

Evaluación de la mezcla de un coagulante químico-natural en el proceso de clarificación de una ciénaga

Evaluation of the mixture of a chemical-natural coagulant in the clarification process of a swamp

Kevin Padilla-García ^{1a}, Gisella Pimienta-Rodríguez ^{1b}, Iván Mercado-Martínez ²

¹ Grupo de Investigación Biotecnología de Microalgas, Fisicoquímica Aplicada y Estudios Ambientales, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

Correos electrónicos: ^a keliapadilla@mail.uniatlantico.edu.co, ^b gpimienta@mail.uniatlantico.edu.co

³ Grupo de Investigación Agroindustrial (GIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. Orcid: 0000-0002-1978-6977. Correo electrónico: ivanmercado@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 11 enero, 2020. Aceptado: 30 marzo, 2020. Versión final: 30 abril, 2020.

Resumen

En esta investigación se realizó la evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y la mezcla de sulfato de aluminio-almidón de yuca (*Manihot esculenta*) con una proporción 2:8, en el proceso de clarificación del agua de la Ciénaga Grande (Atlántico-Colombia). Para el registro de las características iniciales se efectuó un muestreo simple del agua. Posteriormente, en la etapa de simulación del proceso de clarificación se implementó el test de jarras, donde se observó la reducción de la turbidez que se obtuvo al utilizar el coagulante químico y la mezcla. Para finalizar se concluyó que el sulfato de aluminio logró un porcentaje de remoción del 70% con una dosis de 20 mg/L, mientras que para la mezcla de sulfato de aluminio-Almidón de yuca la eliminación de la turbidez fue de 71,06% con una dosis de 60 mg/L, partiendo de un valor inicial de 69 UNT.

Palabras clave: clarificación; prueba de jarras; remoción; turbidez.

Abstract

In the following investigation, the coagulant power of aluminum sulfate and the mixture of aluminum-cassava starch (*Manihot esculenta*) with a 2:8 ratio were evaluated in the clarification process of La Ciénaga Grande de Malambo (Atlántico-Colombia's) water. To record the initial characteristics, a water simple sampling was carried out. Subsequently, in the simulation stage of the clarification process, the jar test was implemented, where was observes the reduction in turbidity obtained by using the chemical coagulant and the mixture. Finally, it was concluded aluminum sulfate achieved a removal percentage of 70% with an dose of 20 mg/L, while the aluminum sulfate- cassava starch mixture the turbidity removal was 71.06% with an dose of 60 mg/L, starting from an initial value of 69 NTU.

Palabras clave: clarification; jar test; removal; turbidity.

1. Introducción

El agua condiciona y sustenta la vida de todos los seres humanos; es tanta la importancia de este vital recurso,

que a lo largo de la historia ha desarrollado formas de vida, sistemas económicos y múltiples culturas. Al igual que el aire o el suelo, no cuenta con un sustituto, sin ella no existiría la vida tal como se conoce, ésta se encuentra

directamente relacionada con la composición de la atmósfera, biosfera y geosfera. El planeta tierra se encuentra cercado por un 70% de agua, el cual se puede encontrar en la naturaleza en estado sólido en icebergs y glaciares; líquido en lagos, ríos y acuíferos; además gaseoso en vapor de agua y nubes [1].

Solo el 2,5% constituye la disponibilidad de agua dulce de la tierra, originando preocupación con respecto al uso y calidad del preciado líquido [2]. Su escasez genera una vida más difícil, a pesar de la conciencia al respecto, son muy pocos los esfuerzos realizados para prevenir la contaminación de los recursos hídricos [3], [4]. Su deterioro, pérdida y demanda han aumentado en los últimos años debido a diversos factores, tales como: la sobreexplotación de tierras, el crecimiento poblacional, la expansión urbana, aumento de la actividad económica e industrialización [3], [5]. Diversas organizaciones internacionales realizan conferencias y campañas de concientización en donde el mensaje principal es el reconocimiento y aceptación del agua como un recurso finito que no puede caer en la dilapidación y abuso [1].

El agua atraviesa una serie de procesos fisicoquímicos para convertirse en apta para consumo; el propósito es garantizarla libre de organismos patógenos, sustancias químicas y en rangos de turbidez aceptables [6], [7]. Para el proceso de tratamiento de agua cruda se utilizan comúnmente coagulantes metálicos [8], como las sales de hierro y aluminio; empleadas por su bajo costo y efectividad [9], [10]. Su mecanismo de acción es neutralizar coloides y favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño que serán luego precipitados por sedimentación [6].

En el proceso de clarificación se retiran los sólidos suspendidos y finos, además de material coloidal transformándolo en flóculos con un tamaño considerable para su remoción con facilidad. La clarificación incluye los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación. La coagulación/floculación es importante por su simplicidad [11], además reduce la turbidez del agua y está influenciada por factores como el tipo de coagulante/floculante, dosis, concentración de sólidos, pH del agua, intensidad de la mezcla y su duración [12]. La sedimentación colabora con la mejora de la calidad microbiológica, precipitando agentes patógenos en el contenido del material coloidal [9].

Entre las principales dificultades con el uso de los coagulantes químicos se destacan: la incompetencia al emplearse en bajas temperaturas, producción de grandes volúmenes de lodos, variación del pH en el agua tratada [12], [13] y efectos adversos en la salud humana [14], Su

uso deliberado causa bioacumulación en huesos, hígado y cerebro [15]. Además, los elevados niveles de inflamación en el cerebro contribuyen a su envejecimiento y potencia enfermedades neurodegenerativas [16]. Desde la década de los 60's existen reportes acerca de los coagulantes químicos y su alto nivel de progresión para desarrollar demencia senil y la enfermedad de Alzheimer [17].

Los coagulantes naturales son polímeros iónicos (catiónicos, aniónicos o poli-iónicos) y no iónicos de pesos moleculares variables, derivados de componentes naturales solubles en agua. Se obtienen de bacterias, hongos, animales y plantas los cuales se pueden clasificar como: polisacáridos, aminopolisacáridos, polifenoles y sustancias a base de proteínas [18].

Los coagulantes naturales no representan un riesgo para la salud humana [9] en comparación con algunos coagulantes inorgánicos que contienen monómeros de acrilamida [19]. Algunos de los más utilizados son: el extracto de semilla de mostaza, goma guar, *Moringa olifera* [20], *Strychnos potatorum* Linn, *Plantago ovate*, *Trigonella foenum graecum*, *Opuntia ficus indica*, entre otros; que han evidenciado una eficacia en el tratamiento de aguas y se muestran a largo plazo como sustitutos de los coagulantes químicos [18].

El almidón es el primordial hidrato de carbono sintetizado por las plantas, almacenado en forma de gránulos insolubles semicristalinos reservados en tejidos de almacenamiento. Generalmente proveniente de cereales, raíces, tubérculos, frutas, hortalizas, legumbres y en menor medida de otros tejidos vegetales. Los gránulos de almidón se encuentran constituidos por amilosa, una cadena lineal de glucosa unida por α -1,4 glucosidasa, además de amilopectina, una cadena ramificada de glucosa con ramificaciones en posición α 1,6 [21]. El contenido de amilosa oscila entre 20-25% y la cantidad de amilopectina entre 75-80%, dependiendo del peso del almidón [22].

El almidón es un macro constituyente, cada año se extraen 60 millones de toneladas de este polisacárido alrededor del mundo [23]. Estudiado como floculante por su nivel de biodegradabilidad, disponibilidad, facilidad de aprovechamiento, bajo costo con un alto nivel de producción [15] y capacidad de renovación [24]. Cabe destacar que el tamaño de partícula varía según su fuente; por tal motivo, el área superficial es diferente, generando cambios positivos o negativos en el tratamiento de aguas [21].

En el año 2014 se reportó el uso de almidones crudos, tales como de: arroz, trigo, maíz, papa, como agentes coagulantes en el tratamiento de efluentes de la fábrica para procesamiento de aceite palma. Los resultados fueron favorables al compararlos con el sulfato de aluminio. Se planteó que el uso en combinación de ambos podría reducir la mejor dosis sin afectar la eficiencia del tratamiento [25]. De la misma manera, otro estudio evaluó el poder coagulante del almidón de yuca en combinación con alumbre en la coagulación de un colorante ácido (Rojo Congo). Los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó la mezcla de estas sustancias en la misma proporción [26].

Otra investigación realizada en el año 2015 evidenció el potencial de la planta de sagú como coagulante natural, siendo una alternativa para uso a nivel industrial; usándose en combinación con cloruro de polialuminio (PACl). Se redujo la dosis de 3100 a 2000 mg/L al remover sólidos suspendidos, color y turbidez [27].

Malambo es un municipio de los 32 del departamento del Atlántico, en el cual se encuentra la Ciénaga Grande, cuyas coordenadas geográficas corresponden a 10°51'15,7" de latitud norte y 74°45'26,7" de longitud oeste [28]. Habitantes del sector hacen uso de sus aguas para consumo y labores domésticas; sin embargo, no es apta para este propósito. Debido a lo anterior, es necesario evaluar el poder coagulante del sulfato de aluminio y almidón de yuca (*Manihot esculenta*) en el proceso de clarificación del agua de esta ciénaga.

2. Metodología

2.1. Muestreo de la Ciénaga Grande

Para la recolección y almacenamiento del agua cruda proveniente de la ciénaga se utilizaron canecas plásticas con una capacidad de 35 L aproximadamente. Se realizó un muestreo simple en las orillas de este cuerpo de agua en octubre del año 2018. Se registraron los valores de turbidez y pH utilizando un turbidímetro (TB 300 IR, Lovibond) y un potenciómetro (ST3100 OHAUS).

2.2. Obtención del coagulante (*Manihot esculenta*)

El almidón utilizado en esta investigación se obtuvo aprovechando residuos de yuca descartados del proceso de fabricación de productos alimenticios en la ciudad de Barranquilla-Colombia.

En la Figura 1 se observa el proceso para la obtención del almidón de yuca (*M. esculenta*). Inicialmente se recolectaron las raíces, luego se realizó el lavado de estas. Después se llevó a cabo el pelado manual de estas con cuchillos para arrancar la cascarilla, posteriormente se rasparon empleando un rallador (de lata perforada, estacionaria o cilindro de acero perforado), luego se extrajo manualmente exprimiendo la pulpa para separarla de la lechada de almidón, después se sedimentó para separar los gránulos de almidón de la suspensión, posteriormente se secó al sol, se molió, tamizó (número de malla: 25) y empacó, tal como lo propuso J. Aristizábal *et al.*, [29].

2.3. Preparación de los coagulantes

Se realizó el pesaje de 0,8 g de almidón de yuca (*M. esculenta*) y 0,2 g de sulfato de aluminio comercial tipo A, luego esta mezcla se disolvió en 100 mL de agua destilada para obtener una concentración de 10.000 mg/L. Posteriormente se extrajeron diferentes volúmenes de la misma (1, 2, 4, 6, 8 y 10 mL) y se obtuvieron dosis de 10, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/L del coagulante, respectivamente. Después se pesó 1 g de sulfato de aluminio comercial tipo A y se disolvió 100 mL de agua destilada para la elaboración del coagulante químico (10.000 mg/L). Finalmente, de igual forma se prepararon las mismas dosis utilizadas con la mezcla coagulante.

2.4. Ensayo de jarras

Siguiendo el método estipulado por la NTC 3903 de 2010, se simuló el proceso de clarificación del agua de la Ciénaga Grande implementando la prueba de jarras (FC6S, VELP). Se llenaron 6 vasos de Griffin con 1000 mL del agua objeto de estudio y se suministraron las diferentes dosis de la mezcla coagulante (10, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/L). Luego se sometieron a proceso de agitación rápida durante un minuto a 120 r/min; después se realizó un proceso de agitación lenta durante 30 minutos a 30 r/min, consecutivamente ocurrió la etapa de sedimentación de los flóculos durante 15 minutos.

Las pruebas fueron realizadas por triplicado. Finalmente se extrajo un volumen de muestra de 40 mL de cada jarra para analizar la turbidez como variable respuesta.

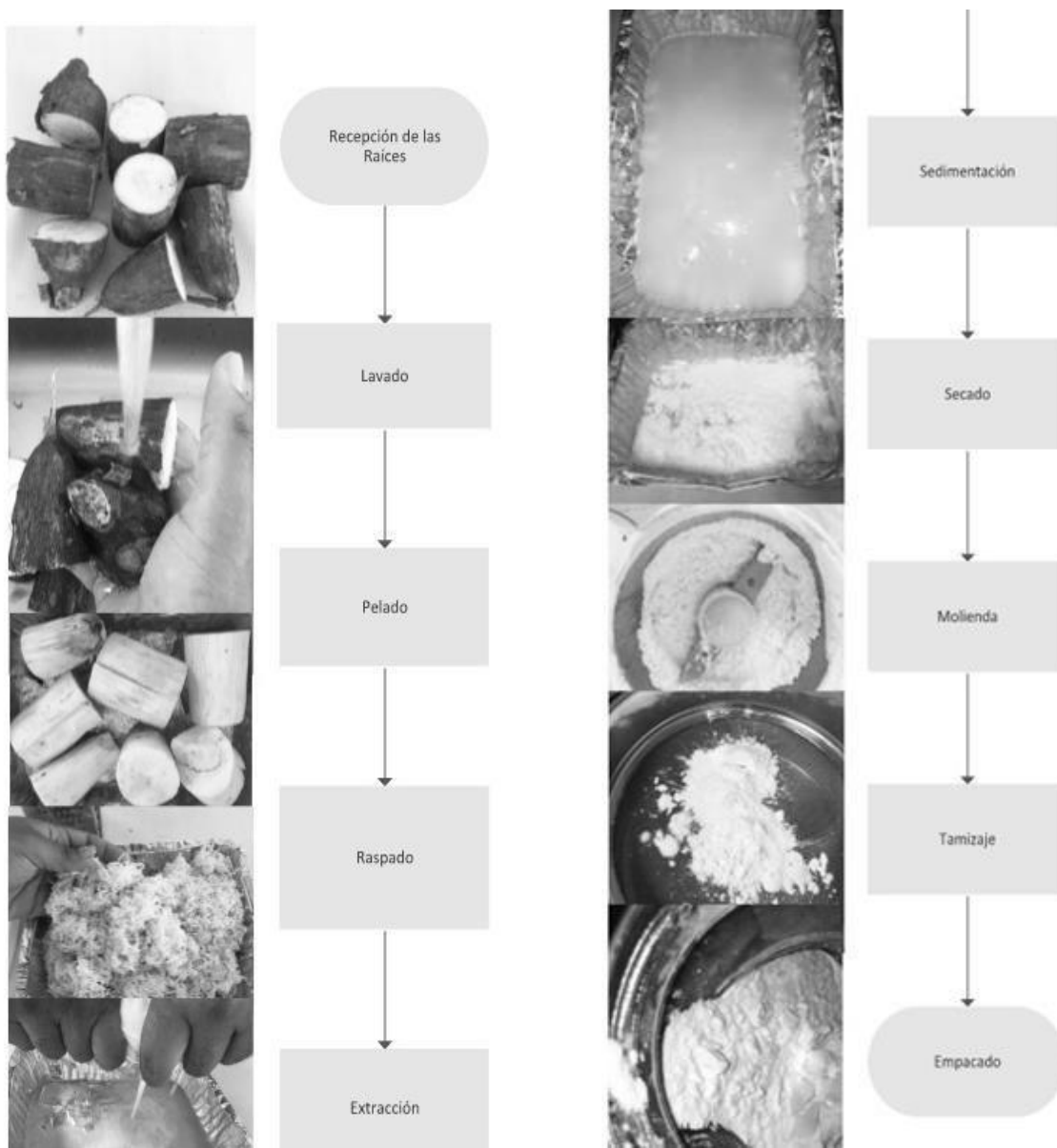


Figura 1. Diagrama del proceso de obtención del almidón de yuca. Fuente: elaboración propia.

2.5. Corrección de pH

El rango de pH usual para la etapa de coagulación donde se presenta el mecanismo de neutralización de las cargas de los coloides y su precipitación en las aguas, está comprendido entre 6,5-8,5 [10]. El almidón de yuca (*M. esculenta*) se comporta como un buen coagulante para tratarlas porque su rango de acción está comprendido entre 6,0-8,0 permitiendo su uso. Si el pH de las muestras de agua se encuentra debajo del rango

adecuado, se pueden emplear álcalis como cal o hidróxido de sodio para aumentarlo [30] o ácidos para disminuirlo, como el clorhídrico o sulfúrico [31].

Teniendo en cuenta que el agua cruda de la ciénaga analizada durante esta investigación tuvo un pH de 7,20 no se realizó esta corrección antes de usar los coagulantes.

2.6. Análisis de resultados

Inicialmente se elaboró un diseño unifactorial (dosis) para cada coagulante, sulfato de aluminio y la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*). Luego, se analizó su influencia sobre la turbidez del agua de la Ciénaga Grande, tal como se presenta en la Tabla 1.

En esta investigación de tipo experimental, se realizó la comparación de los resultados obtenidos de la mezcla coagulante químico-natural y el sulfato de aluminio. Luego, se analizaron en el programa estadístico Statgraphics Centurión XVI donde se elaboró un análisis de varianza ANOVA y el test de Duncan, con una confiabilidad del 95% (valor $P < 0,05$).

Tabla 1. Diseño factorial para cada coagulante.

Clase de Diseño		Factorial
Bases del diseño		
Número de factores		1
Número de bloques		1
Número de respuestas		1
Número de corridas		18
Grados de libertad para el error		12
Factores	Niveles	Unidades
Dosis	6	mg/L
Variable respuesta		Unidades
Turbidez		UNT

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

El agua recolectada de la Ciénaga Grande presentó una turbidez de 62,00 UNT y un pH de 7,20. El valor del potencial de hidrógeno estuvo dentro del rango comprendido entre 6,5 y 9,0 que establece la resolución 2115 del 2007, la cual presenta las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano; mientras que la turbidez de la fuente hídrica superó el valor límite permitido en esta resolución. Debido a lo anterior, el agua recolectada en la ciénaga no es apta para consumo humano. Por lo tanto, debe ser tratada [32].

En la Figura 2 se observa el comportamiento de la turbidez del agua después de realizar la prueba de jarras, cuando se utilizó sulfato de aluminio en diferentes dosis, agregadas como coagulante al proceso de clarificación del agua objeto de estudio. Inicialmente la turbidez disminuye rápidamente (10 a 20 mg/L), luego aumenta

levemente (20 a 40 mg/L). Esto demuestra que la sustancia química genera un cambio en la carga de las partículas en suspensión (lo invierte), obteniéndose una mayor cantidad de estas [33]. Posteriormente, la turbidez final del agua de la ciénaga disminuye levemente (40 a 60 mg/L). Finalmente, este parámetro muestra la tendencia a estabilizarse (60 a 100 mg/L).

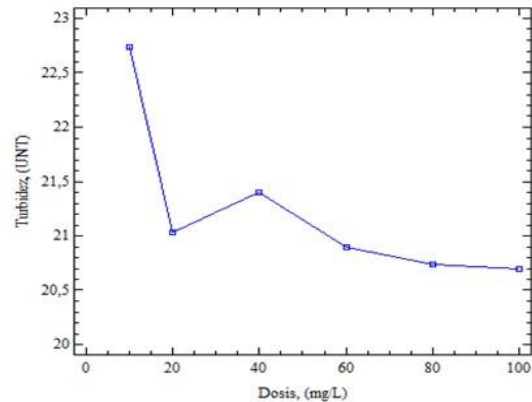


Figura 2. Turbidez del agua después de la prueba de jarras utilizando sulfato de aluminio en diferentes dosis.

Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianza ANOVA presentó un valor P de 0,0001 menor a 0,05 lo cual indica que el factor, dosis del coagulante sulfato de aluminio, influye sobre la variable respuesta, turbidez del agua de la Ciénaga Grande.

En la Tabla 2 se presenta el test de Duncan que se empleó para seleccionar la mejor dosis del coagulante químico, que redujo la turbidez de las muestras de agua. Se observan tres grupos, siendo el primero 20, 60 y 100 mg/L; el segundo 20, 40 y 60 mg/L; el tercero 10 mg/L, fácilmente identificables.

Tabla 2. Test de Duncan para el coagulante químico.

Dosis	Media	Grupos Homogéneos
100	20,70	X
80	20,73	X
60	20,90	XX
20	21,03	XX
40	21,40	X
10	22,73	X

Fuente: elaboración propia.

El primer grupo mostró las dosis de sulfato de aluminio que obtuvieron una menor turbidez final, las cuales fueron 21,03; 20,90; 20,73 y 20,70 UNT, respectivamente. El segundo grupo presentó valores de

turbidez final de 21,40; 21,03 y 20,90 UNT, teniendo en cuenta las distintas dosis. Finalmente en el tercer grupo se observó una turbidez final del agua de 22,73 UNT cuando se usó una dosis de 10 mg/L. Luego de realizar el análisis estadístico de los datos que conforman el primer grupo, se evidenció que los valores de turbidez final del agua de la ciénaga obtenidos al utilizar las distintas dosis, son los mismos. Esta situación también ocurrió en el segundo grupo donde los datos analizados también fueron estadísticamente iguales, pero uno de los valores de turbidez final del agua fue 21,40 UNT siendo mayor a los del primer grupo.

Teniendo en cuenta que los coagulantes a base de aluminio se encuentran relacionados con problemas que afectan la salud humana [14]-[17], se escogió como mejor dosis para el sulfato de aluminio 20 mg/L por su menor contenido de compuesto químico. Con esta dosis se obtuvo una turbidez final del agua de la Ciénaga Grande de 21,03 UNT que representó un porcentaje de remoción del 66,07% de este parámetro.

Se demostró durante el año 2019, que el sulfato de aluminio disminuye la turbidez del agua del río Tigris en Irak de 100 a 10 UNT, generando una reducción del 90% con una dosis de 12 mg/L [34]. En Irán, algunos investigadores demostraron durante el año 2018, que el sulfato de aluminio disminuye la turbidez del agua del río Minab de 75 a 5,03 UNT removiendo el 93,30% de este parámetro, cuando se utiliza la dosis de 35 mg/L [35]. Otro estudio, realizado durante el año 2018, muestra que el sulfato de aluminio disminuye la turbidez del agua de la planta de tratamiento de agua de Sembrong en Malasia de 26,06 a 3,86 UNT equivalente a una remoción del 85,20% usando una dosis óptima de 15 mg/L [36].

En Colombia, durante el año 2018, al usar una dosis de 40 mg/L de sulfato de aluminio, se removió la turbidez del agua de la Ciénaga Grande en 92,51%. Es decir, partiendo de un valor inicial de 59,60 UNT después de la clarificación del agua se obtuvo un valor de 4,46 UNT [37]. Sin embargo, los resultados del año 2017 fueron diferentes. El agua cruda presentó una turbidez de 56,50 UNT y después del tratamiento se observó que se debe emplear 20 mg/L de sulfato de aluminio, que disminuyó la turbidez del agua de la ciénaga hasta un valor de 1,8 UNT. De esta manera se alcanzó una reducción del 96% en este parámetro [31].

Un estudio realizado en Nigeria durante el año 2014 presentó el sulfato de aluminio como coagulante para tratar un agua residual con una turbidez inicial de 52,30

UNT. Se obtuvo un porcentaje de remoción de este parámetro del 43,70% al utilizar una dosis de 50 mg/L. Finalmente se alcanzó una turbidez final de 29,44 UNT [38].

En Irán durante los años 2013-2014 se llevó a cabo una investigación con el agua cruda de una planta de tratamiento, con el objetivo de estudiar la eficiencia del cloruro férrico y sulfato poliférrico para eliminar su turbidez. Se tomaron muestras del agua que ingresaba a la planta durante las cuatro estaciones del año: primavera (5,6 UNT); verano (12,7 UNT); invierno (15,32 UNT) y otoño (31,35 UNT) [39].

En primavera, se observan porcentajes de remoción de 45,85% para el sulfato poliférrico usando una dosis de 7 mg/L y 44,62% con dosis de 10 mg/L para el cloruro férrico. En verano, los porcentajes de remoción utilizando sulfato poliférrico y cloruro férrico son 75,43% con dosis de 9 mg/L y 75,27% empleando dosis de 10 mg/L, respectivamente. En invierno, los porcentajes de remoción son de 81,39% utilizando sulfato poliférrico con una dosis de 9 mg/L y 79,63% para el cloruro férrico usando una dosis de 11 mg/L. En otoño los porcentajes de remoción son de 90,52% utilizando una dosis de 8 mg/L para el sulfato poliférrico y 90,14% empleando 10 mg/L de cloruro férrico [39].

Los resultados de la anterior investigación mostraron que el sulfato poliférrico actúa mejor como coagulante removiendo la turbidez en un 75,43% en comparación del cloruro férrico que remueve el 75,27%; usando una menor dosis [39].

Todos los resultados de las anteriores investigaciones difieren con el presente estudio debido a la variación de la composición físico y química del agua analizada, además de las diferentes estaciones del año (periodos de lluvia y sequía) en las cuales se recolecta el líquido.

En Rumanía se realizó un estudio en el año 2012 donde se analizó la turbidez del lago Strâmtori-Firiza fuente de una planta de tratamiento de agua potable. Al utilizar 14,14 mg/L de sulfato de aluminio su turbidez disminuyó de 53 a 18,31 UNT representando un porcentaje de remoción de este parámetro del 65,45% [40]. Estos resultados son similares a los obtenidos en la presente investigación.

Además, el proceso de clarificación del agua de la Ciénaga Grande evaluó el poder coagulante de la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*) en una proporción 2:8 y se utilizó el diseño factorial propuesto en la Tabla 1.

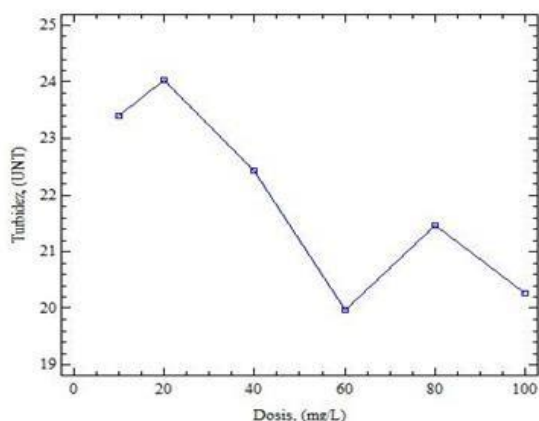


Figura 3. Turbidez del agua después de la prueba de jarras utilizando la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*) en diferentes dosis. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de la turbidez del agua después de realizar la prueba de jarras, cuando se utilizó la mezcla coagulante (químico-natural) en diferentes dosis. Inicialmente la turbidez aumenta levemente (10 a 20 mg/L). Esto demuestra un cambio en la carga de las partículas en suspensión, dando como resultado una mayor cantidad [33]. Luego, disminuye rápidamente (20 a 60 mg/L), después aumenta (60 a 80 mg/L) debido al fenómeno que también se presentó cuando se utilizó una dosis de 20 mg/L. Posteriormente, este parámetro disminuye (80 a 100 mg/L).

El análisis de varianza ANOVA presentó un valor P de 0,0001 menor a 0,05 lo cual indica que el factor, dosis de la mezcla coagulante, influye sobre la variable respuesta, turbidez del agua de la Ciénaga Grande.

En la Tabla 3 se observa el test de Duncan que se empleó para seleccionar la mejor dosis de la mezcla coagulante, que redujo la turbidez de las muestras de agua. Ésta evidencia cuatro grupos, siendo el primero 60 y 100 mg/L; el segundo 40 y 80 mg/L; el tercero 10 y 40 mg/L; el cuarto 10 y 20 mg/L, fácilmente identificables.

El primer grupo mostró las dosis de la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*) que obtuvieron una menor turbidez final, las cuales fueron 19,97 y 20,27 UNT, respectivamente. El segundo grupo presentó valores de turbidez final de 22,43 y 21,47 UNT, teniendo en cuenta las distintas dosis. En el tercer grupo se evidenciaron valores de turbidez final iguales a 23,40 y 22,43 UNT cuando se utilizaron dosis de 10 y 40 mg/L, respectivamente. Finalmente, en el cuarto grupo se

observó una turbidez final del agua de 23,40 y 24,03 UNT cuando se usaron 10 y 20 mg/L de la mezcla coagulante. Luego de realizar el análisis estadístico de los datos que conforman el primer grupo, se evidenció que los valores de turbidez final del agua de la ciénaga obtenidos al utilizar las distintas dosis son los mismos.

Tabla 3. Test de Duncan para la mezcla coagulante.

Dosis	Media	Grupos Homogéneos
60	19,97	X
100	20,27	X
80	21,47	X
40	22,43	XX
10	23,40	XX
20	24,03	X

Fuente: elaboración propia.

Esta situación también ocurrió en los otros grupos donde los datos analizados también fueron estadísticamente iguales. Tenido en cuenta que en el primer grupo se presentan los menores valores de turbidez final del agua, se escogió 60 mg/L como la mejor dosis. Con esta dosis se obtuvo una turbidez final del agua de la Ciénaga Grande de 19,97 UNT que representó un porcentaje de remoción del 67,79% de este parámetro.

Los grupos funcionales hidroxilos (-OH) que se presentan en la estructura química del almidón de yuca (ver Figura 4), son puntos donde los coloides presentes en el agua sin tratar se unen contribuyendo a un mejor proceso de coagulación, floculación y sedimentación de estas partículas [21]. Por lo anterior, este almidón influye en la dosis del coagulante y en el tamaño de los flóculos [22].

Un estudio llevado a cabo en Bagdad durante el año 2019, demostró la disminución de la turbidez en el agua del río Tigris cuando su valor inicial fue 22 y 100 UNT, usando mezclas coagulantes producidas con: (1) extracto de nueces peladas y sulfato de aluminio en una proporción 5:5, empleando 6 y 12 mg/L como mejores dosis, respectivamente; (2) goma de albaricoque y sulfato de aluminio en la misma proporción, utilizando las mejores concentraciones de 8 y 10 mg/L, respectivamente. El parámetro analizado se removió en 95 y 88% al emplear la primera mezcla con las dosis inicialmente mencionadas, respectivamente. Cuando se usó la segunda mezcla, el porcentaje de remoción fue 95 y 85% utilizando las mejores dosis, respectivamente [34].

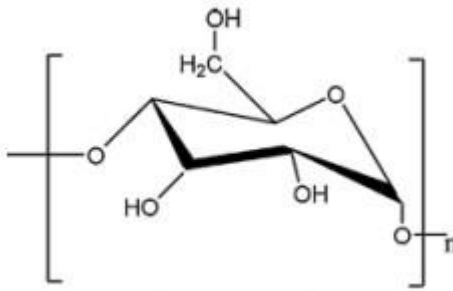


Figura 4. Fotografía que presenta la estructura química del almidón de yuca. Fuente: adaptado de [22].

En la hidroeléctrica de Sembrong-Malasia durante el año 2018, se realizó un estudio que evaluó el poder coagulante de la mezcla sulfato de aluminio-almidón de cáscara de yuca. Luego de la simulación del proceso de clarificación del agua disminuyó su turbidez de 26,06 a 2,22 UNT equivalente a una remoción del 91,47%, usando la mejor dosis (7,5 mg/L de la sustancia química y 100 mg/L de almidón) [36].

Durante el año 2018, se identificó que la cáscara de papa que contiene altos contenidos de almidón, en dosis de 10 mg/L remueve 81,32% de la turbidez del agua de la Ciénaga Grande en el municipio de Malambo-Atlántico (Colombia), partiendo de una turbidez inicial de 59,60 UNT [37].

Un estudio realizado en Nigeria en el año 2014 presentó el uso de dos variedades de almidón de yuca como coagulante: (1) *manihot palmate* y (2) *Manihot aipi*, en muestras de agua residual con turbidez inicial de 52,3 UNT. Se mostró para la variedad (1) y (2) porcentajes de remoción del 51,8% usando una dosis de 30 mg/L y 58,3% empleando dosis de 10 mg/L, respectivamente. Finalmente se alcanzaron valores de turbidez de 25,20 y 21,80 UNT para cada coagulante, respectivamente [38].

Se demostró durante el año 2014, que la mezcla almidón de malanga (*Colocasia esculenta*)-sulfato de aluminio en una proporción 3:7 para el proceso de clarificación de aguas superficiales en México, disminuye la turbidez de 400 a 20 UNT, generando un porcentaje de remoción de este parámetro del 95% con una dosis de 50 mg/L [41]. En el mismo país, se realizó otro estudio en el río Carrizal durante el año 2012, en el cual se analizó el poder coagulante de la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*) en una proporción 5:5. La turbidez de este cuerpo de agua luego del tratamiento de clarificación disminuyó de 70 a 1,47 UNT representando un porcentaje de remoción del 97,95% para este parámetro [42].

Al comparar los resultados de la presente investigación con los estudios anteriormente mencionados, se observa que la variedad de yuca, la fuente de donde proviene el almidón y composición del agua analizada influyen en el poder coagulante durante el proceso de clarificación.

En esta investigación se redujo la cantidad de sulfato de aluminio en un 40%, cuando se utilizó una dosis de 60 mg/L de la mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*M. esculenta*) en una proporción 2:8, obteniendo mejores resultados que al emplear solo la sustancia química. Cuando se usaron sulfato de aluminio y la mezcla coagulante químico-natural, no se logró disminuir la turbidez del agua de la Ciénaga Grande por debajo de 2 UNT, siendo este el valor límite establecido por la resolución 2115 para consumo humano.

Debido a lo anterior, se recomienda tener en cuenta lo descrito en el reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico (RAS). Los procesos de coagulación, floculación y sedimentación son las primeras etapas realizadas en una planta de tratamiento de agua potable; posteriormente se lleva a cabo el proceso de filtración que dependiendo de su tipo, logra eliminar turbidez, color aparente y sólidos disueltos totales [43].

4. Conclusiones

La mezcla sulfato de aluminio-almidón de yuca (*Manihot esculenta*) en una proporción 2:8, redujo en mayor cantidad la turbidez del agua de la Ciénaga Grande comparado con el coagulante químico sulfato de aluminio, bajo las mismas condiciones. En esta investigación se demostró que es posible disminuir la cantidad de sulfato de aluminio utilizado como coagulante en el proceso de clarificación de aguas naturales, presentando la mezcla químico-natural analizada como una alternativa.

Referencias

- [1] C. Prakash Khedun, R. Sanchez Flores, H. Rughoonundun, R. Kaiser, "World water supply and use: challenges for the future," *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, vol. 5. Elsevier Ltd., pp. 450–465, 2014, doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00083-8
- [2] S. Choy, K. Prasad, T. Wu, M. Raghunandan, R. Ramanan, "Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 26, no. 11, pp. 2178–2189, 2014, doi: 10.1016/j.jes.2014.09.024

- [3] C. Ramamurthy, M. Maheswari, N. Selvaganabathy, M. Kumar, V. Sujatha, C. Thirunavukkarasu, "Evaluation of eco-friendly coagulant from *Trigonella foenum-graecum* seed," *Adv. Biol. Chem.*, vol. 2, no. 1, pp. 58–63, 2012, doi: 10.4236/abc.2012.21007
- [4] S. Ahuja, "Lessons learned from water disasters of the world," in *Evaluating Water Quality to Prevent Future Disasters*, 1st ed., S. Ahuja, Ed. Calabash, NC, United States.: Elsevier Inc., 2019, pp. 417–427.
- [5] J. Aznar, J. Velasco, L. Belmonte, F. Manzano, "The worldwide research trends on water ecosystem services," *Ecol. Indic.*, vol. 99, no. December 2018, pp. 310–323, 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.12.045
- [6] M. Scholz, "Water treatment," in *Wetlands for Water Pollution Control*, Secon edit, Salor, Uk, 2016, pp. 9-11.
- [7] R. Olivero, Y. Aguas, I. Mercado, D. Casas, L. Montes, "Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas," *Av. Investig. en Ing.*, vol. 11, no. 1, pp. 70-75, 2014, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.302
- [8] L. Guzmán, Á. Villabona, C. Tejada, R. García, "Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión reduction of water turbidity using natural coagulants: a review," *U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 16, no. 1, pp. 253–262, 2013.
- [9] S. Carrasquero, S. Montiel, E. Faría, P. Parra, J. Marín, A. Díaz, "Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas," *Rev. Fac. Ciencias Básicas*, vol. 13, no. 2, pp. 90–99, 2017, doi: 10.18359/rfcb.1941
- [10] A. Sierra, A. Navarro, I. Mercado, A. Flórez, M. Jurado, "Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando médula de banano," *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 4, pp. 131–138, 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n4-2019012
- [11] S. Al-Asheh, A. Aidan, "Operating conditions of coagulation-flocculation process for high turbidity ceramic wastewater," *J. Water Environ. Nanotechnol.*, vol. 2, no. 22, pp. 80–87, 2017, doi: 10.22090/jwent.2017.02.002
- [12] V. Onen, P. Beyazyuz, E. Yel, "Removal of turbidity from travertine processing wastewaters by coagulants, flocculants and natural materials," *Mine Water Environ.*, vol. 37, no. 3, pp. 482–492, 2018, doi: 10.1007/s10230017-0499-4
- [13] S. Shamsnejati, N. Chaibakhsh, A. Pendashteh, S. Hayeripour, "Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment," *Ind. Crops Prod.*, vol. 69, pp. 40–47, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.01.045
- [14] K. Riaños, M. Meza, I. Mercado, "Clarification of the water of wetlands using a mixture of natural coagulants," *Dyna*, vol. 86, no. 209, pp. 73–78, 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n209.73687
- [15] M. Yusoff, H. Aziz, M. Zamri, F. Suja', A. Abdullah, N. Basri, "Floc behavior and removal mechanisms of cross-linked *Durio zibethinus* seed starch as a natural flocculant for landfill leachate coagulationflocculation treatment," *Waste Manag.*, vol. 74, pp. 362–372, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.016
- [16] S. Bondy, A. Campbell, "Water quality and brain function," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 1, 2018, doi: 10.3390/ijerph15010002
- [17] S. Choy, K. Prasad, T. Wu, M. Raghunandan, R. Ramanan, "Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal," *Ecol. Eng.*, vol. 94, pp. 352–364, 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.082
- [18] M. Saleem, R. Bachmann, "A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 72, pp. 281–297, 2019, doi: 10.1016/j.jiec.2018.12.029
- [19] M. Asrafuzzaman, A. Fakhruddin, M. Hossain, "Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants," *ISRN Microbiol.*, vol. 2011, pp. 1–6, 2011, doi: 10.5402/2011/632189
- [20] J. dos Santos, M. Veit, P. Trevisani, G. da Cunha, S. Moreno, M. Fagundes, "Use of different coagulants for cassava processing wastewater treatment," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 1821–1827, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.02.039
- [21] E. Ogunsona, E. Ojogbo, T. Mekonnen, "Advanced material applications of starch and its derivatives," *Eur. Polym. J.*, vol. 108, no. September, pp. 570–581, 2018, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.09.039

- [22] Z. Badrus, "Potential of natural flocculant in coagulation-flocculation wastewater treatment Process," *E3S Web Conf.*, vol. 73, pp. 2–6, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20187305006
- [23] S. Ellouzi *et al.*, "Isolation and characterization of starch from industrial fresh pasta by-product and its potential use in sugar-snap cookie making," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 52, no. 9, pp. 5754–5762, 2015, doi: 10.1007/s13197-014-1567-4
- [24] C. Yin, "Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment," *Process Biochem.*, vol. 45, no. 9, pp. 1437–1444, 2010, doi: 10.1016/j.procbio.2010.05.030
- [25] N. Oladoja, "Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 3, pp. 47–58, 2016, doi: 10.1016/j.scp.2016.04.001
- [26] O. Abiola, "Appraisal of cassava starch as coagulant aid in the alum coagulation of congo red from aqua system," *Int. J. Environ. Pollut. Solut.*, no. March, 2014, doi: 10.7726/ijeps.2014.1004
- [27] F. Zhu, "Recent advances in modifications and applications of sago starch," *Food Hydrocoll.*, vol. 96, pp. 412–423, 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.05.035
- [28] "Ciénaga Malambo (Malambo Ciénaga) Mapa, Fotos y el tiempo - (Colombia): lago - Latitud:10.8553 and Longitud:-74.7564." [En línea]. Disponible: http://es.getamap.net/mapas/colombia/atlantico/_malambo_cienaga/.
- [29] J. Aristizábal, T. Sánchez, and D. Mejía, "Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163," Roma, 2007.
- [30] C. Trujillo *et al.*, "Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano," *Rev. ION*, vol. 27, no. 1, pp. 17–34, 2014.
- [31] M. Meza, K. Riaños, I. Mercado, R. Olivero, M. Jurado, "Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *Moringa oleifera* en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de MalamboAtlántico," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 95–104, 2018, doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018009
- [32] Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, "Guía que amplia aspectos técnicos para la selección del punto de muestreo para el control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano sobre la red de distribución," Bogotá D.C. Colombia, Resolución 2115 del 2007.
- [33] W. Jasper, I. Latif, D. Tom-Dery, K. Ochire-Boadu, K. Bernard, "Nutrient composition of *Moringa oleifera* leaves from two agro ecological zones in Ghana," *Afr. J. Plant Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 65–71, 2014, doi: 10.5897/AJPS2012.0727.
- [34] A. Ali, Y. Tlaiaa, Z. Abdul, R. Nasir, "Sustainable used of natural coagulants aid for enhancing the performance of alum to treat turbid water sustainable used of natural coagulants aid for enhancing the performance of alum to treat turbid water," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 518, no. 2, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/518/2/022014
- [35] H. Kashfi *et al.*, "Possibility of utilizing natural coagulants (*Trigonella foenum-graecum* and *Astragalus gossypinus*) along with alum for the removal of turbidity," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 7, pp. 2905–2914, 2019, doi: 10.1007/s13762-017-1635-1
- [36] S. Asharuddin *et al.*, "Performance assessment of cassava peel starch and alum as dual coagulant for turbidity removal in dam water," *Rev. Int. Ing. Integr.*, vol. 10, no. 4, pp. 185–192, 2018, doi: 10.30880/ijie.2018.10.04.029
- [37] H. Camacho, D. Campos, I. Mercado, N. Cubillán, G. Castellar, "Uso de la cáscara de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo," *Investig. Innov. Ing.*, vol. 8, no. 1, pp. 100–111, 2020.
- [38] A. Adamu, D. Adie, U. Alka, "A comparative study of the use of cassava species and alum in waste water treatment," *Niger. J. Technol.*, vol. 33, no. 2, p. 170–175, 2014, doi: 10.4314/njt.v33i2.5
- [39] E. Fataei, E. Moghaddam, M. Abdollahzadeh, "Determination of the best coagulant for turbidity and organic matter removal in the coagulation process of ardebil water treatment plant in Iran," *Adv. Environ. Biol.*, vol. 8, no. 22, pp. 319–324, 2014.

[40] E. Cical, C. Mihali, M. Mecea, A. Dumuța, T. Dippong, “Considerations on the relative efficacy of aluminum sulphate versus polyaluminum chloride for improving drinking water quality,” *Stud. Univ. BabeşBolyai Chem.*, vol. 61, no. 2, pp. 225–238, 2016.

[41] R. Lopez, J. Laines, R. Hernandez, M. Aparicio, “Evaluacion de almidones de malanga (*Colocasia esculenta*) como agentes coadyuvantes en la remocion de turbiedad en procesos de potabilizacion de agua,” *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 13, no. 3, pp. 855–863, 2014.

[42] R. Hernandez, R. Solis, J. Laines, “Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, no. 3, pp. 229–236, 2012.

[43] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, “Resolucion 0330 del 2017”, Bogotá D.C. Colombia, 2017.