos principales como son el cerebro, el hígado, huesos, entre otros, además de interferir en el transporte de hierro lo que produce anemia y reduce la capacidad del cuerpo para absorber calcio lo que puede originar diferentes tipos de deformaciones, dolores, fracturas en los huesos, entre otras afectaciones (Del Valle, 2017). Asimismo, también se tienen afectaciones de tipo ambiental, como lo es la generación en cantidades aumentadas de sedimentos que, al ser vertidos finalmente en las fuentes de agua pueden llegar a ser tóxicos para la vida acuática (Cabrera et al., 2017).

Ante todas estas posibles alteraciones, surge la necesidad de buscar alternativas amigables con la salud humana y del ambiente, que puedan sustituir total o parcialmente



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**

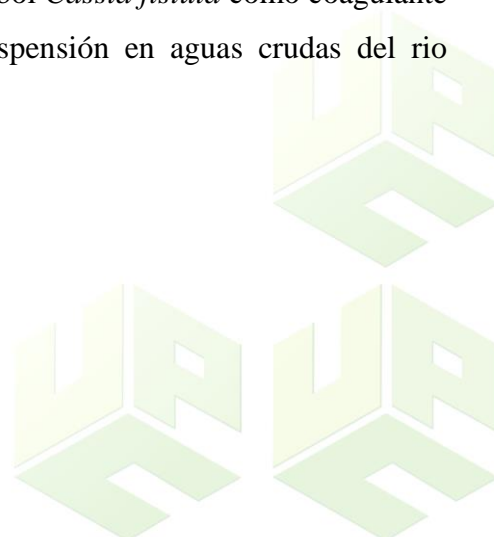


dichos coagulantes químicos convencionales, lo que da pie para considerar los agentes naturales como alternativas eficaces cuyos resultados de coagulación sean los óptimos para tratar el agua, por lo que debemos considerar los coagulantes naturales como una respuesta alternativa a los coagulantes convencionales químicos ya que, generalmente, poseen una mínima o nula toxicidad, además de ser poco costosos (Cerón y Nadine, 2015), resultando hoy en día ser necesaria e imprescindible la utilización de los mismos, teniendo en cuenta las realidades socio-económicas de muchos países.

Dado lo anterior, la presente investigación pretende evaluar la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* como coagulante natural en la remoción de partículas coloidales en suspensión en las aguas crudas del río Guatapurí, estableciendo su eficiencia de remoción con respecto al coagulante químico convencional más usado; el sulfato de aluminio, esperando de esta forma obtener un agua potable a menores costos operativos, que ayude también a impulsar la reducción del empleo de coagulantes químicos y cuyo tratamiento aporte a una minimización de los impactos negativos en el ambiente.

Lo anterior da lugar a la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué tan eficientes pueden ser las semillas del árbol *Cassia fistula* como coagulante natural en la remoción de partículas coloidales en suspensión en aguas crudas del río Guatapurí?



### 3. Justificación

La técnica de la coagulación es usada para tratar el agua; dicha técnica consiste en separar las impurezas que estén presentes en el recurso hídrico contaminado. Para tal fin, generalmente se utilizan coagulantes químicos como son las sales inorgánicas de hierro y aluminio, ya que poseen una alta rentabilidad, disponibilidad y rendimiento (Singh y Kumar, 2011). No obstante, su utilización trae consecuencias que son nocivas para el ambiente, por lo que en la actualidad se buscan otras alternativas como son los coagulantes naturales, siempre y cuando puedan realizar esta misma función.

Para el propósito de esta investigación, se pretende evaluar el carácter coagulante de la *Cassia fistula* o Caña fístula, ya que las semillas de este árbol poseen una alta actividad coagulante (Guzmán et al., 2015), además, el procesamiento de estas resulta sencillo y económico debido a que, para su pulverización solamente se requiere la selección de la semilla y del molino respectivo para llevar a cabo este proceso. Sin embargo, para establecer qué tan eficiente es la semilla *Cassia fistula* en el proceso de coagulación del agua, resulta imprescindible evaluar su acción coagulante frente a un coagulante químico convencional, para lo cual se seleccionó el sulfato de aluminio, siendo uno de los coagulantes químicos más utilizados en tratamientos de aguas residuales, debido a su bajo costo, alto rendimiento y gran disponibilidad (Bravo, 2017).

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se generará un valioso aporte académico-científico, puesto que se ampliará la información existente sobre el poder coagulante de las semillas de la *Cassia fistula*, las cuales son fáciles de conseguir en el departamento del Cesar, ya que cuenta con una alta cantidad de estos ejemplares que por lo general son desaprovechadas; por lo que se evaluará su acción coagulante en las aguas crudas del Rio Guatapurí; dado que muchas fincas, veredas aledañas y el mismo municipio de Valledupar se abastecen del agua de este río, motivo por el cual la utilización de esta cuenca como objeto de investigación será muy aprovechable para la sociedad.



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



De esta forma, también se realizaría un aporte a nivel social y ambiental ya que, dadas las características de economía y rentabilidad que poseen las semillas de este árbol, diversas comunidades de escasos recursos podrían utilizar este coagulante natural de una forma efectiva al tratar las impurezas del agua de una forma biológica, económica y asequible, minimizando a su vez los impactos negativos a los ecosistemas acuáticos causados por el uso prolongado de coagulantes químicos.





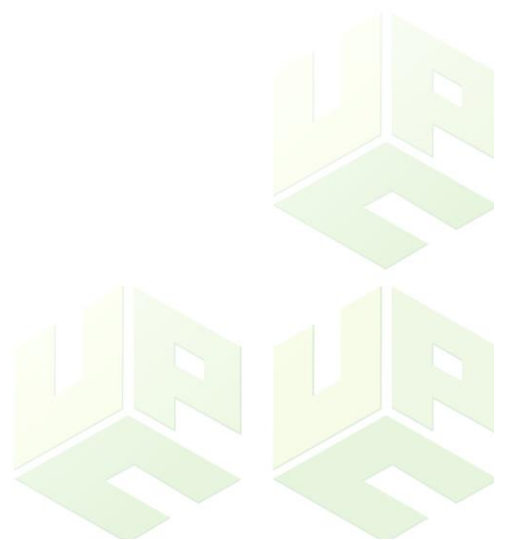
## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* como coagulante natural en la remoción de partículas coloidales en suspensión en aguas crudas del río Guatapurí.

### 4.2 Objetivo Especifico

- Determinar la actividad coagulante de las semillas del árbol *Cassia fistula* y el sulfato de aluminio.
- Diseñar los diagramas de la actividad coagulante en función de la dosis utilizada y de la turbidez inicial de las muestras de agua.
- Establecer la eficiencia de remoción de las semillas de *Cassia fistula* frente al coagulante químico convencional (sulfato de aluminio).



## 5. Marco Referencial

### 5.1 Antecedentes de la Investigación

En las investigaciones realizadas, se encontraron diferentes documentos que han sido de utilidad para obtener información relacionada a lo que se desea lograr, a continuación, se mencionarán dichos documentos, mostrando la relación de manera directa y concisa con respecto al presente proyecto.

Los autores Salome, E. y Salvatierra, J. (2019), desarrollaron la investigación titulada “Evaluación de la concentración de la semilla de *Cassia fistula* como coagulante natural y el tiempo de agitación, en el tratamiento de aguas para la potabilización en la Unidad Minera Poderosa – Huancavelica, Perú”; para optar el título de Ingeniero Químico Industrial en la Universidad Nacional Del Centro Del Perú, con la finalidad de determinar la incidencia de la concentración del polvo de la semilla de *Cassia fistula* como coagulante natural y el tiempo de agitación, sobre la turbidez en el tratamiento de agua potable de la Unidad Minera Poderosa. El polvo de dicha semilla se probó como coagulante natural en muestras de agua cruda con 3 niveles diferentes de concentración de coagulante y tiempo de agitación de 15mg/L, 20 mg/L, 30mg/L y 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos, respectivamente. Como resultado principal se obtuvo que, la remoción de turbidez en agua cruda alcanzó hasta el 97,8% en época de verano y hasta el 98,7% en época de invierno, con una dosis óptima de 20 ppm y a 40 minutos como tiempo de agitación. Se encontró variaciones de pH de 8,03 en época de verano y 8,09 en época de invierno con 30 ppm de dosis de coagulante.

Este estudio aporta múltiples beneficios a la presente investigación, dado que sus objetivos son muy afines, teniendo en cuenta que el estudio caracteriza el componente activo de coagulación de la semilla de *Cassia fistula*, así como la turbidez al momento de utilizarla para tratar el agua, los tiempos de agitación, velocidad de sedimentación y, finalmente, compara la turbidez obtenida al utilizar la semilla, con los resultados de turbidez del sulfato

de aluminio, por lo que entrega valiosos datos que pueden servir de referencia a esta investigación.

Los autores Meza, M., Riaños, K., Mercado, I., Olivero, R. y Jurado, M. (2018), desarrollaron su artículo científico titulado “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”, publicado en la Revista UIS Ingenierías, con el objetivo de evaluar el poder coagulante que tiene la semilla de Moringa oleífera realizando una comparación con el sulfato de aluminio. Mediante un muestreo simple del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico, se registró sus características iniciales, posteriormente, mediante el test 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 Moringa oleífera reducen este mismo parámetro en un 64%.

Este artículo, aporta a la presente investigación datos significativos al comparar un coagulante natural con uno químico, recomendando con base en sus resultados el coagulante natural por su baja toxicidad, resultado que también se espera obtener en este proyecto.

Los autores Tarón, A. Guzmán, L. y Barros, I. (2017), desarrollaron el artículo científico denominado “Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales”, publicado en la revista Orinoquia, de la Universidad de los Llanos, con el fin de evaluar la utilización del polvo de la semilla de la *Cassia* fístula como coagulante natural en el tratamiento primario del aguas residual doméstica de una estación de bombeo en la ciudad de Cartagena de Indias, estableciendo su dosis óptima mediante la prueba de jarras y determinando los parámetros fisicoquímicos de DBO5, DQO, conductividad, color, turbidez, alcalinidad total, y dureza total. Como resultado se encontró una dosis óptima del coagulante natural comprendida entre 15-25 mg/L, obteniendo valores finales de 30.25 NTU en la turbidez y 84 UC de color respectivamente.



El test de jarras arrojó una dosis de 160 mg/L de agente coagulante, los valores mínimos para el color son de 84 UPC y para la turbidez de 30.25 NTU, obteniendo una dosis óptima de 160 mg/L de este coagulante natural.

Este artículo posee gran similitud con el presente proyecto, otorgando datos y valores de referencia en cuanto a los estándares mínimos que debe tener un agua cruda en Colombia, además demuestra que la *Cassia fistula* es un coagulante natural, prometedor y eficaz para la sustitución de coagulantes inorgánicos en el proceso de coagulación de aguas, que es lo que se pretende demostrar también en esta investigación.

Los autores Prasca, L. y Vergara, J. (2017), desarrollaron la investigación titulada “Valoración de la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* en la remoción de turbidez en agua cruda”, en la universidad de Sucre, para optar el título de ingeniero civil en la Universidad de sucre, con la finalidad de determinar la eficiencia de estas semillas como coagulante natural para la remoción de turbidez en agua cruda del Río Sinú. Se trabajó con dosis de 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 mg/l, usando la prueba de jarra, replicando cada uno de los ensayos realizados, con una jarra de blanco. Como producto de esta investigación se obtuvo que las dosis aplicadas en muestras de agua cruda, no influyen directamente en la actividad coagulante de las semillas. Sin embargo, durante los ensayos realizados, la mayor actividad coagulante (60%) se obtuvo con agua cruda de turbidez inicial igual o mayor a 532 UNT.

Esta investigación de pregrado aporta múltiples beneficios al presente proyecto de investigación, ya que al analizar las semillas de *Cassia fistula* por dosis, permite obtener una información mucho más específica sobre las características de la coagulación con dicho agente.

Los autores Ramírez, H. y Jaramillo, J. (2015), en el artículo de revisión denominado “Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua”, publicado en la revista facultad de ciencias básicas de la Universidad Militar Nueva Granada. Como resultado se

obtiene que los dos agentes naturales más estudiados y utilizados a nivel mundial y que presentan gran capacidad en los procesos de coagulación del agua son la Moringa oleífera y diferentes tipos de cactus; siendo una alternativa ambientalmente sostenible para poblaciones que no puedan acceder al agua debido a su situación socioeconómica. Además, algunos de los agentes presentados en esta revisión pueden emplearse para el proceso de desinfección debido a su actividad antimicrobiana, estando estos agentes en etapa previa de estudios con el fin de poder reducir el uso de los halógenos (cloro, bromo yodo, flúor) en el proceso de desinfección.

Este artículo teórico enriquece esta investigación con sus estudios sobre nuevas y eficientes alternativas que brindan la posibilidad de mejorar la calidad del agua para el consumo humano; proponiendo materias primas de bajo costo, inocuas para la salud humana y respetuosa con el medio ambiente; esta revisión sirve como base para conocer las características de los agentes naturales y sus principales aplicaciones en el tratamiento del agua.

Los autores Ricaurte, L., Valdes, Morales, M. y Rodríguez, Y. (2014), presentaron una investigación titulada “Tratamiento de aguas crudas usando quitosano como coagulante orgánico”, como grupo de investigación Ciencia, Ambiente y Tecnologías de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Popular del Cesar, la cual realizaron con el fin de Evaluar la coagulación del Quitosano como agente natural en el tratamiento de aguas crudas cuyas muestras fueron tomadas del perfil de gota fría y huaricha en la planta de tratamiento de agua potable de la Empresa de Servicios Públicos de Valledupar, EMDUPAR E.S.P. Para lograr tal fin, en la etapa 1 se preparó la solución del coagulante quitosano comercial Sigma Chemical Co. (QC) y otra muestra con sulfato de aluminio para realizar una comparación, posteriormente en la etapa 2, se evaluó el proceso de coagulación mediante una prueba de jarras. Luego, en la etapa 3, se realizó un proceso de caracterización del agua cruda (antes y después de la coagulación); determinando turbidez, pH y sólidos suspendidos totales

(SST). Finalmente, en la última etapa se compararon las concentraciones medias de los parámetros evaluados con respecto a cada tratamiento aplicando análisis de varianza (ANOVA) y prueba a posteriori de Dunnet. Los resultados arrojaron que el Quitosano removió el 98,55% de los SST responsables de la turbidez y color del agua, el tiempo de formación del floc de este fue de 3':47" mientras que el del sulfato de aluminio fue de 5':34, por lo que se comprueba la alta eficacia de este coagulante natural, en el tratamiento de cuerpos de agua.

Esta investigación aporta unas valiosas referencias al presente proyecto, ya que compara un coagulante natural con el sulfato de aluminio, compartiendo grandes similitudes con este proyecto incluyendo la ciudad, la fuente de las muestras de agua (bocatoma de EMDUPAR) y el laboratorio a realizar las pruebas, y por ende las condiciones ambientales a las que se encontrarán dichas muestras, siendo sus resultados, conclusiones y recomendaciones, un marco de referencia significativo para este proyecto de investigación.

## **5.2 Marco Teórico**

### **5.2.1 El Agua**

#### **5.2.1.1 Generalidades.**

Más del 70% del planeta Tierra está cubierto de agua, siendo esta determinante para la vida de los seres vivos debido a que tiene gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en estos, tales como el transporte de nutrientes y la evacuación de desechos, fundamentales para el sostenimiento y reproducción de la vida en el planeta.

Químicamente el agua o dihidruro de oxígeno (H<sub>2</sub>O), está compuesta por dos átomos de hidrogeno y un átomo de oxígeno. Esta molécula posee un carácter bipolar fuerte gracias a la carga positiva del hidrógeno y a la carga negativa del oxígeno, razón por la cual puede

realizar enlaces con cualquiera de las partes (negativa o positiva), permitiéndole aislar iones de otro compuesto, neutralizar sus cargas y finalmente disolverlos (Prasca y Vergara, 2017).

#### **5.2.1.2 Deterioro de la Calidad del Agua**

En todos los cuerpos de agua del mundo se presenta el fenómeno de eutrofización natural, el cual se caracteriza por la acumulación gradual de nutrientes y biomasa, lo que provoca un aumento de la fotosíntesis y el descenso de la profundidad promedio de la columna de agua. Sin embargo, a esta se suma la eutrofización cultural, la cual es causada por el ser humano al descargar desperdicios orgánicos y/o nutrientes. La eutrofización es una problemática ambiental a escala mundial ocasionada por la contaminación por nutrientes (N y P) y con la consecuente degradación de la calidad del agua, estructura del ecosistema y función de los sistemas acuáticos (Beltrán, Guajardo, Barceló y López, 2017).

Estas costumbres dañinas ocasionan la proliferación de algas y vegetación en los cuerpos de agua, lo que provoca la disminución de la penetración de la luz en los cuerpos de agua, disminuyendo el oxígeno disuelto y provocando distintos trastornos en la potabilización del agua (Olivos, 2010).

#### **5.2.1.3 Indicadores de la Calidad del Agua**

Las cualidades o propiedades físicas del agua son fieles indicadores de la calidad del preciado líquido, estas se caracterizan por ser apreciables ante los sentidos, a continuación, se describe cada una de ellas:

#### **5.2.1.4 Color**

Generalmente el color es provocado por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica producto de la descomposición de materia, la presencia de compuestos metálicos en las fuentes de agua, la descarga industrial, etc. El color que presenta el agua cruda se

denomina “color aparente”, mientras que el color que permanece en el agua luego de ser removida la turbidez se denomina “color verdadero” (Barrenechea, s.f. ).

En la formación del color en el agua intervienen entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados (Hanna Instruments, 2018).

#### **5.2.1.5 Turbiedad**

La turbidez del agua está relacionada con la propiedad óptica que esta tiene de permitir o no el paso de la luz a través de ella, causada por la presencia de sólidos suspendidos o coloides que provienen de limos, arcillas y por microorganismos. Determinar los niveles de turbiedad de una fuente de agua resulta muy importante, ya que por medio de esta propiedad física se establece el grado de tratamiento que se le debe dar al agua para hacerla óptima para el consumo humano.

La remoción de la turbiedad en el agua cruda se realiza usando sustancias coagulantes en la etapa de coagulación, la cual se caracteriza por no ser compleja, pero si sumamente importante en el tratamiento del agua, debido a que la presencia de coloides disminuye la eficiencia del proceso de desinfección, ofreciendo protección a los microorganismos patógenos (Prasca y Vergara, 2017).

#### **5.2.1.6 Olor y Sabor**

Estas propiedades físicas del agua son determinantes en la aceptación del consumidor, debido a que la presencia de olor en el agua se relaciona con la presencia de contaminantes. Los principales generadores de olor y sabor en una fuente de agua son los compuestos orgánicos resultantes de los procesos microbiológicos y de la descarga de aguas residuales provenientes de las industrias (Prasca y Vergara, 2017).



#### **5.2.1.7 Potencial de Hidrogeno (pH)**

El pH es la medida que indica los niveles de acidez del agua, característica que influye no solo en los procesos de coagulación y desinfección, sino que es responsable de ocasionar corrosión e incrustaciones en las redes de distribución. (Vargas de, et al., 2004)

#### **5.2.1.8 Sólidos**

En una fuente de agua cruda se encuentran presentes dos tipos de sólidos, los sedimentables y los no sedimentables; el primer grupo está compuesto por aquellos sólidos que sedimentan por acción de la gravedad y en el segundo grupo se encuentran los sólidos disueltos y coloides. Los sólidos disueltos no son sedimentables e influyen directamente en el color y olor del agua y los coloidales son los que provocan la turbiedad neta del agua (Vargas de, et al., 2004)

#### **5.2.1.9 Temperatura**

Vargas de, et al., (2004); Afirma que la temperatura del agua es una de las características físicas más importantes debido a que esta influye en:

- La aceleración o retardo de la actividad biológica.
- La absorción de oxígeno.
- La precipitación de compuestos.
- La formación de depósitos.
- En los procesos unitarios de potabilización

#### **5.2.2 Coagulación y Floculación**

Son procesos fisicoquímicos utilizados para eliminar las partículas coloidales de las aguas residuales industriales. Este fenómeno ocurre al adicionar un agente coagulante, el cual cancela las cargas electrostáticas de las partículas al tiempo que origina una compresión de la capa difusa que rodea los coloides, lo cual les permite la formación de flóculos a través de

un mecanismo de puentes entre partículas, produciendo una malla porosa en función de su radio efectivo, facilitando así la formación de macro flóculos. Muchos coagulantes son ampliamente utilizados en los procesos de tratamiento de agua, estos coagulantes pueden clasificarse en coagulantes inorgánicos, polímeros orgánicos sintéticos y coagulantes de origen natural (Bravo, 2017).

### **5.2.2.1 Factores que Influyen en la Coagulación**

#### **Acidez o basicidad**

Es necesario conocer en qué escala está el pH y la naturaleza del agua a tratar, si el agua posee un pH ácido o básico por lo general siempre se va utilizar más cantidad de coagulante (Pérez, 2016).

#### **Influencia de las sales disueltas.**

Nos referimos a que el pH será modificado por la presencia de sales disueltas en el agua, por lo cual el tiempo de coagulación y floculación varían, si el agua posee un pH básico o alcalino requerirá más coagulante para su acción de sedimentación.

#### **Temperatura del agua.**

La formación de flóculos se ve severamente influenciada por las variaciones de temperatura; un aumento de la temperatura acelera la coagulación o floculación obteniendo mejores resultados visibles (Chavez, 2018).

#### **Influencia de la mezcla.**

Es necesario esparcir el coagulante de forma homogénea por todo el recurso hídrico para se logre observar una sedimentación o un proceso de coagulación completa (Chavez, 2018).



### **Coagulantes-floculantes inorgánicos**

Son los más utilizados para el tratamiento de aguas residuales, debido a su rendimiento, disponibilidad, costo y efectividad. Poseen la capacidad de actuar como coagulantes y floculantes, cuando son disueltos estos forman compuestos complejos hidratados. Entre los más utilizados se hallan, sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y el aluminato de sodio. Aunque estas sales químicas, presentan alta capacidad de coagulación- floculación, pueden llegar a ser nocivos para la salud humana y el medioambiente (Bravo, 2017).

#### **5.2.2.2 Coagulantes-Floculantes Orgánicos Sintéticos**

Los coagulantes orgánicos son polímeros solubles en agua que están basados en unidades repetidas de varios monómeros tales como acrilamida y ácido acrílico. En la mayoría de los casos, se derivan de materias primas basadas de petróleo y no renovables. Generalmente, los polímeros sintéticos se clasifican en catiónico, aniónico, anfótero y no iónico. La capacidad coagulante es principalmente influenciada por parámetros como la naturaleza de las cargas, seguida por el peso molecular y la densidad de carga (Bravo, 2017).

Los tipos de floculantes más efectivos son las poliacrilamidas ligeramente aniónicas con masas moleculares muy elevadas que se aplican en muy bajas concentraciones, lo que compensa su alto precio. Actualmente se emplea una gran variedad de polímeros orgánicos sintéticos, sin embargo, la toxicidad de estos productos es un factor de importancia en tanto que en ocasiones los monómeros que los componen pueden ser tóxicos, como lo son los monómeros acrílicos (Bravo, 2017).

#### **5.2.2.3 Coagulantes-Floculantes Naturales**

Se consideran una fuente alternativa con un gran potencial, debido a que son biodegradables y no generan daños al medio ambiente en comparación con coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos. En su mayoría son de origen vegetal, con presencia de

agentes coagulantes activos como carbohidratos, taninos y proteínas. Algunas especies vegetales que presentan estudios realizados son las semillas de una enorme variedad plantas como las semillas de maíz y Nirmali (Choque et al., 2018).

#### **5.2.2.4 Mecanismos de Coagulación y Floculación**

Para explicar la interacción de diferentes tipos de agentes coagulantes con las partículas coloidales presentes en el agua, se han llevado a cabo mediante los principales mecanismos de coagulación y floculación, como la neutralización de carga, la formación de puentes, parche electrostático y de barrido. A partir de dosis óptimas de coagulante y floculante en muestras de aguas residuales, el agente coagulante hace contacto con los coloides suspendidos por adsorción a través de interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, etc. Esto conduce a la desestabilización de coloides y suspensiones y posteriormente a un reordenamiento de la conformación del polímero adsorbido de tal manera que las partículas en suspensión adsorbidas se agregan para formar grandes flóculos que a continuación se establecen de manera efectiva (Bravo, 2017).

#### **5.2.3 Turbidez**

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión, cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua (Prasca y Vergara, 2017).

##### **5.2.3.1 Causas de la Turbidez**

Hay varios parámetros que influyen en la turbidez del agua. Algunos de estos son:

- Fitoplancton.
- Sedimentos procedentes de la erosión.



- Sedimentos resuspendidos del fondo (frecuentemente revueltos por peces que se alimentan por el fondo, como la carpa).
- Descarga de efluentes.
- Crecimiento de las algas.
- Escorrentía urbana.

### **5.2.3.2 ¿Cuál es la máxima turbidez permitida en el agua para consumo humano?**

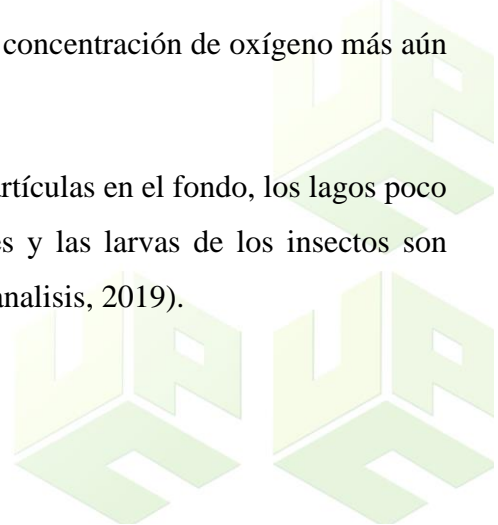
Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU.

### **5.2.3.3 Consecuencias de una Alta Turbidez**

Las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas turbias se vuelvan más calientes, y así reduciendo la concentración de oxígeno en el agua (el oxígeno se disuelve mejor en el agua más fría). Además, algunos organismos no pueden sobrevivir en agua más caliente (Induanalisis, 2019).

Las partículas en suspensión dispersan la luz, de esta forma decreciendo la actividad fotosintética en plantas y algas, que contribuye a bajar la concentración de oxígeno más aún (Induanalisis, 2019).

Como consecuencia de la sedimentación de las partículas en el fondo, los lagos poco profundos se colmatan más rápido, los huevos de peces y las larvas de los insectos son cubiertas y sofocadas, las agallas se tupen o dañan (Induanalisis, 2019).





### **Impactos de la Turbidez**

El principal impacto es meramente estético: a nadie le gusta el aspecto del agua sucia. Pero, además, es esencial eliminar la turbidez para desinfectar efectivamente el agua que desea ser bebida. Esto añade costes extra para el tratamiento de las aguas superficiales (Induanalisis, 2019).

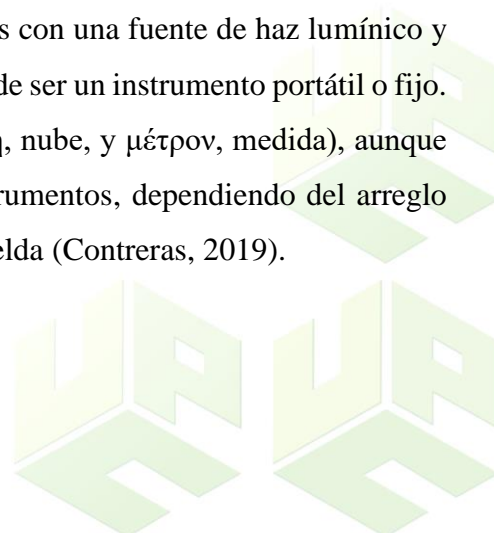
Las partículas suspendidas también ayudan a la adhesión de metales pesados y muchos otros compuestos orgánicos tóxicos y pesticidas (Induanalisis, 2019).

### **Medición de la Turbidez.**

La turbidez se mide en NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez. El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (González, 2011).

### **Turbidímetro**

Instrumento que a través del análisis óptico determina la cantidad de sustancias en un líquido, se emplea en la medición de partículas en suspensión en un líquido o gas disuelto, tiene como principio de funcionamiento la detección de las partículas con una fuente de haz lumínico y un detector de luz fijado a 90 grados del haz original. Puede ser un instrumento portátil o fijo. También conocido como nefelómetro (del griego νεφέλη, nube, y μέτρον, medida), aunque puede haber diferencias entre los modelos de estos instrumentos, dependiendo del arreglo geométrico de la fuente luminosa con respecto a la fotocelda (Contreras, 2019).





**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**Figura 1.** Turbidímetro.



Fuente: Monaco Nature, 2019.

#### **5.2.4** *Árbol Cassia fistula.*

##### **Origen**

Este árbol de origen exótico proviene de la familia Fabaceae-Caesalpinaceae, conocida comúnmente como caña fístula, lluvia de oro, casia lluvia de oro. Es originario de la India, distribuido y cultivado en América Tropical y Subtropical en las regiones correspondientes al Pacífico Seco (Rojas y Torres, 2012).

**Figura 2.** *Árbol Cassia fistula.*



Fuente: Chacalo, 2010.



### Características del Árbol

Rojas y Torres (2012), establecen que el árbol presenta las siguientes características:

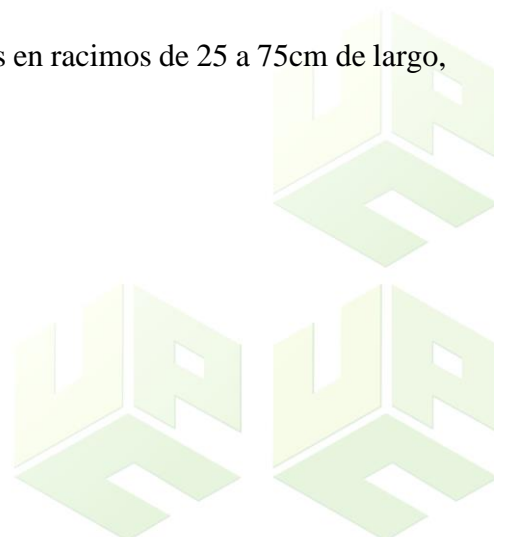
- Es un árbol mediano.
- Es de copa irregular, amplia y extendida; sus ramas son colgantes.
- El tronco es recto de corteza lisa y color gris, aunque en estado adulto la corteza toma un color castaño rojizo y su diámetro crece hasta los 45cm.
- Cambia de follaje anualmente, siendo sus hojas de color verde brillante.

**Figura 3.** Hojas del árbol *Cassia fistula*.



Fuente: Chacalo (2010)

Las flores son amarillas y se encuentran agrupadas en racimos de 25 a 75cm de largo, colgando de las ramas.



**Figura 4.** Flores del árbol *Cassia fistula*



Fuente: Chacalo, 2010.

Sus frutos son tipo vaina cilíndrica tubular de color marrón oscuro y textura leñosa, mientras que sus semillas son planas ovaladas con un largo regular de 12 a 13 mm y un ancho de 9 a 10 mm, son de color castaño rojizo, textura lisa, dura y resistente.

**Figura 5.** Vainas del árbol *Cassia fistula*.



Fuente: Chacalo, 2010.

### 5.2.5 Prueba de Jarras

El Test de Jarras es un procedimiento que se utiliza en los laboratorios para determinar las condiciones de operación óptimas generalmente para el tratamiento de aguas, la prueba de jarras permite ajustar el PH, hacer variaciones en la dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a la muestra, alternar velocidades de mezclado (Torrado, s.f. ).

La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos debe ser seleccionada por la simulación del paso de aclaración de un laboratorio a escala un arreglo simple de vasos precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas iguales (Velásquez y Osuna, 2017).

**Figura 6.** *Equipo de prueba de jarras.*



Fuente: Adminmgv (2016).

### **5.2.6 Coagulantes para tratamiento de agua**

La separación de una suspensión coloidal de forma satisfactoria, con referencia al tiempo necesario para la separación, es necesario que aglomerar las partículas coloides en partículas de mayor tamaño (Adminmgv, 2016).

Para tal efecto es necesario transformar la suspensión de forma artificial, y esta transformación es resultado de dos procesos:

Desestabilización electrostática, que generalmente se realiza mediante la adición de reactivos químicos que anulan las fuerzas repulsivas actúan sobre la hidrofilia de las partículas coloidales (Adminmgv, 2016). Aglomeración de los coloides “descargados” mediante la adición de reactivos que facilitan dicha aglomeración y que formando partículas más grandes.

En los especialistas en el tratamiento de agua, se reserva el término coagulación para denominar el fenómeno de desestabilización y el de floculación para la aglomeración de los coloides estabilizados, a los reactivos correspondientes se les denomina Coagulantes y Floculantes (Adminmgv, 2016).

Los productos coagulantes de tratamiento de agua son sales metálicas (tales como el alumbre) o polímeros. Los polímeros son compuestos orgánicos artificiales constituidos por una larga cadena de moléculas más pequeñas. Los polímeros pueden ser, catiónicos (cargados positivamente), aniónicos (cargados negativamente), o no iónico (carga neutra) (Adminmgv, 2016).

Los coagulantes más utilizados en el tratamiento de agua son:

- El sulfato de aluminio (Alumbre)
- Sulfato Ferroso
- Sulfato férrico

### **Cloruro férrico**

Las sales metálicas son los más utilizados principalmente por razones económicas. La elección del coagulante a ser utilizado en el agua se basa en la experimentación de los mismos en el agua logrando así la dosificación correcta. (Adminmgv, 2016)

### **Sulfato de aluminio**

Uno de los primeros, y todavía el coagulante más ampliamente utilizado, es el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , también conocido como alumbre (Bravo, 2017). El alumbre está disponible en bloques y polvo con una densidad de 1000-1100 kg/m<sup>3</sup> y la gravedad específica de 1,25 a de 1.36.



El alumbre se puede comprar en forma líquida o en forma seca. Es fácilmente soluble en agua. Cuando se añade alumbre al agua, reacciona con el agua y da lugar a iones con carga positiva. Los iones pueden tener cargas de hasta 4, pero son típicamente bivalentes (con una carga de 2). El ion bivalente resultante de alumbre hace de este un coagulante primario muy eficaz (Contreras, 2019).

**Ventajas:**

- Es fácilmente se disuelve con agua, y
- No causa la coloración rojiza (antiestético) de suelos, paredes y equipos como el sulfato férrico.

**Desventajas:**

- Es eficaz sólo en cierto intervalo de pH,
- Una buena floculación puede no ser posible con alumbre en algunas aguas.

**Sulfato Ferroso**

El sulfato ferroso, también conocido como caparrosa verde o vitriolo, es un compuesto coagulante ácido granular de color verde, disponible en gránulos, cristales y bultos. Este se alimenta por lo general en forma de solución con una relación de 4 a 8%. El valor de la alcalinidad y el pH del agua natural son demasiado bajos para reaccionar con él para formar los flóculos de hidróxido férrico que se desean, porque la reacción implica la oxidación por el oxígeno disuelto en el agua, lo que no ocurre cuando el valor de pH es menor que 8,5. Es necesario, por tanto, añadir cal para asegurar la coagulación (Contreras, 2019).

### **Sulfato férrico**

El sulfato férrico está disponible como un coagulante de tratamiento de agua comercial en forma de un material anhidro que puede ser transportado y almacenado en barriles de madera. El material se disuelve fácilmente en una cantidad limitada de agua tibia, 1 parte en volumen de sulfato férrico se disuelve en 2 partes de agua para producir una solución de alrededor del 40% (Adminmgv, 2016).

Ventajas del sulfato férrico:

- El hidróxido férrico se forma a valores de pH bajos, por lo que la coagulación es posible con sulfato férrico a valores de pH tan bajos como 4,0.
- El hidróxido férrico es insoluble en un amplio intervalo de valores de pH.
- El flóculo formado con coagulantes férricos es más pesado que el flóculo formado con alumbre.
- El flóculo de hidróxido férrico no se disuelve a valores altos de pH.

Coagulantes férricos pueden ser utilizados como coagulante en la eliminación del color en los valores altos de pH necesarios para la eliminación de hierro y manganeso y en el ablandamiento de agua (Contreras, 2019).

### **Cloruro de hierro**

El cloruro de hierro (III) o tricloruro de hierro (tradicionalmente llamado cloruro férrico) es un compuesto químico utilizado a escala industrial perteneciente al grupo de los haluros metálicos, cuya fórmula es  $FeCl_3$ . También se le denomina equivocadamente percloruro de hierro e incluso percloruro férrico (ospina, 2020). El cloruro férrico en solución al 40% se utiliza como coagulante para tratamiento de aguas y efluentes, se comercializa habitualmente a granel.



Lo anterior explica porque las sales de hierro y aluminio continúan siendo las más utilizadas en los tratamientos de coagulación del agua. No obstante, estos coagulantes presentan el inconveniente de modificar la hidrólisis del líquido, en dosis fuertes producen exceso de fangos, y no siempre alcanzan la precipitación de los coloides (Contreras, 2019).

### **5.3 Marco Conceptual**

**Aguas crudas:** El agua cruda es aquella que no ha sido sometida a proceso de tratamiento (Decreto 1575 de 2007).

**Coagulante:** Son procesos fisicoquímicos utilizados para eliminar las partículas coloidales de las aguas residuales industriales (Bravo, 2017).

**Coagulante natural:** Los agentes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal (Ramírez y Jaramillo, 2015).

**Coagulante artificial:** Poseen la capacidad de actuar como coagulantes y floculantes, cuando son disueltos estos forman compuestos complejos hidratados (Bravo, 2017).

**Floc:** Una pequeña masa sin apretar agregado de material floculante suspendido o precipita a partir de un líquido (Agudelo et al., 2015).

**Floculación:** Es necesaria para la aglomeración de los sólidos suspendidos desestabilizados, sometiendo el agua a velocidades determinadas de mezcla o agitación (Prasca y Vergara, 2017).

**Prueba de Jarra:** Ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en la planta (Agudelo et al., 2015).

**Remoción:** Acción de remover o removerse. Se Calcula restando a la turbidez inicial la turbidez final y dividiéndola por la turbidez inicial. (Prasca y Vergara, 2017).

**Sedimentación:** En condiciones de reposo y por la acción de la gravedad se remueven los floculos formados en los procesos de coagulación-floculación (Prasca y Vergara, 2017).

**Turbidímetro:** Un turbidímetro es un instrumento nefelométrico que mide la turbidez causada por partículas suspendidas en un líquido. Haciendo pasar un rayo de luz a través de la muestra se mide la luz reflejada por las partículas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente (Prasca y Vergara, 2017).

**Turbiedad:** Está relacionada con la propiedad óptica que esta tiene de permitir o no el paso de la luz a través de ella, causada por la presencia de solidos suspendidos o coloides que provienen de limos, arcillas y por microorganismos (Prasca y Vergara, 2017).

**pH:** es la medida que indica los niveles de acidez del agua, característica que influye no solo en los procesos de coagulación y desinfección, sino que es responsable de ocasionar corrosión e incrustaciones en las redes de distribución (Prasca y Vergara, 2017).

**Polímeros:** compuestos orgánicos sintéticos y naturales que pueden emplearse como coagulantes (Prasca y Vergara, 2017).

#### **5.4 Marco Contextual**

Las muestras para el presente proyecto se tomaron en las aguas del rio Guatapurí temporada de lluvia y sequía con el fin de saber si en estas épocas es eficiente la remoción del coagulante.

##### **Rio Guatapurí.**

El Guatapurí es un río del departamento del Cesar, en la región Caribe de Colombia. Nace en la laguna Curigua, en la Sierra Nevada de Santa Marta, a 4400 msnm y desemboca en la margen derecha del río Cesar, cerca de Valledupar. A lo largo de su curso recibe, entre otros, los ríos Donachui, Curiba, Los Mangos y Mamanqueca (Revista Semana, 2021). La

pendiente media del Rio Guatapurí es de 20°, en un descenso de 85 km, asimismo, su cuenca media es una corriente de carácter torrencial y corre por un cañón de flancos de fuerte pendiente; se encuentra acorazado por bloques heterométricos de diferente composición, pero predominantemente de rocas ígneas (Salina, 2016).

De igual forma, a su paso por la ciudad de Valledupar, en el norte de la misma, se encuentra un lugar de recreación y diversión, como lo es el balneario Hurtado. Allí mismo, se encuentran el Pueblito Vallenato y el parque Lineal. Adicionalmente, el Rio Guatapurí es la fuente hídrica de la cual se abastece el acueducto de la ciudad (Salina, 2016).

### **Toponimia**

El Guatapurí, recibe el nombre por la temperatura de sus aguas ya que en el lenguaje de la etnia Chimila significa “agua fría” (Revista Semana, 2021).



**Figura 7.** Rio Guatapuri.



Fuente: Google Maps, 2023.

### 5.5 Marco Legal

El agua destinada para el consumo humano necesita de una serie de procesos unitarios que garanticen su potabilización y al ser este un recurso tan vital para la vida está blindado por las leyes constitucionales del país, las cuales se presentan en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Normatividad general.

LEGISLACIÓN PERTINENTE	DESCRIPCIÓN
Constitución Política De Colombia	Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas



---

de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

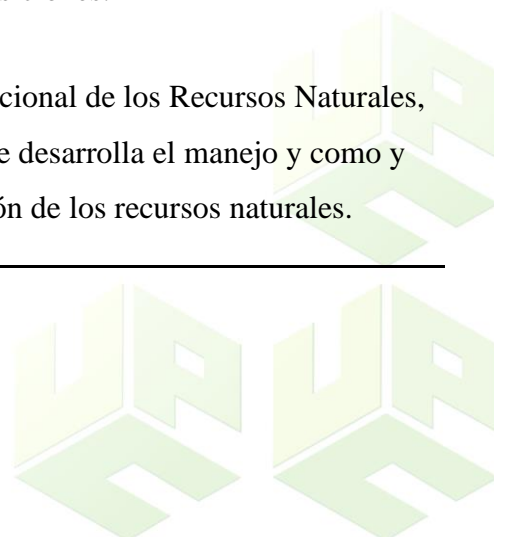
Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

**Ley 23 de 1973**

Se expide el Código de Recursos Naturales y de Protección al Ambiente y se dictan otras disposiciones.

**Ley 2811 de 1974**

Código Nacional de los Recursos Naturales, en donde se desarrolla el manejo y como y preservación de los recursos naturales.



**Ley 9 de 1979, Código Sanitario  
Nacional**

Se establecen disposiciones generales para el correcto manejo, uso, disposición y transporte, con base en los problemas detectados en la salud pública y el medio ambiente.

**Ley 99 de 1993**

Ley Orgánica del Medio Ambiente establece la conservación y gestión del medio ambiente.

Fuente: Autores, 2023.

**Tabla 2.** *Normatividad específica.*

<b>LEGISLACIÓN PERTINENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Decreto 1575 de 2007</b>	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
<b>Resolución 2115 de 2007</b>	Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 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.
<b>Decreto 3930 del 2010</b>	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el



**Universidad  
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



---

Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

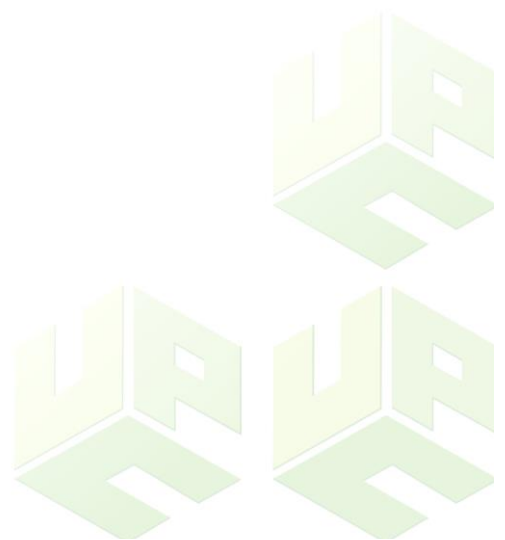
---

**Resolución 0631 de 2015**

Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

---

Fuente: Autores, 2023.



## **6. Marco Metodológico**

### **6.1 Tipo de Investigación**

Cuando se va a resolver un problema en forma científica, es conveniente conocer el tipo de investigación que se debe seguir, para evitar equivocarse en el método de resolverlo. En este caso la investigación aplicada es la experimental.

La investigación experimental, se hace con el fin de describir en qué modo o por qué causa se produce una situación particular mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas. Los diseños cuasiexperimentales y experimentales corresponden a los objetivos explicativos y predictivos. En otras palabras, la lógica experimental contribuye metodológicamente al fenómeno de la explicación (Cohen y Gómez, 2019).

### **6.2 Nivel de Investigación**

La investigación realizada fue de tipo experimental utilizando para su análisis tratamientos estadísticos estándar.

### **6.3 Población de Estudio**

Se tomó como población las aguas del río Guatapurí del municipio de Valledupar, Cesar.

### **6.4 Muestra Poblacional**

La muestra de estudio fue tomada en la bocatoma de la planta de agua potable de EMDUPAR.

### **6.5 Desarrollo Metodológico**

La investigación se elaboró en un lapso aproximado de 6 meses, en este tiempo, se tomaron muestras de agua en los períodos de sequía y de lluvias y del río Guatapurí, con el fin de tener diferentes grados de turbidez. En estas muestras se buscó trabajar con la dosis

menor óptima del coagulante en polvo de la *Cassia fistula* y del coagulante químico convencional, de tal forma, que se pudo analizar de manera estadística la actividad coagulante y la remoción de turbidez de las semillas de este árbol.

Esta investigación se realizó en tres etapas metodológicas con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, incluyendo una etapa preliminar fundamental para la ejecución de los mismos, en la cual se explicó la obtención del coagulante natural a partir de las semillas de *Cassia fistula*. La primera es la etapa de establecimiento de eficiencia, la segunda es la etapa de establecimiento de diseño de los diagramas de la eficiencia de actividad coagulante y, posteriormente, la etapa de determinar la eficiencia de remoción de las semillas de *Cassia fistula* frente a un coagulante químico convencional.

**ETAPA PRELIMINAR:** Obtención del coagulante natural a partir de la pulverización de las semillas de *Cassia fistula*:

Las semillas de *Cassia fistula* fueron recolectadas de forma manual, desechando las que no se consideraban en óptimas condiciones. Se tomaron solo las que presenten un color marrón uniforme, lo cual indica la madurez del fruto, es importante destacar que por no ser un árbol de gran altura y por la forma alargada de las fistulas es fácil su recolección.

Una vez recolectadas y seleccionadas, estas se expusieron al sol durante un periodo aproximado de 8 días. Las semillas secas, se molieron en un molino mecánico posteriormente se pasaron por un tamiz con número de malla 10. Esta operación se realizó varias veces hasta obtener un polvo de consistencia fina o agente coagulante. La solución del coagulante se preparó disolviendo 25 g de polvo de semilla en 100 ml de agua destilada. Este coagulante fue conservado en el matraz aforado de su preparación.

### **6.5.1 ETAPA 1: Determinar la actividad coagulante de las semillas del árbol *Cassia fistula* y el sulfato de aluminio.**

#### **Actividad 1.1. Prueba de coagulación y determinación de la actividad coagulante.**

Descripción: las muestras de agua y la mezcla con los agentes coagulantes fueron sometidas inicialmente a una agitación rápida a 100 rpm durante 1 minuto, seguida de agitación lenta a 40 rpm durante 30 minutos; por último, se permitió un tiempo de sedimentación de 60 minutos y luego se les midió la turbidez residual. Cada uno de los ensayos fue replicado para generar mayor confiabilidad en los resultados.

La actividad de los coagulantes se calculó a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Actividad del Coagulante

$$\%Act. Coagulante. = \frac{T. Residual(testigo) - T. Residual (muestra)}{T. Residual (blanco)} * 100$$

#### **Actividad 1.2. Mediciones de PH.**

Descripción: Para la medición del potencial de hidrogeno se utilizó un potenciómetro digital expresando los resultados en unidades de pH.

El pH fue medido en las muestras iniciales y finales de agua, para poder establecer sus variaciones después de aplicarse las diferentes dosis de los coagulantes.

#### **Actividad 1.3. Prueba de jarras**

Descripción: Para determinar las propiedades coagulantes de las semillas de *C. fistula* y el coagulante químico, se utilizó la prueba de jarras estándar. En esta prueba se buscó la menor concentración de dosificación posible que permitió una óptima remoción del

parámetro a evaluar. Se tomaron 2 vasos de precipitados de 500 ml, en los cuáles se vertió el agua cruda del Rio Guatapurí, y se dejó un vaso como control o testigo, resaltando que, esta acción se realizó en dos tiempos diferentes, una en época de lluvias y otra en sequía.

Para la realización de la prueba de jarras se necesitaron los siguientes equipos y materiales:

#### Equipos y materiales

- Un agitador de 6 seis paletas, (Floculador digital EyQ), con variación de velocidad entre 0 y 300 rpm.
- 7 beakers de 500 ml.
- 7 beakers plásticos de 200 ml.
- Un turbidímetro.
- Pipetas.
- Medidor de pH.
- Reloj de cronometro.
- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Un matraz aforado.

#### Paso a paso

- 1) Agitar el envase que contiene la muestra de agua, con el objetivo de homogenizar la muestra.
- 2) Medir las características (turbidez y pH) iniciales de la muestra.
- 3) Llenar los beakers de 500 ml con la muestra de agua, para posteriormente montarlos en el agitador, constatando que las paletas queden bien centradas en cada uno de los beakers.



- 4) Encender el agitador a una velocidad de 100 rpm y luego agregar conjuntamente las dosis previamente establecidas para cada uno de los beakers con ayuda de unas jeringas, teniendo en cuenta que se debe dejar una jarra sin dosis.
- 5) Al pasar un minuto de agitación a 100 rpm, se baja la velocidad de agitación a 40 rpm durante 30 minutos.
- 6) Transcurridos los 20 minutos se apaga y espera que sedimente por 1 hora.
- 7) Después del tiempo de sedimentación se procede a sacar las muestras de agua de cada beaker, para medir las características finales de las muestras (turbidez y pH).
- 8) Las lecturas realizadas se deben registrar en una tabla previamente realizada.

### **6.5.2 ETAPA 2: Diseñar los diagramas de la actividad coagulante en función de la dosis utilizada y de la turbidez inicial de las muestras de agua.**

#### **Actividad 2.1. Diagramas de eficiencia**

Descripción: En esta etapa, se diseñaron los diagramas de la eficiencia de actividad coagulante de las semillas utilizadas en el estudio y del coagulante químico, estos diagramas se realizaron teniendo en cuenta las dosis referidas en la investigación y la turbidez obtenida en cada, con el fin de obtener un gráfico que represente la actividad coagulante de los agentes en mención.

### **6.5.3 ETAPA 3: Establecer la eficiencia de remoción de las semillas de *Cassia fistula* frente al coagulante químico convencional (sulfato de aluminio).**

#### **Actividad 3.1. Eficiencia de remoción**

Descripción: Con el fin general de evaluar la eficiencia de remoción de las semillas de *Cassia fistula* en la estabilización del pH y la remoción de turbidez de partículas coloidales en suspensión en aguas crudas del río Guatapurí, se procedió finalmente en esta fase a establecer dicha remoción del coagulante natural en comparación con el químico

convencional (sulfato de aluminio), contrastando los valores obtenidos en cada parámetro (pH y turbidez) y las dosis mínima alcanzada por cada uno de ellos.

Para lo anterior, se estableció la eficiencia en remoción de turbidez de los coagulantes, con la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Porcentaje de remoción

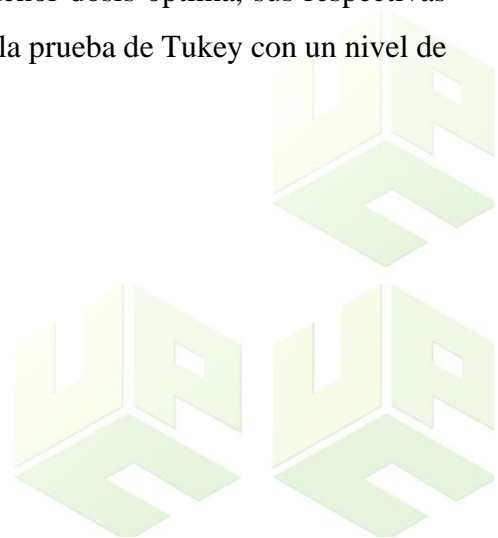
$$\%Remoción = \frac{Turbidez Inicial - Turbidez Final}{Turbidez Inicial} * 100$$

### **Actividad 3.2. Recomendación del coagulante**

Descripción: Habiendo comparado en diferentes aspectos a ambos coagulantes, se procedió a recomendar la alternativa más eficiente en cuanto a remoción, dosis, accesibilidad y costos.

### **6.6 Diseño Experimental**

El factor que se analizó en el diseño experimental aleatorio es la eficiencia de remoción de Turbidez en las muestras de agua con la menor dosis óptima, sus respectivas réplicas con un nivel de confianza del 95% y, se aplicará la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.



## 7. Análisis de resultados

### 7.1 Etapa preliminar

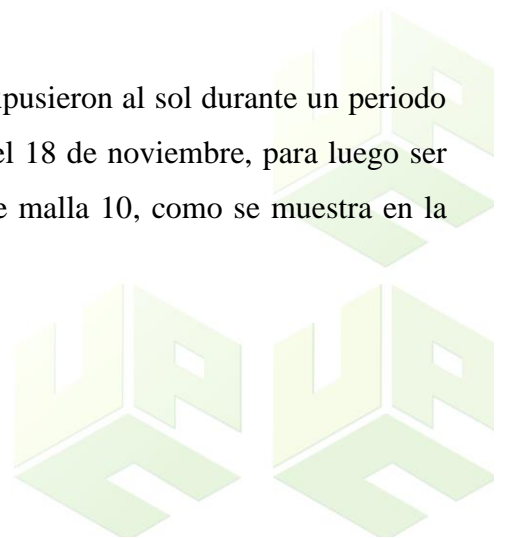
A continuación, se presentan las diferentes actividades que se realizaron con el fin de preparar la semilla *Cassia fistula* para su utilidad como coagulante.

El día 3 de noviembre se inició con la recolección de las semillas de *Cassia fistula* las cuales fueron recogidas de forma manual, se tuvo en cuenta que las semillas fueron del mismo color con el fin que todas estuvieran en el mismo estado de madurez, como se muestra a continuación en la figura 8:

**Figura 8.** Semillas de *Cassia fistula* recogidas y clasificadas para el coagulante.



Una vez recolectadas y seleccionadas, estas se expusieron al sol durante un periodo aproximado de 8 días, desde el 10 de noviembre hasta el 18 de noviembre, para luego ser secadas, molidas y pasadas por un tamiz con numero de malla 10, como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** *Proceso de exponer al sol, molienda y tamizaje.*



Luego, para la solución del coagulante (ver figura 10), se disolvieron 25 g de polvo de semilla en 100 ml de agua destilada.

**Figura 10.** *Disolución del polvo de semilla de *Cassia fistula* en agua destilada.*



## 7.2 Determinar la actividad coagulante de las semillas del árbol *Cassia fistula*

A continuación en la tabla 3, se presenta la caracterización del agua cruda en donde se detalla la concentración de la turbidez y el pH del agua del río Guatapurí en época de sequía y de lluvia:

**Tabla 3.** *Caracterización del agua cruda.*

Parámetro	Resultados		Promedio	Resultados		Promedio	Normatividad (Res. 2115 del 2007)
	(sequía)		(sequía)	(Lluvia)		(Lluvia)	
<b>Turbiedad</b> (NTU)	88,5	98,2	93,4	202	216	209	2
<b>pH</b>	8,09	8,56	8,3	6,45	7,03	6,74	6,5 - 9

De acuerdo con la tabla anterior, el valor promedio de turbiedad del agua cruda del Guatapurí fue de 93,4 NTU en época de sequía y de 209 NTU en época de lluvia, encontrándose por fuera de la normatividad ambiental permitida. Según los autores Bueno et al., (1997) la turbidez es producida por las partículas insolubles que se encuentran en suspensión en el agua y un aumento de esta afecta la penetrabilidad de la luz en la misma y alterando la productividad plantónica y bentónica del ecosistema (Barg, 1992).

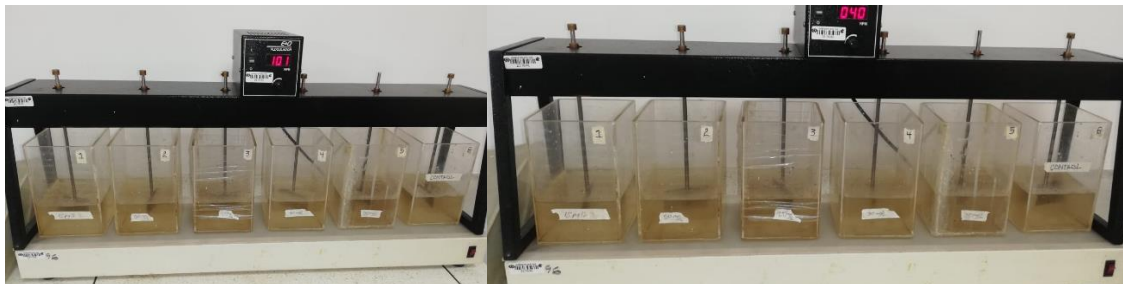
Por otro lado, el pH de ambas muestras se encuentra dentro del rango de 6,5 a 9 permitido por la resolución 2115 del 2007. Sin embargo, de acuerdo con Roldan (2003) el rango de concentración de pH adecuado para el desarrollo de la vida acuática es bastante crítico, estando comprendido este entre 6.5 a 8.0, ya que fuera de este rango queda reducida la diversidad por estrés fisiológico y la reproducción. Estos datos son muy similares a la

investigación de Rodríguez et al., (2015), en la cual se presentan valores promedio de pH de 7,40 y 7,49 unidades para turbiedades de 1500 y 100 NTU respectivamente.

Dado lo anterior, se detalla que dichos parámetros de turbiedad y pH en el agua cruda del río Guatapurí necesitan una intervención para que no generen afectaciones en el cuerpo de agua ni en la salud humana.

Posteriormente, dicha agua cruda y la mezcla con los agentes coagulantes fueron sometidos a una agitación rápida durante un minuto a 100 rpm, seguido de 30 minutos de agitación a 40 rpm, como se muestra en la siguiente figura 11:

**Figura 11.** *Ensayo de jarras.*



Fuente: Autores, 2023.

Una vez terminado estos tiempos de agitación, se esperó 60 minutos con el fin de lograr la sedimentación de partículas, para finalmente medir la turbidez y pH con dos réplicas del ensayo de jarras, cuyos resultados se muestran en la tabla 4, en donde se observa que el valor promedio para el parámetro de turbiedad más bajo obtenido fue de 3,64 NTU, el cual no cumple con la normatividad colombiana y se maneja un rango de pH entre 6,96 y 8,3, cumpliendo con la normatividad:

**Tabla 4.** *Réplicas de ensayo de jarras Cassia fistula.*

Jarra	Turbidez (NTU)	pH
-------	----------------	----

	Dosis (mg/l)	Sequía	Prom	lluvia	Prom	Sequía	Prom	lluvia	Prom				
1	20	3,52	3,76	3,64	93,44	96,74	95,09	7,78	8,13	8,0	6,58	7,43	7,01
2	25	4,14	4,12	4,13	86,65	90,32	88,49	7,68	8,09	7,9	6,55	7,43	6,99
3	30	4,49	4,33	4,41	80,23	85,41	82,82	7,65	8,06	7,9	6,55	7,42	6,99
4	35	4,29	4,55	4,42	73,79	76,92	75,36	7,62	8,04	7,8	6,53	7,40	6,97
5	40	4,48	4,72	4,6	77,28	81,30	79,29	7,61	8,03	7,8	6,54	7,39	6,97
6	-	9,52	10,1	9,81	80,11	84,53	82,32	8,03	8,51	8,3	6,51	7,41	6,96

Fuente: Autores, 2023.

Con base en los anteriores resultados se procede a hallar el porcentaje de la actividad coagulante para cada promedio de turbiedad, lo cual se detalla en la tabla 5:

**Tabla 5.** *Porcentajes de actividad coagulante de Cassia fistula.*

Dosis (mg/l)	Turbidez NTU (Sequia)	% Actividad Coagulante (Sequía)	Turbidez NTU (Lluvia)	%Actividad Coagulante (Lluvia)
20	3,64	96,1%	95,09	54,5%
25	4,13	95,6%	88,49	57,7%
30	4,41	95,3%	82,82	60,4%
35	4,42	95,3%	75,36	63,9%

40	4,6	95,1%	79,29	62,1%
-	9,81	89,5%	82,32	60,6%

Fuente: Autores, 2023.

En la tabla anterior, se detalla que las dosis en las que se utilizó la semilla de *Cassia fistula* para obtener un mayor porcentaje de actividad coagulante, fueron las dosis de 20 mg/l en época de sequía con un 96,1% y la dosis de 35 mg/L con un 63,9% para la época de lluvias, cabe resaltar que estas últimas al tratar turbiedades más elevadas resultan más representativas para el estudio en cuestión.

### 7.3 Determinar la actividad coagulante del sulfato de aluminio.

Luego de tratar las muestras de agua con el coagulante natural, se procede a realizar el proceso de prueba de jarras con el sulfato de aluminio, cuyos datos de turbiedad y pH, se registran en la tabla 6, en donde se observa que el valor promedio para el parámetro de turbiedad más bajo obtenido fue de 3,7 NTU, el cual no cumple con la normatividad colombiana y se maneja un rango de pH entre 6,35 y 8,1, cumpliendo con la normatividad:

**Tabla 6.** Réplicas de ensayo de jarras del Sulfato de Aluminio.

Jarra	Dosis (mg/l)	Turbidez (NTU)						pH					
		Sequía		Prom	lluvia		Prom	Sequía		Prom	lluvia		Prom
1	20	14	10	12	149,38	152,76	151,07	5,2	7,5	6,35	6,5	6,8	6,7
2	25	3,4	4	3,7	120,57	124,84	122,71	6	6,9	6,45	7,1	7,6	7,4
3	30	6,4	6	6,2	109,95	112,32	111,14	6	8	7	7,5	8,1	7,8



<b>4</b>	35	19	15	17	98,73	104,94	101,84	6,5	7	6,75	7,7	8,5	8,1
<b>5</b>	40	24	16	20	121,86	124,03	118,45	6,8	7	6,9	7,2	7,8	7,5
<b>6</b>	-	10,5	18	14,3	125,34	130,35	122,85	5,2	7,5	6,35	7,7	7,1	7,4

Fuente: Autores, 2023.

Con base en los anteriores resultados se procede a hallar el porcentaje de la actividad coagulante del sulfato de aluminio para cada promedio de turbiedad, lo cual se detalla en la tabla 7:

**Tabla 7.** *Porcentajes de actividad coagulante del Sulfato de Aluminio.*

<b>Dosis (mg/l)</b>	<b>Turbidez NTU (Sequia)</b>	<b>% Actividad Coagulante (Sequía)</b>	<b>Turbidez NTU (Lluvia)</b>	<b>%Actividad Coagulante (Lluvia)</b>
<b>20</b>	12	87,2%	151,07	27,7%
<b>25</b>	3,7	96,0%	122,71	41,3%
<b>30</b>	6,2	93,4%	111,14	46,8%
<b>35</b>	17	81,8%	101,84	51,3%
<b>40</b>	20	78,6%	118,45	43,3%
<b>-</b>	14,3	84,7%	122,85	41,2%

Fuente: Autores, 2023.

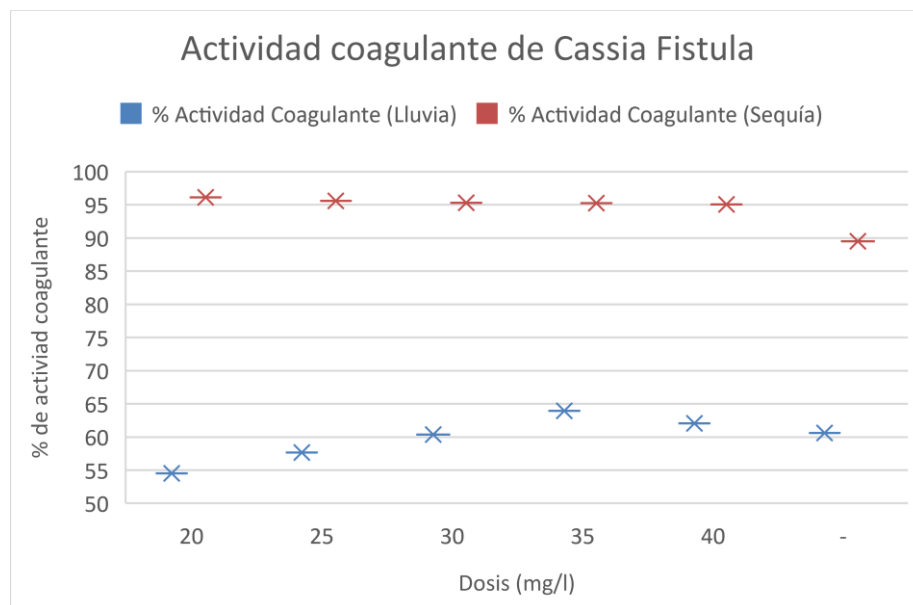
Según los datos obtenidos utilizando como coagulante al sulfato de aluminio, el mayor porcentaje de actividad coagulante para la época de sequía es de 96,0% , con una dosis

de 25 mg/l, mientras que para la época de lluvias el mayor porcentaje de actividad coagulante es de 51,3%, con una dosis de 35 mg/l.

#### 7.4. Diseñar los diagramas de la actividad coagulante

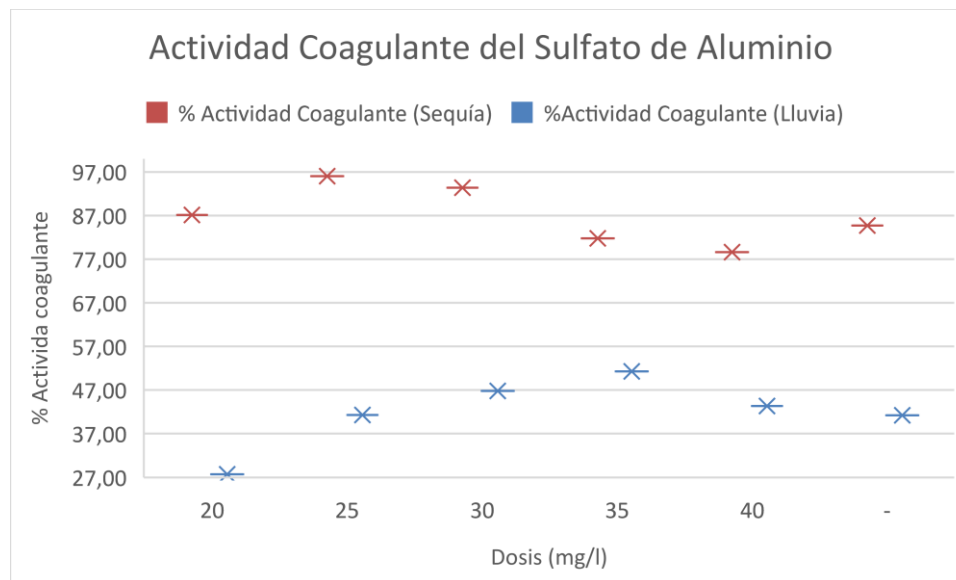
A continuación en las figuras 12 y 13, se presentan los diagramas del porcentaje de la actividad coagulante de la semilla de *Cassia fistula* y del sulfato de aluminio, respectivamente, en función de las dosis utilizadas y de la actividad obtenida según la turbidez inicial de las muestras del agua cruda y el respectivo valor de turbidez por cada dosis, según la época correspondiente.

**Figura 12.** *Actividad coagulante de Cassia fistula*



Fuente: Autores, 2023.

**Figura 13.** Actividad coagulante del Sulfato de Aluminio



Fuente: Autores, 2023.

En los diagramas de caja anteriores se evidencia que ambos agentes coagulantes tienen mayor actividad en la época de sequía, dado que hay mucha menos turbiedad que remover, sin embargo, resulta satisfactorio el porcentaje de actividad coagulante en época de lluvias; cuando hay elevadas turbiedades, ya que el porcentaje más alto de actividad coagulante de *Cassia fistula* fue de 63,94% con una dosis de 35 mg/L y aunque el sulfato de Aluminio comparte la misma dosis para su porcentaje más alto, su actividad solo fue de 51,27%, quedando demostrado el gran poder de coagulación que posee la semilla de este árbol.

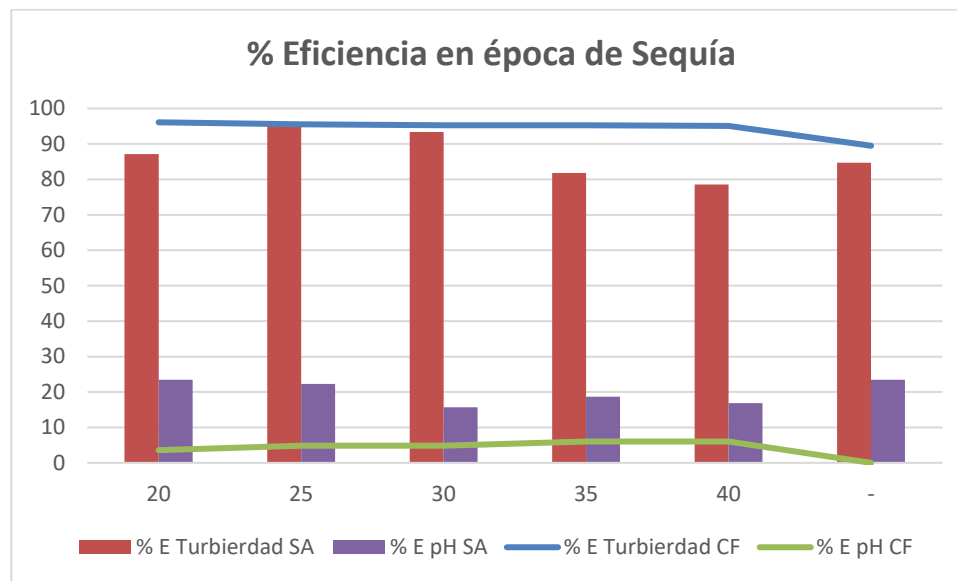
### 7.5 Eficiencia de remoción de las semillas de *Cassia fistula* frente al coagulante químico convencional (sulfato de aluminio).

A continuación, en la figura 14, se presenta la eficiencia del ensayo de jarras para ambos coagulantes en la época de sequía, en donde se logra evidenciar que *Cassia fistula*



obtuvo valores de 89,5% en adelante, mientras que el sulfato de aluminio presentó un valor mínimo de 78,59%. Además, se obtuvieron elevados porcentajes de remoción en donde el sulfato de aluminio arrojó un valor de 96,04% y la semilla de *Cassia fistula* de 96,1%, valores extremadamente similares guardando la diferencia de dosis (25 mg/l para el primero y 20 mg/l para el segundo), lo cual concuerda con el estudio de Guzmán et al., (2015), en donde se afirma que el aumento progresivo de las dosis del coagulante (10, 15, 20, 25) de dicha semilla, conduce a una disminución de la turbidez, para una remoción aproximada de 95% respecto de su valor inicial, tal como sucedió en este estudio.

**Figura 14.** Porcentaje de eficiencia en época de Sequía



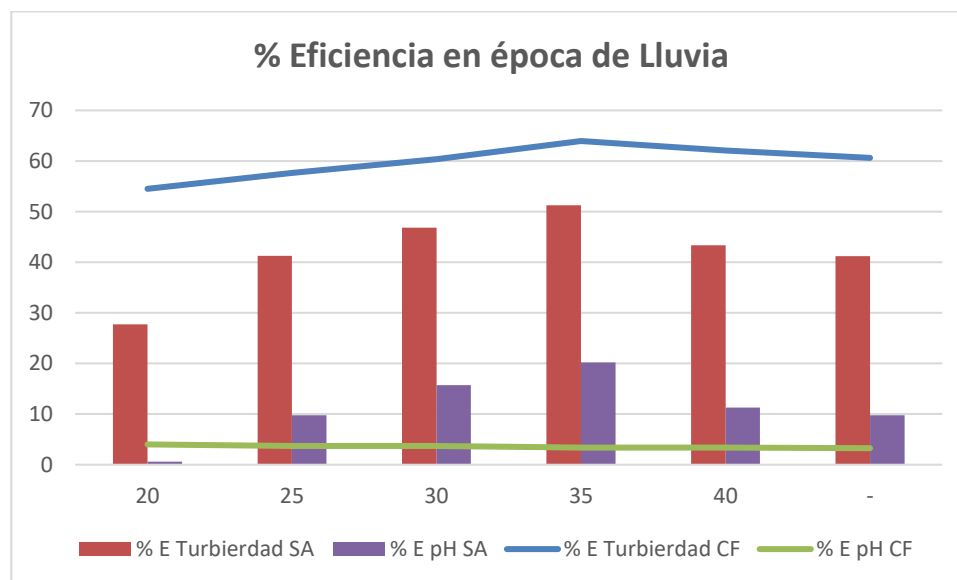
Fuente: Autores, 2023.

Por otro lado en la figura anterior se observa que, a pesar de que el porcentaje de estabilización del pH no representa mayor inconveniente, puesto que los valores se encuentran dentro de los rangos aceptados, se detalla la gran diferencia que hay entre el

sulfato de aluminio y *Cassia fistula*, brindado esta última mayor estabilidad hasta el punto de alterar muy poco o casi nada el pH de la muestra inicial.

Continuando con los porcentajes de eficiencia, a continuación en la figura 15 se presentan dichos valores en época de lluvia para los coagulantes de *Cassia fistula* y sulfato de aluminio, en donde se hace notorio que ambos coagulantes presentan mejor eficiencia en la dosis 35 mg/l, sin embargo se evidencia que la eficiencia de *Cassia fistula* es mucho más alta alcanzando un umbral del 63,94% con una diferencia del 12,67% con respecto al sulfato de aluminio. Cabe resaltar que, a pesar de que el pH se encuentra dentro del rango permitido por la normatividad 2115 del 2007 la cual estipula como valor máximo 9, la semilla de *Cassia fistula* también mantuvo una mayor estabilización del pH, manteniéndolo cercano al valor óptimo para consumo humano que es 7, sin mayores variaciones ni fluctuaciones, a diferencia del sulfato de aluminio, como se muestra en la gráfica.

**Figura 15.** Porcentaje de eficiencia en época de lluvia



Fuente: Autores, 2023.

Como se puede observar en la anterior figura, las mayores eficiencias se encuentran en el coagulante con *Cassia fistula*, ya que se evidencia que el 100% de las dosis supera el 50% de eficiencia de la remoción de turbidez, mientras que con el sulfato de aluminio solo el 6% supera el porcentaje de este tipo de remoción. Esto es debido a que dicha semilla posee un amplio número de grupos funcionales, con naturaleza porosa que lo hace actuar como un coagulante de gran calidad (Salome y Salvatierra, 2019).

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se recomienda el coagulante de *Cassia fistula* debido a su alta eficiencia de remoción, la menor cantidad de coagulante que se necesita para lograr un buen resultado, la poca fluctuación en el pH y la facilidad para conseguirla por encontrarse o ser fruto de un árbol que es muy común en la costa caribe colombiana.

Para ambos coagulantes cabe resaltar que, aunque la turbiedad tuvo eficiencias muy altas, esta no logro encontrarse por debajo del rango permitido por la normatividad 2115 del 2007 la cual estipula como valor máximo 2 NTU.

## **7.6 Diseño experimental**

Para elaborar el análisis se utilizó el software Excel. Se trabajó con el diseño experimental de un solo factor con un tratamiento, dos réplicas y un nivel de confianza de 95%, para lo cual se propuso las siguientes hipótesis:

Se propone las hipótesis de la siguiente manera:

Hipótesis nula ( $H_0$ ;  $T_1 = T_2$ ): Los tratamientos no presentan diferencias significativas.



Hipótesis alternativa ( $H_i$ ;  $T_1 \neq T_2$ ): Los tratamientos presentan diferencias significativas.

Se procedió a la realización del análisis de ANOVA con el fin de determinar si existía diferencia significativa entre los tratamientos, los resultados se presentan, a continuación, en la tabla 13.

**Tabla 8.** *Análisis de varianza para los tratamientos.*

Origen de las variaciones	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1	140,625	5,7955	0,042681577	5,317655
Dentro de los grupos	8	24.2643			
Total	9				

Fuente: Autores, 2023.

Al analizar la Tabla 13 suministrada por el software se observa que, al comparar el valor de F Calculada (5,7955) con el valor de F Tabulada (5,3176) al 95% de significancia se observa que FC es mayor a la FT lo cual indica que hay significancia entre los tratamientos, es decir entre el coagulante de semilla de de *Cassia fistula* y el coagulante convencional, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna. Se procede a realizar la prueba Tukey.

En primer lugar, se calcula lo siguiente:

Diferencia honestamente significativa (HSD): 7,181532869

Multiplicador: 3,26 (se obtiene a partir de la tabla de Tukey)



Cuadrado del error medio (Mse): 24,264375

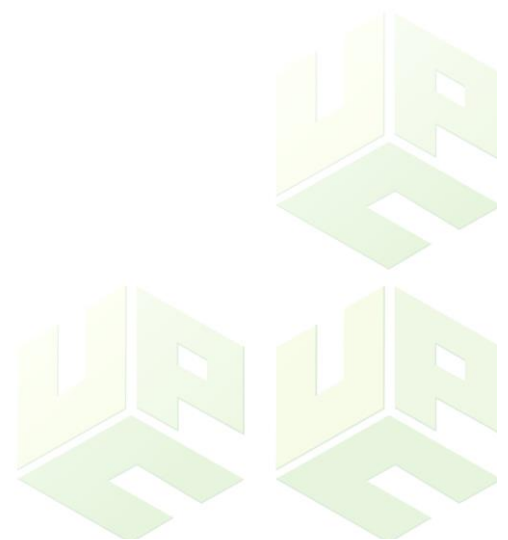
N: 5

**Tabla 9. Combinaciones.**

	A	B
A		-7,5
B	7,5	

Fuente: Autores, 2023.

El color negro indica que no puede haber diferencia entre el grupo a con el a dado que da cero, es decir no existe, mientras que el color amarillo tiene un valor de 7,5 el cual es mayor a 7,18 que es el HSD lo cual indica que sí hay diferencia entre los tratamientos, es decir se corrobora la diferencia mediante la prueba de Tukey.





## **8. Conclusiones**

Del presente proyecto de investigación se puede concluir que, primeramente, la caracterización del agua cruda del Guatapurí mostró valores por fuera de la normatividad permitida (Resolución 2115 del 2007) con respecto al parámetro de turbiedad, tanto para las muestras de agua tomadas en época de sequía, como de lluvias, cuyo valor promedio fue de 93,4 y 209 NTU, respectivamente, sin embargo, para el parámetro pH se obtuvo un valor de 8,3 y 6,74 que califica dentro de la norma.

Gracias al estudio de la prueba de jarras realizada con los diferentes tipos de muestras en las épocas mencionadas, y utilizando el coagulante natural y el químico, se pudieron obtener los valores de turbiedad y pH para diferentes dosis con su respectivo porcentaje de actividad coagulante, en donde se obtuvo que la semilla de *Cassia fistula* presentó un resultado favorable, ya que el 100% de su actividad coagulante para las diferentes turbiedades tratadas superaron más del 50% para ambas épocas, mientras que con el sulfato solo el 58,3% del total de muestras tratadas con sulfato lograron superar el 50% de actividad coagulante.

En cuanto a las eficiencias por periodo, en lo que respecta a la época de sequía, a pesar de que se obtuvieron valores muy similares entre los dos coagulantes, se guarda la diferencia en la dosificación, ya que la semilla de *Cassia fistula* obtuvo una eficiencia de 96,1% con una dosis de 20 mg/l, mientras que el sulfato de aluminio presentó una eficiencia de 96,04%, pero con una dosis más alta de 25 mg/l, lo que demuestra el potencial de la semilla como agente no solamente con sus características coagulantes, si no también con sus características rentables y rendidoras, lo cual permitiría tratar un agua con menos producto de lo usual.

Los resultados de la época de lluvias arrojaron que, ambos coagulantes presentan mejor eficiencia en la dosis 35 mg/l, sin embargo se evidencia que la eficiencia de *Cassia*

*fistula* es mucho más alta alcanzando un umbral del 63,94% con una diferencia del 12,67% con respecto al sulfato de aluminio.

Por otro lado, en cuanto al parámetro del pH, este se encontró dentro del rango permitido por la normatividad en todas las muestras analizadas, sin embargo se resalta que la semilla de *Cassia fistula* también mantuvo una mayor estabilización del pH, manteniéndolo cercano al valor óptimo para consumo humano que es 7, sin mayores variaciones ni fluctuaciones, a diferencia del sulfato de aluminio. Asimismo, en el caso del diseño experimental se halló que hay diferencias significativas entre los tratamientos, en donde claramente resulta más eficiente el de semilla de *Cassia fistula*.

Finalmente, y a pesar de que los resultados finales de turbiedades no lograron encontrarse por debajo del rango permitido por la norma (2 NTU), se concluye que se obtuvieron altas eficiencias de remoción con el coagulante de *Cassia fistula*, además de que se necesita una menor dosis para lograr un buen resultado, existe poca fluctuación en el pH y hay gran facilidad para conseguir dicha semilla, por lo que se recomienda como coagulante en el tratamiento de aguas crudas, con algunas consideraciones técnicas para mejorar la calidad del parámetro de turbidez y poder cumplir con la normatividad.





### **9. Recomendaciones**

- Se recomienda analizar que componente del fruto de la planta *Cassia fistula* tiene el poder de coagular los sólidos suspendidos en la muestra de agua residual.
- Se recomienda investigar cuánto material en polvo de la semilla, es necesario para ser implementado como tratamiento alternativo en el proceso de coagulación floculación a nivel de una planta de tratamiento de agua residual.
- Dotar a la Universidad de los reactivos y elementos necesarios para poder seguir realizando este y otros estudios que aporten a la problemática ambiental local.
- Determinar los costos que tendría la implementación de este coagulante a escala real.
- Probar la semilla de *Cassia fistula* en el tratamiento de aguas residuales, ya sean industriales o domésticas, para la remoción de turbiedad, color, sólidos suspendidos, entre otros parámetros, y de esta forma analizar su versatilidad.
- Realizar análisis microbiológicos que permita detectar si se presentan o no remoción de elementos patógenos.



### Referencias Bibliográficas

Adminmgv. (2016, 8 de Junio). Tratamiento del Agua. Obtenido de <https://www.tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/>

Agudelo, S., Mejía, J. y Pinzón, L. (2015). Elaboración y mejoramiento de un prototipo de floculador hidráulico de tubos de pvc para caudales menores o iguales a 10 l.p.s. Universidad Cooperativa De Colombia, Villavicencio. Recuperado de: [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14501/1/2015\\_elaboraci%C3%B3n\\_mejoramiento\\_prototipo.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14501/1/2015_elaboraci%C3%B3n_mejoramiento_prototipo.pdf)

Barrenechea, A. (s.f.). *Aspectos físicoquímicos de la calidad del agua*. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>

Beltrán, J. Guajardo, C. Barceló, I. y López, U. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO<sub>2</sub>. *Biología Marina y Oceanografía*, 52(3).

Bravo, M. (2017). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales*. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José De Caldas]. Repositorio U Distrital. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5609/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf;jsessionid=A5ECA75BE6390A66F31CCD909D6FF9FF?sequence=1>

Cabrera, N., Hernández, A., Simancas, E., Ayala, J. y Almanza, K. (2017). Coagulantes naturales extraídos de *Ipomoea incarnata* en el tratamiento de aguas residuales industriales en Cartagena de Indias. *Sci. Tech.*, 22,(1) p. 109.



Ceron, I., y Garzon, N. (2015). Evaluación de la semilla de Moringa oleifera como coadyudante en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas naturales del rio Bogotá en su paso por el municipio de Villa pinzón, Cundinamarca. Bogota D.C

Chacalo, A. (2010). Árboles y arbustos para ciudades. Universidad Autónoma Metropolitana, 600.

Chavez, S. (2018). *Evaluación de la acción coagulante de la semilla durazno y tallo de Nopal: aclaración de aguas turbias*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Machala] Repositorio U. Machala.  
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12400/1/CHAVEZ%20HERRE RA%20SANTIAGO%20ALBERTO.pdf>

Chávez, S. y Jaramillo, F. (2018). Evaluación de la acción coagulante de la semilla de durazno y tallo de nopal: aclaración de aguas turbias. Universidad Técnica de Machala. Recuperado de: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/12400>

Choque, D., Choque, Y., Solano, A. y Ramos, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298-309.

Cohen, N y Gómez, G. (2019). Metodología de la investigación, ¿para qué?: la producción de los datos y los diseños. Buenos Aires, Argentina: Editorial Teseo.

Contreras, A. (2019). Alternativa para la recuperación del agua en los procesos de curtidos de pieles. (Tesis de pregrado). Universidad Piloto De Colombia. Recuperado de: <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/6517/trabajo%20de%20grado%20aguas%20residuales%20de%20curtiembres%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Del Valle, M. (2017). Eficiencia de la remoción de sólidos suspendidos mediante el uso de biopolímeros en agua turbia del estero salado. (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil.

Decreto N°1575, 2007. Ministerio de la Protección Social. República de Colombia. Bogotá, D.C.

Fuentes, W., Contreras, R., Perozo, I., Mendoza, y Z. Villegas. (2008). Uso del quitosano obtenido de *Litopenaeus schmitti* (Decapoda, Penaeidae) en el tratamiento de agua para consumo humano. *Multiciencias*, 8, 281–287.

González, C. (2011). *Monitoreo de la calidad del agua: la turbidez*.  
<https://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>

Guzmán, Á. Villabona, C. Tejada, y R. García. (2013). Reducción De La Turbidez Del Agua Usando Coagulantes Naturales: Una Revisión. *Actualidad & Divulgación Científica*, 16, 253–262.

Guzmán, L., Tarón, A., y Barros, I.; Orinoquia (2017). Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales.

Guzmán, L., Tarón, A., y Núñez, A. (2015). Polvo de la semilla *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento de agua cruda. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 123-129.

Hanna Instruments (2018). Importancia de la medida de color en el agua de consumo humano. Recuperado de: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/importancia-de-la-medida-de-color-en-el-agua-de-consumo-humano>

Induanalisis. (2019). *Turbidez*.  
[https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/turbidez\\_28#:~:text=Las%20part](https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/turbidez_28#:~:text=Las%20part)



% C3% ADculas% 20suspendidas% 20absorben% 20calor,sobrevivir% 20en% 20agua  
% 20m% C3% A1s% 20caliente.

Joshi, J. y Sahju, O. (2014). Azadirachta indica leaves as antibacterial treatment on drinking water, *International Journal of Clinical Nutrition*, 2(2), 36-40. Doi:10.12691/ijcn-2-2-3

Meza, M., Riaños, K., Mercado, I., Olivero, R. y Jurado, M. (2018). 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. *Rev. UIS Ing.*, 17(2), pp. 95-104, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018009>

Muthuraman, G. y Sasikala, s. (2014). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1727-1731.

Navas, E. (2017). *Calidad de Aguas: Usos y Aprovechamiento*. España: ICB. S.L.

Olivero, R., Aguas, Y., Mercado, I., Casas, D., y Montes, L. (2014). Utilización de Tuna (opuntia ficus-indica) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *AVANCES investigación en ingeniería*, 70-75.

Olivos, O. (2010). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas y desagües*. Lima: Universidad Alas Peruanas.

Ospina, I. (2020). *Cloruro férrico sólido*. <https://www.dqisa.com/wp-content/uploads/2020/12/CLORURO-FERRICO.pdf>

Parra, Y., Cedeño, M. García, M., Mendoza, I. González, Y. y Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el Mucílago de *Opuntia wentiana* (Britton y Rose) / (Cactaceae), *REDIELUZ*, 1,(1).

Pérez, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 29(3), p. 3-14. DOI: 10.18845/tm.v29i3.2884

Prasca, L. y Vergara, J. (2017). Valoración de la eficiencia de las semillas del árbol *Cassia fistula* en la remoción de turbidez en agua cruda. (Tesis de pregrado). Universidad de Sucre.

Ramírez, H. y Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Rev. Facultad de Ciencias Básicas*. 11(2): 136-153. DOI <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.1303>

Resolución N°2115, 2007. Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial. República de Colombia. Bogotá, D.C.

Resolución N°0330, 2017. Ministerio de Vivienda, Ciudad y territorio. República de Colombia. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Revista Semana. (2021, 15 de Enero). *Semana Sostenible*. <https://www.semana.com/actualidad/articulo/rio-guatapuri-habitat-de-una-amplia-variedad-de-especies--colombia-hoy/58783/>

Rojas, F. y Torres, G. (2012). Caña fístula. *Forestal Mesoamericana*. 9(23).

Salina, D. (2016, 29 de Septiembre). *Ecosistema Rio Guatapurí*. <https://prezi.com/7ne7jkwj5k5b/ecosistema-rio-guatapuri/>

Salome, E. y Salvatierra, J. (2019). Evaluación de la concentración de la semilla de *Cassia fistula* como coagulante natural y el tiempo de agitación, en el tratamiento de aguas para la potabilización en la Unidad Minera Poderosa – Huancavelica, Perú. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú.

Sistema Nacional De Informacion Cultural (SINIC); Colombia cultural; 2018.

Singh, V. y Kumar, P. (2011). Cassia Seed Gums. A Renewable Reservoir for Synthesizing. En Kalia, S. y Averous, L. *Biopolymers: Biomedical and environmental Applications*, 270-290. Scrivener Publishing.

Solís, R., Laines, J., y Hernández, J. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales.

Tratamiento de agua; ThemeHorse (2019): [www.tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/](http://www.tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/)

Torrado, E. (s.f.). *Laboratorio ensayo de jarras y DQO*.  
<https://www.studocu.com/co/document/universidad-central-colombia/sistemas-de-tratamiento-de-aguas/lab-prueba-de-jarras-y-dqo/27848609>

UNICEF. *Agua, saneamiento e higiene*.  
[http://www.unicef.org/spanish/wash/index\\_43106.html](http://www.unicef.org/spanish/wash/index_43106.html)

Vargas de, L., Barrenechea, A., Aurazo, M., y Maldonado, V. (2004). Tratamiento de aguas para el consumo humano (plantas de filtración rápida). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. [www.monaconatureencyclopedia.com](http://www.monaconatureencyclopedia.com).

Velásquez, J. y Osuna, M. (2017). Diseño y construcción de un prototipo de clarificador de manto de lodos. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia. Bogotá, D.C. Recuperado de:  
[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14481/1/TESIS%20CLAIFICA%20DOR%20DE%20AGUA\\_V3.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14481/1/TESIS%20CLAIFICA%20DOR%20DE%20AGUA_V3.pdf)

Yin, C. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and was-tewater treatment. *Process Biochem*, 45, 1437-144.

