



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**"TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
CONTAMINADAS CON COLORANTE  
ÍNDIGO MEDIANTE EL ACOPLAMIENTO DE  
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y UN TREN DE  
TRATAMIENTO DE ADSORCIÓN, FILTRACIÓN Y  
MICROFILTRACIÓN"**

**TESIS INDIVIDUAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

**PRESENTA**

**ANGEL XIMENA ARCADIA QUEZADA**

**DIRIGIDA POR**

**DRA. EVELYN ZAMUDIO PÉREZ**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2026**

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



## CC BY-NC-ND 4.0 DEED

### Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

#### **Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

#### **Bajo los siguientes términos:**

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

#### **Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
CONTAMINADAS CON COLORANTE ÍNDIGO MEDIANTE  
EL ACOPLAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y  
UN TREN DE TRATAMIENTO DE ADSORCIÓN,  
FILTRACIÓN Y MICROFILTRACIÓN”**

**TESIS INDIVIDUAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

**PRESENTA**

**ANGEL XIMENA ARCADIA QUEZADA**

**DIRIGIDA POR**

**Dra. EVELYN ZAMUDIO PÉREZ**

**SINODALES**

**Dra. EVELYN ZAMUDIO PÉREZ**

**DIRECTORA**

**Dr. JORGE NOEL GRACIDA RODRÍGUEZ**

**SINODAL**

**Dra. AMANDA KIM RICO CHÁVEZ**

**SINODAL**

**Dra. MARÍA DEL CARMEN GONZÁLEZ LÓPEZ**

**SINODAL**

## AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis implicó más que experimentos y análisis de datos: incluyó errores, demasiadas repeticiones, frustración, hojas corregidas y varias horas frente a la computadora. Parecían eternos los días en el laboratorio, como si el tiempo pasara lentamente.

Comienzo agradeciendo a mi madre, Claudia Quezada y mi padre, Raúl Arcadia por todo su apoyo para poder completar esta etapa de mi estudio, que si bien fue lejos de casa fue la mejor decisión que pude haber tomado. Sus aientos fueron parte fundamental para tener fortaleza y concluir mis estudios. Agradezco a mi familia por su interés en lo que hago, a pesar de que siempre me preguntan qué es exactamente lo que estudio.

A mi directora de tesis, tutora y una de mis mejores maestras de la carrera, la Dra. Evelyn Zamudio, gracias por confiar en mí como su tesista y no dejarme rendir cuando el camino se complicó. Gracias por su guía y apoyo durante todo el desarrollo de este trabajo y de mi formación académica.

Agradezco a mis niñas, mis mejores amigas, la mejor parte de la universidad. Gracias por llegar a mi vida, por los coffee dates, las risas y las crisis compartidas que hicieron este proceso más llevadero. Espero con emoción las aventuras profesionales y personales que nos llegan después de esto.

Finalmente, a mis sinodales y maestros. A mis sinodales, gracias por su disposición, apoyo y observaciones constructivas que ayudaron a fortalecer este proyecto. A mis maestros, por las enseñanzas dentro y fuera del aula, por su paciencia en épocas de entregas y no rendirse en el proceso.

Gracias por ser parte importante en esta etapa de mi vida.

Atentamente

Angel Ximena Arcadia Quezada

## ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
1. ANTECEDENTES	1
1.1. La industria textil y su consumo de agua	1
1.2. Colorantes textiles	3
1.3. Saponinas	4
1.4. <i>Agapanthus africanus</i>	6
1.5. Coagulación-floculación	8
1.5.1. Tratamientos con agentes inorgánicos	8
1.5.2. Tratamientos con agentes orgánicos	9
1.6. Tren de tratamiento	10
2. HIPÓTESIS	12
3. OBJETIVOS	13
General	13
Específicos	13
4. METODOLOGÍA	14
4.1. Materiales	14
4.2. Reactivos	14
4.3. Métodos	15
4.3.1. Extracción	15
4.3.2. Índice de emulsificación (E24)	15
4.3.3. Métodos de determinación preliminares	16
4.3.4. Cromatografía de capa fina (TLC)	16
4.3.5. Identificación por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-MS)	17
4.3.6. Coagulación-floculación	17
4.3.7. Diseño experimental	18
4.3.8. Tren de tratamiento	19

4.3.9. Acoplamiento	21
4.3.10. Análisis de la disminución de turbidez y color	23
4.3.11. Evaluación de la aptitud del agua tratada para riego	24
<b>5. RESULTADOS Y DISCISIÓN</b>	<b>25</b>
5.1. Extracción saponinas	25
5.1.1. Prueba etanol	25
5.2. Índice de emulsificación	26
5.3. Métodos de determinación preliminares	27
5.4. Cromatografía de capa fina (TLC)	28
5.5. Identificación de saponinas por CG-MS	29
5.6. Coagulación-flocculación	32
5.7. Tren de tratamiento	37
5.8. Acoplamiento	39
5.9. Análisis de la disminución de turbidez y color después del acoplamiento	40
5.10. Evaluación de la aptitud del agua tratada para riego	41
5.11. Comparación final	44
<b>6. CONCLUSIÓN</b>	<b>45</b>
<b>7. PERSPECTIVAS</b>	<b>46</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>577</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diseño experimental	18
Cuadro 2. Resultados de E24.	26
Cuadro 3. Resultados de las pruebas preliminares.	27
Cuadro 4. Resultados de prueba de jarras, turbidez y lodos.	33
Cuadro 5. Comparación de la eficiencia de coagulantes.	37
Cuadro 6. Resultados de la prueba DQO después del tren de tratamiento, representado en porcentaje.	39
Cuadro 7. Resultados de remoción de turbidez del acoplamiento.	40
Cuadro 8. Resultados de remoción de color del acoplamiento.	40
Cuadro 9. Comparación del color y salud general de las plántulas control y con agua tratada.	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de una planta <i>Agapanthus africanus</i> con su vara floral.	7
Figura 2. <i>Agapanthussaponin</i> .	8
Figura 3. Configuración del acoplamiento del tren de tratamiento.	23
Figura 4. Resultado de extracción de saponinas con etanol.	25
Figura 5. E24 del extracto de saponina.	27
Figura 6. Resultados del método de espuma.	28
Figura 7. Resultado de prueba de peróxido.	28
Figura 8. Resultado de TLC. El carril 1 (izquierda) contiene la sustancia de referencia (estándar), y el carril 2 (derecha) contiene la muestra del extracto.	29
Figura 9. Cromatograma de gases FAMES de la muestra.	30
Figura 10. Espectro de masa de la muestra.	31
Figura 11. Compuesto erróneo arrojado por el software. (22R)-6 $\alpha$ ,11 $\beta$ ,21-Trihydroxy-16 $\alpha$ ,17 $\alpha$ -propylmethylenedioxypregna-1,4-diene-3,20-dione.	32
Figura 12. Resultados para la concentración de coagulante a 300 mg/L.	34
Figura 13. Resultados para la concentración de coagulante a 500 mg/L.	35
Figura 14. Resultados para la concentración de coagulante a 700 mg/L.	35
Figura 15. Componentes requeridos para el tren de tratamiento.	38
Figura 16. Sección de Filtración.	38
Figura 17. Tren de tratamiento completo.	38
Figura 18. Gráfica del aumento de remoción del acoplamiento.	39
Figura 19. Aumento de remoción de turbidez del acoplamiento.	41
Figura 20. Aumento de remoción de color del acoplamiento.	41
Figura 21. Comparación de crecimiento de las plántulas control y con agua tratada.	42
Figura 22. Plántulas el último día de toma de crecimiento. A la izquierda se encuentra un control y la derecha con agua tratada.	42
Figura 23. Gráfica de resultados finales. C-T: Coagulación-Floculación, T-T: Tren de Tratamiento.	44

## RESUMEN

La industria textil es uno de los sectores que mayor presión ejerce sobre los recursos hídricos debido al alto consumo de agua en procesos como blanqueo, teñido y acabado, así como a la generación de efluentes con compuestos tóxicos. La producción de prendas de algodón puede requerir entre aproximadamente 20 000 L de agua, además del uso intensivo de colorantes inorgánicos. Ante esta problemática, se evaluó la planta *Agapanthus africanus*, rica en saponinas esteroidales tipo espirostano con propiedades surfactantes, como alternativa natural para la remoción de contaminantes. La selección respondió a la necesidad de desarrollar tratamientos más sostenibles y sustituir coagulantes inorgánicos tradicionales, los cuales generan lodos no biodegradables. Las saponinas se extrajeron y semipurificaron mediante maceración con metanol al 70% y, de forma alternativa, con etanol, seguidas de filtración, evaporación y partición líquido-líquido. Su presencia se confirmó mediante pruebas preliminares y su caracterización por cromatografía en capa fina y por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. La eficiencia coagulante se evaluó mediante pruebas de jarras bajo un diseño factorial 3<sup>3</sup>, variando concentración de saponinas, índigo y pH, utilizando cloruro de hierro como control. La mejor condición para el acoplamiento fue de 500 mg/L de saponinas y 400 mg/L de colorante a pH 9, con una remoción de 61.68% y mínima generación de lodos. El tren de tratamiento integrado permitió reducir a 71.44% la prueba de demanda química de oxígeno y la concentración de índigo hasta 142.8 mg/L, cumpliendo con las normas de contaminantes en aguas residuales.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. La industria textil y su consumo de agua

A nivel mundial, únicamente el 0.01% del agua total disponible está destinada al consumo humano y, en México, el sector agropecuario representa el principal consumidor de este recurso (Adame & Cubero, 2024). Esta situación hídrica se agrava por el crecimiento de la población, la contaminación de los cuerpos de agua, la sobreexplotación de los acuíferos y los efectos del cambio climático. (Adame & Cubero, 2024). En paralelo, la industria textil destaca como uno de los sectores con mayor consumo de agua a nivel mundial y constituye una importante fuente relevante de presión sobre los recursos hídricos, tanto por el uso directo del agua como por la generación de aguas residuales altamente contaminantes (Sentená-Montero, 2021).

En la industria textil, los procesos en húmedo como el blanqueo, el teñido, el estampado y el acabado, requieren grandes volúmenes de agua, lo que convierte a este sector en uno de los principales consumidores de este recurso. Se estima que la producción de prendas equivalentes a 1 kg de algodón, como una camisa y un par de jeans, puede demandar entre 10,000 y 20,000 litros de agua al considerar todo el ciclo de vida, desde la fabricación hasta el uso y la disposición final (Villegas-Zapata, 2024; Sentená-Montero, 2021).

El consumo en el área de tratamiento es particularmente crítico, ya que puede involucrar el uso de colorantes, sales y diversos compuestos químicos, algunos de ellos con toxicidad ambiental. Se estima que alrededor del 50% del tinte se fija en el tejido, mientras que el resto se descarga en el efluente, incrementando la contaminación y afectando la calidad del agua en ecosistemas acuáticos (Sentená-Montero, 2021).

Además del elevado consumo de agua, la producción de jeans puede generar aproximadamente 32 kg de dióxido de carbono y, requerir el uso de 10 kg de colorantes sintéticos y 0.5 kg de otras sustancias químicas para obtener el efecto desgastado característico (Aristizabal et al., 2020).

Esta industria también se asocia con una alta carga contaminante, ya que la mayoría de los tintes empleados son de origen sintético, debido su alta estabilidad, bajo costo, reproducibilidad y resistencia al lavado, características que permiten satisfacer la demanda masiva del mercado textil. En particular, el azul índigo es el colorante más utilizado en la fabricación de jeans, con un consumo anual estimado cercano a 50,000 toneladas a nivel mundial (Ferrari, 2024).

La implementación de mejoras en la eficiencia del baño de tintura, así como la adopción de estrategias de reducción, reutilización y reciclaje ha demostrado un potencial significativo para reducir el consumo de agua. Se ha reportado una reducción del 11.8% para poliéster y 13.7% para algodón, e incluso de hasta un 32.4% mediante el reso de baños de tintura (Uribe-Valenzuela, 2021).

No obstante, en países con procesos de industrialización incipientes y con tecnologías menos limpias, la producción textil suele caracterizarse por su uso intensivo de agua y una elevada generación de contaminantes (Valderrama, Neme, & Flores, 2020). En este contexto, el modelo de “fast fashion” se ha popularizado, promoviendo la oferta de prendas a bajos costos y lo que genera que la sociedad compra y desecha la ropa muy rápido (Naciones Unidas, 2019).

Según la Comisión Nacional del Agua, en 2023, el 50.9% de agua superficial está en foco rojo debido a que no cumple con los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes fecales (CF), *Escherichia coli*, (E\_COLI), Enterococos fecales (ENTEROC\_FEC), porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto (OD%) y Toxicidad aguda (TOX); lo que evidencia un deterioro significativo en la calidad del agua utilizada de manera regular (Comisión Nacional del Agua, 2024).

Ante esta problemática, se han explorado nuevas alternativas para la remoción de colorantes en agua, entre las que destaca el uso de coagulantes orgánicos, por ejemplo, polisacáridos, almidón, galactomananos, derivados de celulosa, quitosano y biocoagulantes de alginato, esto para evitar los efectos adversos de las sales de hierro utilizadas regularmente (Nath et al., 2021).

## 1.2. Colorantes textiles

Existen muchas maneras para la obtención de agentes colorantes empleados en la industria textil, los cuales pueden clasificarse según su origen en inorgánicos u orgánicos. Los pigmentos inorgánicos o sintéticos, comúnmente sintetizados a partir de sales y óxidos metálicos, permiten la obtención de una amplia gama de tonalidades, incluyendo rojos pardos, amarillos, naranjas, verdes, azules ultramarinos y blancos opacos (Marcano, 2018). Los colorantes azoicos, representan entre el 60% y el 70% del mercado global, debido a su alta solubilidad, intensidad de color y resistencia frente a condiciones de luz, calor y lavado. Estas propiedades los hacen particularmente, atractivos para aplicación en fibras como celulosa, lana, algodón, poliéster y nylon (Carrillo et al., 2021; Martínez-Stagnaro, 2017).

Por otro lado, están los pigmentos orgánicos que son una mejor alternativa a los inorgánicos pero debido a la elevada demanda de la industria textil, junto con factores económicos y de disponibilidad, ha favorecido el uso predominante de pigmentos y colorantes inorgánicos. Estos colorantes están constituidos por materiales cromogénicos de naturaleza orgánico y se caracterizan por un alto poder de tinción y solubilidad en determinados solventes orgánicos, como cloroformo y metanol (Marcano, 2018).

El color índigo artificial fue sintetizado por primera vez por el químico alemán Adolf von Baeyer a finales del siglo XIX (Baeyer & Drewsen, 1882). Aunque este método histórico ya no se emplea para generar el colorante a escala industrial, actualmente las fábricas utilizan una reacción química entre anilina, formaldehído y cianuro de sodio para generarlo a gran escala (Zeba Denim, 2024).

El índigo presenta una baja solubilidad en agua, lo que requiere convertirlo en su forma leucoíndigo, para lograr una aplicación eficiente sobre las fibras textiles. Este proceso se realiza en medios altamente alcalinos y emplea agentes reductores, como el ditionito de sodio. Se estima que entre el 30% y el 40% del índigo aplicado no se adhiere a la fibra y es descargado en los efluentes, generando pérdidas

económicas, significativas y amplificando el impacto ambiental del proceso (Vasco-Pérez, 2014).

Los residuos generados durante el proceso del teñido con índigo son particularmente complejos de degradar y, en muchos casos, requieren la implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento, como adsorción en carbón activado, procesos fotoelectrocatalíticos, electrocoagulación o reacciones Fenton, para mitigar la contaminación de los cuerpos de agua receptores (Pedrozo, 2015; Jurado-Chora & Suntaxi-Cantuña, 2020).

### **1.3. Saponinas**

Las saponinas constituyen un grupo diverso de metabolitos secundarios presentes en numerosas especies de vegetales, incluidos algunos cereales, así como en determinados organismos marinos e incluso en insectos (Mendoza et al., 2025). Estas moléculas forman parte del sistema de defensa de las plantas frente a patógenos y depredadores; sin embargo, en la actualidad han despertado un creciente interés debido a su potencial en el tratamiento de diversos tipos de cáncer, debido a su capacidad para inducir apoptosis (Góngora-Chi et al., 2023; Iguchi, Shimazaki, & Mimaki, 2025).

La biosíntesis de las saponinas ocurre en distintas partes de la planta, desde semillas, raíces, cortezas, tallos, hojas y hasta frutos (Góngora-Chi et al., 2023).

Desde el punto de vista estructural, las saponinas son glicósidos constituidos por una fracción hidrofóbica, denominada sapogenina o aglicona, y una fracción hidrofílica formada por uno o más glúcidos. La sapogenina puede ser de naturaleza triterpenoide o esteroidal. En el caso de las saponinas triterpenoides, la estructura principal puede ser pentacíclica, de tipo oleanano, ursano o lupano, o tetracíclica de tipo damarano. Por su parte, en las saponinas esteroidales, el núcleo puede ser colestano tetracíclico, espirostano hexacíclico, furostano pentacíclico o cardenólido. Las triterpenoides poseen seis anillos y 30 átomos de carbono, mientras que las esteroidales contienen cinco anillos y 27 átomos de carbono. La complejidad estructural de estas moléculas depende de la aglicona, de las cadenas laterales y

de los grupos funcionales presentes, como -OH, -COOH y -CH<sub>3</sub> (Góngora-Chi et al., 2023; Mendoza et al., 2025; Rai et al, 2021).

Los glúcidos, que confieren solubilidad en agua, se unen covalentemente a la sapogenina; en las saponinas triterpenoides los enlaces se localizan principalmente en los carbonos C-3 y C-28, mientras que en las esteroidales están en C-3 y C-26. Según el número de residuos de azúcar, las saponinas se clasifican como monodesmosídicas, didesmosídicas o tridesmosídicas, si presentan uno, dos o tres azúcares, respectivamente. Entre los azúcares más comunes se encuentran D-glucosa, D-galactosa, ácido D-glucurónico, ácido D-galacturónico, L-ramnosa, L-arabinosa, D-xilosa y D-fucosa. La notable diversidad de saponinas se explica por la diversidad estructural de las sapogeninas y de los glúcidos, así como por la posibilidad de que en una misma especie coexistan distintos tipos de saponinas (Góngora-Chi et al., 2023; Rai et al, 2021).

En cuanto a su distribución en plantas, las saponinas triterpenoides se encuentran en soja, frijoles, guisantes, espinacas, remolacha, quinua y cítricos, mientras que las saponinas esteroidales están presentes en avena, semillas de tomate, espárragos y berenjenas. Esta diversidad refleja la amplia variabilidad estructural y funcional de las saponinas, así como su relevancia biológica y potencial aplicación en distintos campos (Góngora-Chi et al., 2023; Rai et al, 2021).

Las saponinas vegetales, presentan una marcada naturaleza anfifílica, derivada de la combinación de agliconas, lo que les confiere un comportamiento característico como surfactantes naturales con altas propiedades tensioactivas. Debido a su origen natural, su biodegradabilidad y su baja toxicidad, las saponinas representan un posible sustituto de los surfactantes químicos, y su uso se ha incrementado en campos como la alimentación, la cosmética, la industria química y la farmacéutica (Liao et al., 2021; Rai et al, 2021).

Existen varios métodos para la extracción de saponinas. Entre los más tradicionales se encuentran la maceración, la extracción con solventes en equipos Soxhlet y la extracción por reflujo. Actualmente, se utilizan también técnicas más modernas y de menor consumo de reactivos, como la extracción asistida por ultrasonidos, la

extracción asistida por microondas, los disolventes presurizados y la utilización de fluidos supercríticos. Estas técnicas permiten optimizar el rendimiento y la eficiencia de la extracción, además de reducir el tiempo y la cantidad de solventes necesarios (Mendoza et al., 2025; Rai et al, 2021).

#### **1.4. *Agapanthus africanus***

Las plantas del género *Agapanthus* contienen gran cantidad de compuestos bioactivos, entre los que destacan saponinas y flavonoides (Naglaa et al, 2022). Esta especie proviene de la subfamilia Agapanthoideae que a su vez pertenece a la familia Amaryllidaceae, esta especie tiene raíces carnosas, hojas lineales verdes y flores pediceladas de color azul claro a violeta pálido (Naglaa et al, 2024) (Figura1). En esta planta las saponinas más comunes que se encuentran son sapogeninas de espirostano y sus glicósidos (Naglaa et al, 2022).

Esta planta es comúnmente llamada lirio africano, desde el punto de vista etnobotánico, se utilizaba para ayudar en el trabajo de parto y sacar a los bebés, principalmente para favorecer la expulsión de la placenta (Naglaa et al, 2024). Además, en Sudáfrica se utiliza para remedios convencionales y la utilizan como ayuda en la mejora de la memoria (Naglaa et al, 2024).

Adicionalmente, se ha reportado que esta especie presenta actividad antifúngica. En estudio realizado por Singh et al, (2008) se evaluaron extractos de la planta con diferentes solventes, la fracción con n-butanol mostró un aumento de actividad antifúngica en comparación con el control.



Figura 1. Imagen de una planta *Agapanthus africanus* con su vara floral.

El estudio realizado por Iguchi et al. (2025) reportó el aislamiento y la caracterización estructural de tres saponinas esteroidales, denominadas agapanthussaponinas A, B y C. La agapanthussaponina A (compuesto 1) fue identificada como un glicósido esteroidal de tipo espirostano. La agapanthussaponina B (compuesto 2) también es un glicósido esteroidal tipo espirostano, pero se distingue por la presencia de un doble enlace en la posición 7 del anillo esteroidal. Por su parte, la agapanthussaponina C (compuesto 3) mantiene una estructura similar, diferenciándose por la presencia de dos dobles enlaces: uno en la posición 7 y otro en la posición 9 del núcleo esteroidal. La Figura 2 muestra la estructura química de

agapanthussaponina aislada de *Agapanthus africanus*, ilustrando las diferencias en el grado de instauración del núcleo esteroide descritas previamente.

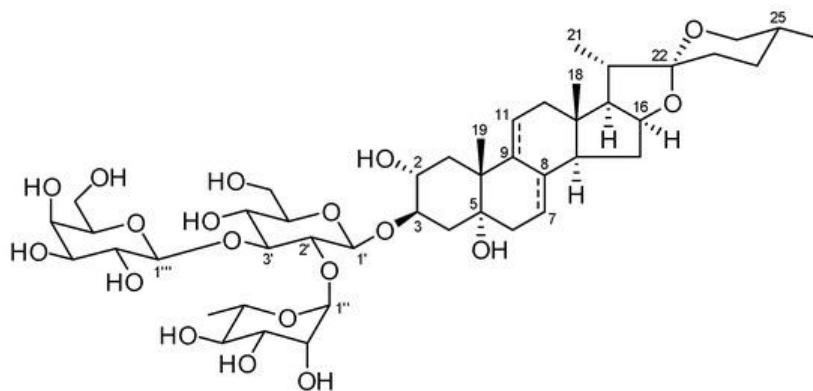


Figura 2. Agapanthussaponin.

## 1.5. Coagulación-floculación

### 1.5.1. Tratamientos con agentes inorgánicos

Los agentes coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el policloruro de aluminio actúan primordialmente mediante la neutralización de las cargas negativas de las partículas presentes en las partículas coloidales suspendidas en el agua. Durante este proceso, estos compuestos generan hidróxidos metálicos que encapsulan y agregan las partículas suspendidas, favoreciendo la formación de flóculos y su posterior sedimentación. A pesar de su alta eficiencia y su costo relativamente bajo, los coagulantes inorgánicos suelen requerir dosis mayores, ajustes precisos de pH y pueden producir lodos con propiedades indeseables, lo que implica riesgos ambientales y de salud si su manejo no es adecuado (Ávila-Castro, 2016; Castellanos-Cardona & Tusarma-Grajales, 2014; Fúquene & Yate, 2018; Martínez-Pérez, 2015).

Algunos coagulantes como las sales de aluminio y hierro, algunas veces son impregnadas con sílice para el tratamiento de agua cruda ya que son muy efectivos en el agua de baja y alta turbidez, esto da como resultado la formación rápida de flóculos (Mohamed & Alfalous, 2020). Cuando se introducen las sales al agua reaccionan de manera alcalina y se hidratan para formar un hidróxido de metal (Sela, 2024). Sin embargo, al final del procedimiento se generan muchos residuos

y lodos que no son biodegradables debido a la precipitación del hidróxido de metal y la materia coloidal (Sela, 2024).

### **1.5.2. Tratamientos con agentes orgánicos**

Los coagulantes naturales se obtienen fácilmente a partir de materias primas renovables, han despertado un creciente interés como alternativas a los coagulantes inorgánicos convencionales. La bibliografía demuestra su eficacia en aplicaciones de tratamiento de aguas, así como la producción de menor cantidad de lodos y biodegradables (Ang & Mohammad, 2020).

Para el tratamiento de aguas contaminadas se ha optado por el uso de organismos o sus metabolitos. Un ejemplo relevante es la aplicación de cultivos fúngicos para la obtención de enzimas capaces de degradar colorantes en aguas residuales. Entre las principales, enzimas se encuentran la lignina peroxidasa, la manganesa peroxidasa y la lacasa; producidas por hongos como *Coriolopsis* sp, *Penicillium simplicissimum* y el hongo de la podredumbre blanca *Pleurotus eryngii* (Holkar et al., 2016).

Asimismo, se ha documentado el uso de extractos vegetales, tales como *Moringa oleifera*, almidones, mucílagos o quitosano. Estos agentes actúan mediante mecanismos de adsorción y de puenteo molecular, facilitando la formación de flóculos más grandes y robustos a través de enlaces de hidrógeno o puentes poliméricos. Como resultado, es posible emplear dosis significativamente menores y reducir la producción de lodos, además de ofrecer ventajas ambientales por su elevada biodegradabilidad (Lopera-López, 2019; Pérez-Beltrán, 2017).

Otra alternativa de interés es el uso de algas en el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Estos organismos pueden incorporar a los colorantes para su crecimiento o pueden transformarlos en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. En particular, se ha reportado una especie de macroalgas verdes *Cladophora* que tiene la capacidad para degradar colorantes azoicos debido a la presencia de la enzima azoreductasa. Los beneficios de usar este tipo de agentes son que son amigables con el ambiente, tienen un costo competitivo, producen menos o ningún tipo de lodo y no generan metabolitos peligrosos (Holkar et al., 2016).

## 1.6. Tren de tratamiento

Los trenes de tratamiento de aguas contaminadas se diseñan combinando procesos físicos y químicos, con el objetivo de maximizar la remoción de una amplia gama de contaminantes para garantizar la eficiencia global del sistema. En este contexto, la adsorción, la filtración y la microfiltración juegan roles complementarios y críticos dentro del esquema de tratamiento (Rad, Ray, & Barghi, 2022).

En el presente trabajo, se consideró el uso de filtración mediante membranas, las cuales permiten la separación de contaminantes según tamaño. Este tipo de tratamiento tiene ventajas en comparación con el tratamiento bioquímico tradicional de aguas residuales, entre las que destacan la ausencia de contaminación secundaria, es más eficiente y no se ve afectado por la temperatura (Vilca, 2022).

La adsorción es un proceso físico-químico en el cual los contaminantes se adhieren a la superficie de materiales adsorbentes; este mecanismo es especialmente útil para eliminar compuestos disueltos y micropoluantes que son difíciles de retirar por simples medios físicos (Rad, Ray, & Barghi, 2022).

Un ejemplo es el uso de carbón activado para eliminar fenoles y derivados clorados (Ingeniería ambiental, 2020). Este material tiene varias propiedades que ayudan a la remoción de agentes, es adsorbente, tiene una gran área superficial, tiene propiedades hidrófobas, es termoestable y es de bajo costo de producción (Vilca, 2022).

La microfiltración constituyó otra etapa relevante dentro del tren de tratamiento. En este proceso se utilizan membranas con poros de entre 0.1 y 10  $\mu\text{m}$  que son óptimos para retirar partículas de un diámetro superior a 0.1 mm (Ingeniería ambiental, 2020).

La filtración se fundamenta en la remoción de sólidos suspendidos, partículas coloidales y microorganismos mediante medios físicos. Tradicionalmente, esta etapa se implementa a través de sistemas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración granular. La combinación de coagulación y filtración, por ejemplo, ha permitido mejorar la remoción de la materia orgánica natural y de otros

sólidos particulados, lo cual es esencial para reducir la carga en las etapas de adsorción y microfiltración subsiguientes (Campinas et al., 2021; Razali et al., 2023).

Existen sistemas de filtración granular que incorporan medios como arena o carbón activado, potencian la remoción de turbidez y pueden ser adaptados para diversificar la eliminación de contaminantes, especialmente cuando se integran en trenes de tratamiento multifásicos (Razali et al., 2023).

En los procesos de filtración y microfiltración pueden utilizarse diferentes tipos de membranas como tubulares, de fibra hueca o espirales, en este tipo la circulación del fluido se realiza paralelamente a la superficie de las membranas en el espaciador, estas están enrolladas alrededor de un colector central perforado (Sefiltrra, s.f.).

En la tesis de Vilca (2022) se realiza una prueba de remoción de tres tipos de colorantes por medio de una membrana, obteniendo una remoción del 70% lo que muestra una buena opción para la eliminación de colorante en agua. En otro estudio se utilizaron membranas de microfiltración con un tamaño de poro de 0.04 y 0.03  $\mu\text{m}$  para tintes monocromáticos, se obtuvieron resultados de 20% de eliminación de color y 60% de disminución de DQO (Buscio et al., 2015).

En conjunto, estos resultados confirman que la integración de procesos de coagulación–floculación, adsorción y filtración por membranas constituye una estrategia efectiva dentro de trenes de tratamiento orientados a la remoción de colorantes y otros contaminantes presentes en aguas residuales.

## 2. HIPÓTESIS

El acoplamiento del proceso de coagulación-floculación utilizando saponinas de *Agapanthus africanus* como coagulante-floculante a un tren de tratamiento de adsorción, filtración y microfiltración, disminuirá la carga de contaminantes en agua sintética de la industria textil con colorante índigo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **General**

Evaluar la eficiencia en la remoción de colorante índigo presente en agua mediante el acoplamiento de coagulación-floculación usando saponinas con un tren de tratamiento de adsorción, filtración y microfiltración.

#### **Específicos**

- Determinar las concentraciones óptimas de saponinas que permitan maximizar la remoción de colorante índigo durante el proceso de coagulación-floculación.
- Evaluar el desempeño del proceso de coagulación-floculación a la concentración óptima seleccionada y su integración con el tren de tratamiento de adsorción, filtración y microfiltración para la remoción del colorante índigo.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Materiales

Se utilizó material de laboratorio general para la realización de los procedimientos experimentales, incluyendo vasos de precipitados, tubos de ensayo, pipetas, matraces, probetas, vidrios de reloj, embudos y una balanza, los cuales permitieron llevar a cabo mediciones, transferencias y manejo de soluciones de manera precisa y controlada. Para las etapas de extracción y para la construcción del sistema de tren de tratamiento se empleó papel filtro con tamaño de poro número 1. Para la elaboración del tren de tratamiento se utilizaron tubos de PVC con un diámetro de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y tubos de cPVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro. Además, se empleó silicón caliente, malla de fibra de vidrio y adhesivo epóxico tipo “Plastiloka” de la marca Kolaloka.

### 4.2. Reactivos

Todos los reactivos utilizados fueron de grado reactivo (Merck, Darmstadt, Alemania). Para la extracción de saponinas y la prueba adicional con etanol se emplearon metanol al 99.8% ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), hexano ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ) y etanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). En las pruebas preliminares, así como en la determinación del índice de emulsificación y en la cromatografía en capa fina (TLC), se utilizaron aceite vegetal, metanol al 99.8% ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), butanol al 99% ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ ), hexano ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ), tolueno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ), cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), cloruro de metileno ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y placas cromatográficas de sílica gel.

Para la identificación de las saponinas mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) se utilizó una columna capilar HP-88 (30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ) y helio como gas portador. En la etapa de coagulación-flocculación se emplearon agua destilada, colorante azul mezclilla para telas (Mariposa, CDMX, México), ácido clorhídrico (HCl), hidróxido de sodio (NaOH), soluciones para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ). Finalmente, en la fase correspondiente al tren de tratamiento se utilizó agua destilada, agua desionizada, carbón activado, fluoruro de poli vinilideno (PVDF), 1-metil-2-pirrolidona (1MP), polivinilpirrolidona (PVP, PM =

24,000 Da), 5,5-dimetilhidantoína, 3-cloropropiltrióxido de silicio, epiclorhidrina, nanotubos de carbono de pared múltiple modificados (MWNT), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), acetona (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) y etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O).

### **4.3. Métodos**

#### **4.3.1. Extracción**

El procedimiento de extracción de saponinas se tomó del trabajo de Martínez, (2021) con algunas modificaciones. Primero se lavó con agua de la llave la raíz, tallo y hojas de *A. africanus*. Se separó por partes y se cortó la raíz en trozos pequeños, todas las partes se colocaron en papel aluminio y se secaron a 60 °C en un horno (Dynamica) por 24 h. La materia seca se pulverizó y se colocó en un vaso precipitado, se añadió metanol al 70% en una proporción de 25 mL por cada 5 g de muestra, se homogenizó y se dejó reposando por 24 h. Después se filtró usando papel filtro #1. El líquido filtrado se colocó en el horno (Dynamica) a 60 °C para remover el metanol y se evaporó hasta quedar solo polvo. Posteriormente se utilizó un embudo de separación, donde se agregaron 5 g del extracto y 30 mL de agua destilada, después se añadieron 30 mL de hexano y se decantó la fase orgánica. Este procedimiento se repitió cuatro veces, luego se evaporó el solvente a 60 °C en un horno (Dynamica) hasta tener un polvo fino que es el extracto semipurificado.

##### **4.3.1.1. Prueba de etanol**

Se llevó a cabo una prueba adicional con el objetivo de evaluar la posibilidad de extraer saponinas utilizando etanol. Esta metodología fue tomada del estudio de Hernández et al. (2005), en el cual se empleó una solución de etanol al 95% para extraer saponinas de la materia seca, se dejó en reposo durante 24 horas. La relación entre la materia seca y la solución fue de 50 mL por cada 5 g de muestra. Posteriormente, se siguieron los mismos pasos para la semipurificación, descritos anteriormente, hasta lograr la completa evaporación del hexano y la obtención de la materia seca.

#### **4.3.2. Índice de emulsificación (E24)**

La prueba se realizó agregando 2 mL de una solución de saponina de concentración de 4g/L y 2 mL de diferentes solventes (tolueno, hexano, cloroformo, cloruro de

metílico) en un tubo de ensayo. Además, se agregaron dos controles, el primero es una solución de 2 mL de saponinas y 2 mL de agua; y la segunda solución de 2 mL de agua y 2 mL de aceite. Los tubos se agitaron en un vórtex (J.P Selecta) a alta velocidad durante 2 min y luego se dejaron reposar durante 24 h. El resultado del índice de emulsificación (E24) se obtuvo con la relación entre la altura de la solución de saponinas dividida entre la altura total y expresada como porcentaje (Lara-Severino et al, 2017).

#### **4.3.3. Métodos de determinación preliminares**

Se realizaron dos pruebas preliminares para determinar si el extracto contiene saponinas, estas pruebas fueron el método espuma (Test afrosimétrico) y la prueba de peróxido.

Para la primera prueba se colocó un poco del extracto en el tubo, se adicionaron 5 mL de agua destilada, se agitó vigorosamente y finalmente se evaluó la persistencia de espuma a diferentes intervalos de tiempo: de 5 a 20 minutos, de 20 a 25 minutos y por encima de 30 minutos (Rodríguez-Landa, Hernández-Lozano, & Méndez-Ventura, 2020).

Finalmente, para la segunda prueba se colocaron 3 gotas del extracto vegetal diluido en agua destilada en un tubo de ensayo, seguido de la adición de 2 gotas de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). Posteriormente, la mezcla se agitó suavemente. La formación de espuma y su intensidad fueron observadas como criterio cualitativo para indicar la posible presencia de saponinas (Rodríguez-Landa, Hernández-Lozano, & Méndez-Ventura, 2020).

#### **4.3.4. Cromatografía de capa fina (TLC)**

La caracterización de compuestos se realizó mediante cromatografía de capa fina (TLC). Se emplearon placas cromatográficas de sílica gel previamente activadas, utilizando como fase móvil una mezcla de cloroformo:metanol:agua en proporción 65:35:10 (v/v/v). Las muestras fueron aplicadas cuidadosamente en la línea de origen de las placas con ayuda de capilares cromatográficos. Posteriormente, las placas se colocaron en una cámara de desarrollo previamente saturada con la fase móvil, permitiendo el ascenso del disolvente por capilaridad hasta alcanzar la zona

delimitada. Posteriormente las placas se dejaron secar a temperatura ambiente y se procedió a la detección de las manchas mediante exposición a radiación ultravioleta (UV) a 365 nm, registrando los valores de Rf correspondientes (Méndez, Penieres-Carrillo, & Ortega-Jiménez, 2017).

#### **4.3.5. Identificación por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-MS)**

Para identificar las saponinas mayoritarias en el extracto vegetal, se pesaron 50 mg de la muestra (molida y tamizada) y se añadieron 400  $\mu$ L de NaOH (1,5 M, preparado en metanol), siguiendo la metodología de Gómez-Velázquez et al. (2024). La mezcla se agitó en vórtex durante 1 minuto y luego se sumergió en un baño de ultrasonido a 40 kHz durante 5 minutos. A continuación, se añadieron 400  $\mu$ L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1,75 M, preparado en metanol), se agitó de nuevo en vórtex durante 1 minuto y se sumergió en el baño ultrasónico durante 5 minutos más. Se añadieron 800  $\mu$ L de hexano a cada muestra, se agitó en un vórtex durante 30 s y se centrifugó a 10 000 $\times$  g durante 5 min para recuperar el sobrenadante. Este se filtró y se inyectó en el cromatógrafo de gases en una columna capilar HP-88 (30 m 0,25 mm 0,25  $\mu$ m) instalada en un sistema Agilent 7890 GC (Wilmington, DE, USA) junto con un Agilent 5975C EI-SQ MS. Se utilizó helio como gas portador a un caudal constante de 1,5 mL/min. El inyector estaba en modo Split a 250 °C. El programa de temperatura del horno era el siguiente: temperatura inicial de 50 °C (mantenida durante 1 minuto), aumentó a 175 °C a 15 °C/min, luego aumentó a 210 °C a 1 °C/min. La ionización electrónica (EI) se realizó a 70 eV, y el rango de escaneo de masa fue m/z 50-1100. La adquisición y el procesamiento de datos se realizaron utilizando el software Agilent ChemStation (Gómez-Velázquez et al., 2024).

#### **4.3.6. Coagulación-flocculación**

La prueba se realizó en un agitador de propelas o “Prueba de jarras”, el procedimiento se tomó del trabajo de Zamudio (2013). Se agregaron diferentes concentraciones de saponina a 1 L de agua destilada con diferentes concentraciones de colorante en un vaso precipitado, se inició con agitación a 100 rpm durante tres minutos para el proceso de coagulación. Para el proceso de

floculación se agitó a 20 rpm durante 15 minutos, después se dejó sedimentar durante 20 min sin agitación, con las paletas arriba. Finalmente se dejó sedimentar durante 1 h en un cono Imhoff para medir la cantidad de lodos generados. Para el experimento se utilizaron 3 concentraciones de saponina: 300, 500 y 700 mg/L; en cada concentración se utilizaron diferentes concentraciones de colorante: 300, 400, 500 mg/L, además se modificó el pH a bajo, medio y alto. Se empleó cloruro de hierro (III) como control, aplicándolo en las mismas concentraciones de saponina, con las mismas concentraciones de colorante, manteniendo el pH.

#### 4.3.7. Diseño experimental

El diseño experimental empleado corresponde a un arreglo factorial  $3^3$ , como se mencionó previamente, el cual consideró tres niveles para cada uno de los factores evaluados: concentración de saponina, concentración de colorante y pH en un litro de agua destilada.

Cuadro 1. Diseño experimental

Saponina	Colorante	pH
300 mg	300 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
300 mg	400 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
300 mg	500 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
500 mg	300 mg	3
		6
		9

Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
500 mg	400 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
500 mg	500 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
700 mg	300 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
700 mg	400 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-
700 mg	500 mg	3
		6
		9
Control ( $\text{FeCl}_3$ )		-

#### 4.3.8. Tren de tratamiento

El experimento de tren de tratamiento se dividió en tres secciones: adsorción, filtración y microfiltración, tomando en cuenta el trabajo de Godínez (2024). Para la primera sección se empleó un tubo de PVC de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de diámetro, del cual se cortaron tres piezas de 21.5 cm de longitud. En el caso de las secciones de filtración y microfiltración, se utilizaron tubos de CPVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro y 21.5 cm de longitud. Cada sección fue perforada con 16 orificios distribuidos en 4 filas, utilizando una broca de 1/8 de pulgada.

#### **4.3.8.1. Adsorción**

Para este módulo se utilizó carbón activado, este se lavó con agua destilada para eliminar cualquier polvo suelto que pudiera contener y se secó en un horno (Dynamica) a 60 °c por 24 h. Posteriormente, se colocó dentro de una sección de tubo PVC, para contener el material, se selló la entrada y salida con malla de fibra de vidrio, utilizada en las otras secciones.

#### **4.3.8.2. Filtración**

Para este módulo al tubo de CPVC se tapó la salida con plastiloka, después se pegó con silicona caliente la malla de fibra de vidrio con medidas de ancho 21 cm de ancho y 44 cm de largo. Posteriormente se insertó al tubo de PVC y se adaptó en un extremo del tubo un anillo de plastiloka en la entrada, esto para que el agua entre primero al tubo de adentro, pase por los orificios y la membrana.

#### **4.3.8.3. Microfiltración**

##### **4.3.8.3.1. Funcionalización de nanotubos**

Inicialmente se purificaron los MWNTs, se agregaron a una solución acuosa de ácido clorhídrico (HCl) 0.5 M durante 1 h. Despues se filtraron con papel filtro #1, se lavaron con agua destilada y se dejaron secar a 40 °C. Despues los nanotubos fueron oxidados usando ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) a 160 °C durante 6 h. Posteriormente, se lavaron con agua y etanol, y se dejaron secar a 40 °C en un horno (Dynamica).

Se realizó la síntesis de 3-glicidil-5, 5-dimetilhidantoína para poder hacer funcionales los nanotubos. Primero se disolvieron 0.05 mol de 5-dimetilhidantoína y 0.05 mol de hidróxido de sodio (NaOH) en 40 mL de agua desionizada, se agitó durante 10 min a temperatura ambiente. Despues, se agregaron 0.05 mol de epiclorhidrina a la mezcla y se agitó hasta que se volviera transparente la solución, aproximadamente 20 min. El agua se removió de la mezcla en un horno (Dynamica) a 60 °C durante 4 h. Se agregaron 50 mL de acetona y se pasó por papel filtro #1 para eliminar el subproducto de NaCl. Finalmente se utilizó el embudo de decantación para obtener la fase oleosa fue 3-glicidil-5,5-dimetilhidantoína,

Para funcionalizar los nanotubos, se dispersaron en una solución de 3-glicidil-5, 5-dimetilhidantoína al 10% con NaOH al 1%, durante 30 min a 60 °C. Despues se

filtraron en papel filtro #1, se curaron primero a 60 °C durante 30 min y luego a 105 °C durante 10 min. Los nanotubos se sumergieron en una solución de 3-cloropropiltrietoxisilano al 6% en agua destilada durante 15 min, se filtraron y se curaron a 90 °C durante 1 h para obtener nanotubos funcionalizados (N-Si-MWNTs).

#### **4.3.8.3.2. Preparación de membranas híbridas de PVDF**

La solución se preparó con % peso/peso, 16% de PVDF, 2% PVP, 0.3% de N-Si-MWNTs y 81.7% de 1MP como solvente, se homogeneizó hasta que se obtuvo una mezcla sin grumos. La membrana se fabricó por la vía de NIPS por sus siglas en inglés (Non-solvent Induced Phase Separation) a  $25 \pm 1$  °C. Se usó una espátula para esparcir la solución en películas delgada sobre papel encerado, y estas se sumergieron en agua desionizada como el líquido de coagulación. Luego, se sumergieron por 24 h para remover los solventes residuales.

#### **4.3.8.3.3. Acomodo**

Para este módulo, al tubo de CPVC se tapó la salida con se pegó plastiloka; después, con silicon caliente, se fijó a la malla de fibra de vidrio, con medidas de ancho 21 cm de ancho y 44 cm de largo. Dentro de la malla se colocó la membrana realizada. Posteriormente, se insertó en el tubo de PVC y se adaptó en un extremo del tubo un anillo de plastiloka en la entrada, esto para que el agua entre primero al tubo de adentro, pase por los orificios y pase a la salida.

#### **4.3.9. Acoplamiento**

En primera instancia, se llevó a cabo la prueba de coagulación-flocculación utilizando distintas concentraciones de saponinas y colorante como se comentó anteriormente. Posteriormente, se aplicó la prueba de Demanda Química de Oxígeno (DQO) con el objetivo de evaluar la disminución del colorante en cada tratamiento; para esto, se realizó previamente una curva de calibración del colorante y del extracto de saponina para poder generar el porcentaje de remoción.

A partir de estos resultados, se seleccionaron las concentraciones que presentaron los mejores rendimientos para repetir el ensayo, y posteriormente se acopló al tratamiento optimizado al tren de tratamiento. Finalmente, el efluente tratado se

sometió nuevamente a la prueba de DQO, con el propósito de analizar la eficiencia global en la remoción del colorante.

El tren de tratamiento se conformó por tres etapas consecutivas: adsorción, filtración y, finalmente, microfiltración. Las secciones fueron interconectadas mediante codos de PVC de 90° (Godínez, 2024). Para impulsar el flujo, se empleó una bomba de agua equipada con un regulador de velocidad, lo que permitió mantener un caudal lento y asegurar el paso adecuado del agua a través de cada módulo.

Como se muestra en la Figura 3, la muestra de agua tratada se colocó en un recipiente con una bomba de agua conectada a un regulador de velocidad, lo que permitió mantener un flujo lento, tal como se mencionó anteriormente. Una manguera condujo el agua hacia el tren de tratamiento, cuyas uniones fueron selladas con cinta aislante para facilitar su manejo y limpieza de las secciones. Finalmente, el agua tratada fue recolectada en otro recipiente. Para esta prueba, el agua se hizo pasar tres veces por el tren de tratamiento con el fin de evaluar la disminución del colorante, turbidez y valor de DQO.



Figura 3. Configuración del acoplamiento del tren de tratamiento.

#### 4.3.10. Análisis de la disminución de turbidez y color

Se realizó la determinación de la turbidez del agua, se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS (Thermo scientific) configurado a una longitud de onda de 750 nm. Este valor se seleccionó debido a que se encuentra en el límite superior del espectro visible y permite reducir la interferencia causada por la coloración de la muestra, favoreciendo la detección de la dispersión producida por partículas en suspensión. Previo a las mediciones, se realizó la calibración del instrumento empleando un blanco con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados. Posteriormente, se registraron los valores de absorbancia a 750 nm, los cuales presentan una correlación directa con la concentración de sólidos suspendidos en el agua,

índicador fundamental de la turbidez (Avila-Camacho et al., 2021; Ramos-Cortéz, 2021).

Se realizó una prueba mediante espectrofotometría UV-Vis para determinar la disminución del color después del tren de tratamiento. A las muestras se les aplicó un barrido espectral con el objetivo de identificar la longitud de onda de mayor absorbancia, encontrándose un pico característico a 290 nm. Posteriormente, las muestras tratadas con este tren fueron analizadas a esa longitud de onda y comparadas con el valor inicial obtenido al finalizar la prueba de coagulación-floculación.

#### **4.3.11. Evaluación de la aptitud del agua tratada para riego**

Se germinaron semillas de tomate en una maceta con tierra común. Una vez alcanzada la etapa de plántula, se seleccionaron ocho ejemplares y se trasplantaron individualmente en macetas transparentes separadas para la prueba. De estas, cuatro macetas se destinaron como grupo control, las cuales fueron regadas con agua potable proveniente del grifo, mientras que las otras cuatro macetas se regaron con el agua tratada obtenida al final del tren de tratamiento. Se regaron cada dos a tres días, observando la humedad de la maceta. El crecimiento de las plántulas se registró semanalmente. De manera complementaria, se evaluaron características cualitativas relacionadas con el estado fisiológico de las mismas, considerando el color y la salud de la planta, tomando en cuenta la marchitez.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Extracción saponinas

Al realizar el proceso de extracción de saponinas, se obtuvo un rendimiento de 5.6–8% en peso del extracto considerando la materia seca de la planta, esta variación es debido a que se realizaron varias extracciones para las pruebas. Este valor indica la proporción de saponina recuperada respecto al extracto seco total y se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{\text{Masa de saponina (Extracto)}}{\text{Masa materia seca de la planta}} \times 100$$

Los resultados reflejaron que el método de extracción empleado permitió recuperar una cantidad significativa de saponinas a partir del material vegetal analizado.

#### 5.1.1. Prueba etanol

La prueba no tuvo éxito, debido a que, al realizar la extracción de la materia seca triturada con etanol, no se observó un extracto visible previo al proceso de semipurificación. Tras la filtración y evaporación del etanol, se obtuvo una cantidad muy reducida de materia seca. Posteriormente, al efectuar la extracción líquido-líquido con hexano y evaporarlo, se obtuvo una sustancia de consistencia pegajosa y color verde (Figura 4), lo que impidió realizar las pruebas subsecuentes.



Figura 4. Resultado de extracción de saponinas con etanol.

## 5.2. Índice de emulsificación

El Cuadro 2 presenta los resultados de la prueba de emulsificación (E24), en la cual se evaluó la capacidad de diferentes solventes orgánicos para formar emulsiones en presencia de extracto con saponinas. Esta prueba se realizó una sola vez debido a la cantidad de la muestra era limitada para las pruebas de coagulación-floculación.

Cuadro 2. Resultados de E24.

Prueba	Índice de emulsificación
<i>Control 1(Saponina-agua)</i>	Sin emulsión
<i>Control 2 (Agua-aceite)</i>	Sin emulsión
<i>Tolueno</i>	85%
<i>Hexano</i>	95%
<i>Cloroformo</i>	5.2%
<i>Cloruro de metileno</i>	35.2%

Los controles (saponina-agua y agua-aceite) no mostraron formación de emulsiones, lo cual confirma que ni el agua por sí sola ni la mezcla agua-aceite pueden estabilizar emulsiones sin la presencia de un agente emulsionante activo. En contraste, al emplear tolueno se obtuvo un índice de emulsificación de 85%, lo que evidencia una interacción favorable entre este solvente y las saponinas.

Se observó que el hexano presentó la mayor capacidad de emulsificación (95%), indicando una fuerte afinidad de las saponinas por este solvente apolar y su eficacia en la estabilización de emulsiones. Por otro lado, el cloroformo mostró un índice muy bajo (5.2%), lo que sugiere que la naturaleza de este solvente no favorece la formación de emulsiones bajo las condiciones evaluadas. Finalmente, el cloruro de metileno alcanzó un valor intermedio (35.2%), reflejando una capacidad moderada de emulsificación.

En conjunto, estos resultados (Figura 5) ponen de manifiesto que la eficacia emulsionante de las saponinas depende de la naturaleza química del solvente con el que interactúan. Los valores elevados obtenidos con hexano y tolueno confirman

que las saponinas actúan como agentes tensioactivos capaces de estabilizar emulsiones en medios predominantemente apolares, mientras que solventes como el cloroformo presentan una compatibilidad limitada para este tipo de interacciones.

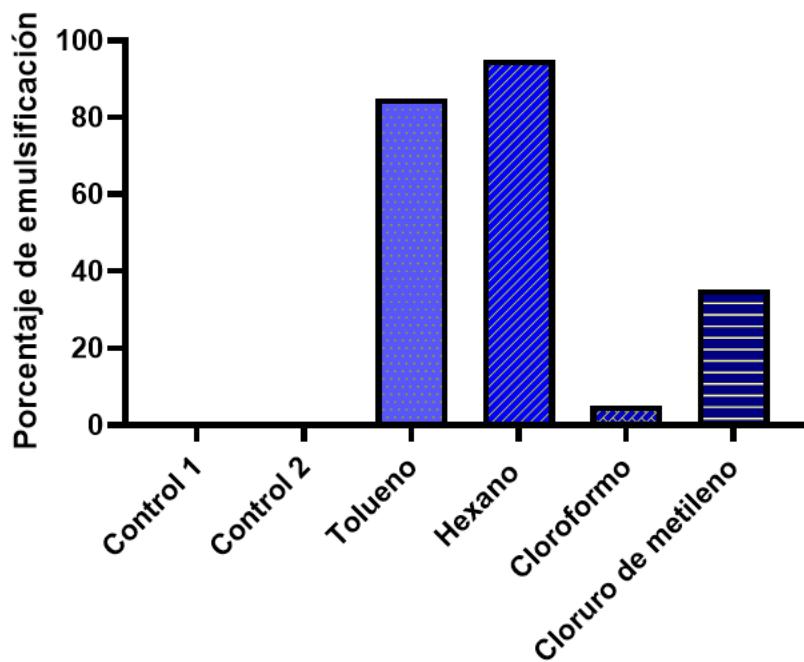


Figura 5. E24 del extracto de saponina.

### 5.3. Métodos de determinación preliminares

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de las pruebas, las cuales resultaron positivas y demuestran la presencia de saponinas en el extracto. La Figura 6 muestra el método de espuma y se evidencia la formación de espuma tras 30 minutos de agitar el tubo de ensaye. En la figura 7 se observa la espuma de la prueba de peróxido como el resultado de la interacción de la saponina con este compuesto.

Cuadro 3. Resultados de las pruebas preliminares.

Prueba	Resultado
Método de espuma	Positivo
Prueba de peróxido	Positivo



Figura 6. Resultados del método de espuma.



Figura 7. Resultado de prueba de peróxido.

#### 5.4. Cromatografía de capa fina (TLC)

En la cromatografía de capa fina realizada para la detección de saponinas, se obtuvo un valor de  $R_f = 1$ , lo que indica que la mancha migró junto con el frente del disolvente (Figura 8). Este resultado se interpreta como una consecuencia de la alta solubilidad de las saponinas en el sistema de elución empleado y de su baja afinidad por la fase estacionaria (sílica gel).

Las saponinas son compuestos de naturaleza anfipática, ya que poseen una fracción polar (glucídica) y una fracción no polar (sapogenina) (Góngora-Chi et al.,

2023). Dependiendo del disolvente utilizado, pueden comportarse como moléculas altamente móviles en la fase móvil. En este caso, el disolvente empleado presentó una polaridad adecuada para solubilizarlas casi por completo, lo que provocó que las moléculas no quedaran retenidas en la fase estacionaria y recorrieran la totalidad de la placa.



Figura 8. Resultado de TLC. El carril 1 (izquierda) contiene la sustancia de referencia (estándar), y el carril 2 (derecha) contiene la muestra del extracto.

### 5.5. Identificación de saponinas por CG-MS

En la figura 9 muestra el cromatograma TIC (Total Ion Chromatogram) de gases masa del extracto de saponinas. En el eje X se muestra el tiempo de retención y en el eje Y muestra la abundancia (intensidad del ion total). El pico principal se observó a los 29.778 minutos, y su espectro de masas sugiere la presencia de una sapogenina de tipo hederagenina u oleanólico, posiblemente derivada de una saponina desglucosilada. Esta interpretación es consistente con el hecho de que el extracto fue sometido a un proceso de hidrólisis destinado a eliminar los azúcares,

favoreciendo así la liberación de las agliconas característicos de este tipo de compuestos.

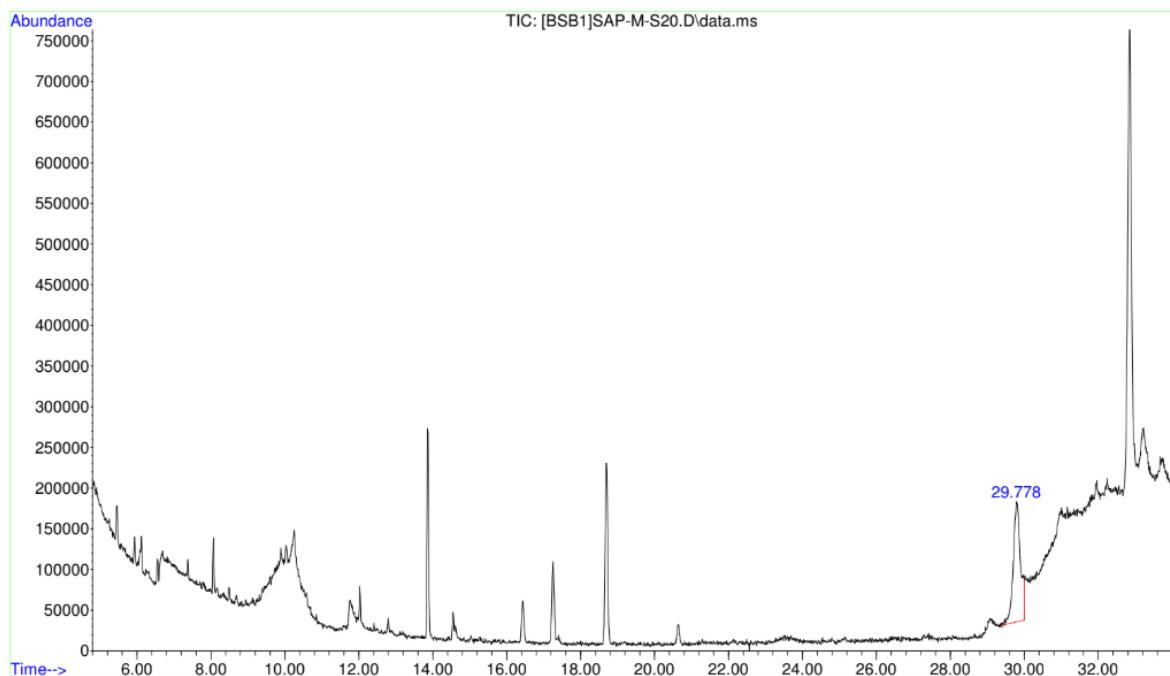


Figura 9. Cromatograma de gases-masas de la muestra.

En la figura 10 se muestra el espectro de masas del pico principal de 29.778 min del cromatograma de gases. En el eje X se muestran las unidades de m/z (masa/carga) y en eje Y se presenta Abundancia relativa.

La retención tardía en la columna sugiere una alta hidrofobicidad del compuesto, por lo que los iones observados en m/z 334, 387, 249 y 190 podrían corresponder a triterpenos oxigenados o a sapogeninas (Mahato & Nandy, 1991). En el espectro mostrado, el fragmento base es m/z 387, que podría ser el ion molecular de una sapogenina derivada  $7\alpha,25$ -Dihydroxycholesterol ( $C_{27}H_{46}O_3$ ) o similar (*National Center for Biotechnology Information*, 2025). Esto resulta consistente con su origen derivado del colesterol, cuya estructura esteroidal guarda similitud con la de las saponinas reportadas para *Agapanthus africanus*, tal como se señaló en los antecedentes. También es posible que el compuesto corresponda a un triterpeno degradado, sapogenina o aglicona, ya que muchas sapogeninas tienen pesos

moleculares entre 414 y 456 g/mol, y durante su fragmentación o perdida de agua producen iones en el rango de 380–420 m/z.

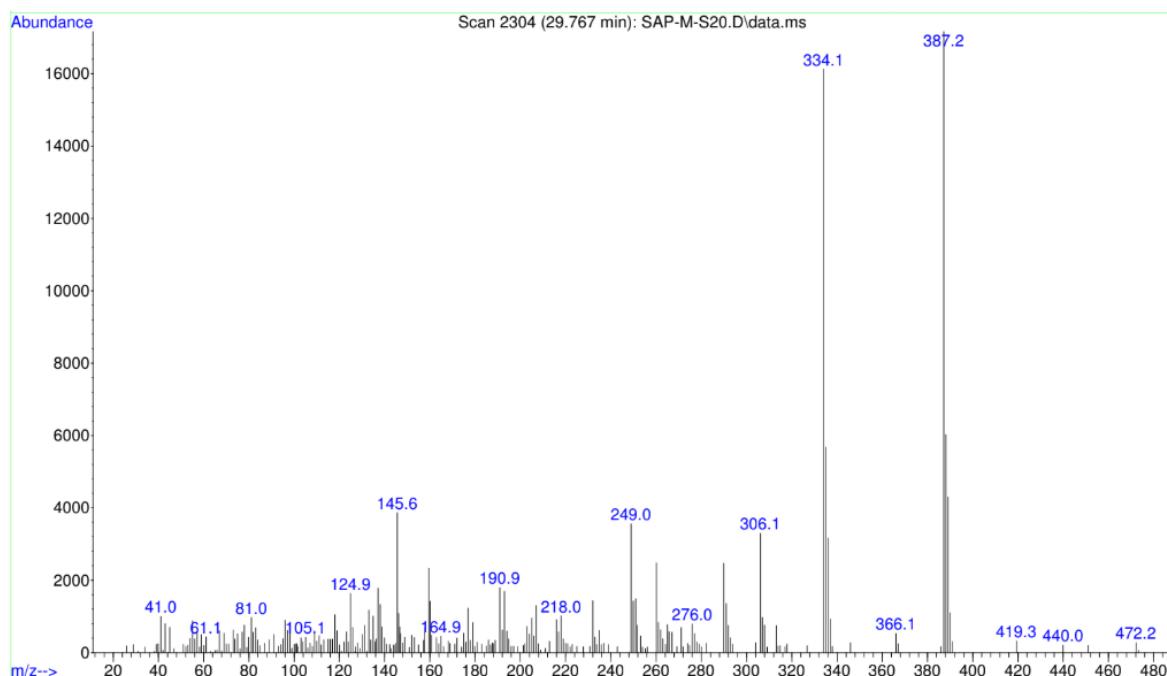


Figura 10. Espectro de masas de la muestra correspondiente al pico en 29.778 min.

En la figura 11 se observa el compuesto arrojado por el programa Agilent ChemStation, que muestra un derivado pregnanoide (22R)-6 $\alpha$ ,11 $\beta$ ,21-Trihydroxy-16 $\alpha$ ,17 $\alpha$ -propylmethylenedioxypregna-1,4-diene-3,20-dione, sin embargo, las diferencias en la fragmentación y el contexto fitoquímico indican que este es muy probablemente un falso positivo, ya que este compuesto tiene un esqueleto esteroide, en cambio la saponina mayoritaria de *A. africanus* es de tipo espirostano (Siddiqui, 2019).

Finalmente, aunque el software arrojó resultados con un nivel de precisión limitado, estos sugieren que el extracto presenta características compatibles con la presencia de saponinas. No obstante, se considera necesario realizar identificaciones adicionales mediante el uso de un estándar analítico, ya que las bases de datos no especializadas o desactualizadas pueden complicar la identificación de compuestos específicos provenientes de plantas como *Agapanthus africanus*.

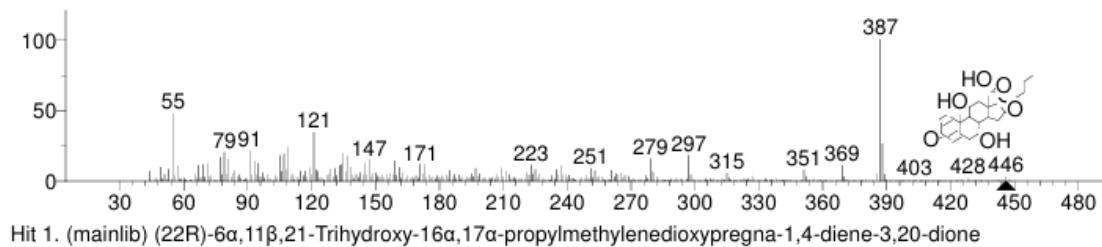


Figura 11. Compuesto con mayor similitud arrojado por el software. (22R)-6 $\alpha$ ,11 $\beta$ ,21-Trihydroxy-16 $\alpha$ ,17 $\alpha$ -propylmethylenedioxypregna-1,4-diene-3,20-dione.

### 5.6. Coagulación-flocculación

El Cuadro 4 presenta los resultados del porcentaje de remoción obtenidos en la prueba de coagulación-flocculación. Asimismo, se incluyen los valores de turbidez y la medición del volumen de lodos, expresado en mL/L. Las curvas de calibración obtenidas para el colorante y la saponina presentaron coeficientes de correlación de  $R^2=0.989$  y  $R^2=0.985$ , respectivamente, lo que indica una buena linealidad y precisión en ambos análisis. En las Figuras 12,13 y 14 se muestran los resultados en forma de gráficas para una menor, lo que facilita su comparación. Estas pruebas se realizaron solo en una ocasión debido a la cantidad de reactivos y desperdicios generados.

Los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se presentan en términos de porcentaje de remoción de contaminantes, con el objetivo de facilitar el análisis comparativo de la eficiencia de los tratamientos aplicados. De acuerdo con el procedimiento estándar descrito por Romo (2001) y con lo reportado por Muhammin et al. (2022), la determinación de la DQO mediante espectrofotometría UV-Vis constituye un método confiable y preciso para la evaluación de aguas residuales, al presentar elevados coeficientes de determinación en las curvas de calibración. Los valores de DQO, normalmente se expresan en mg O<sub>2</sub>/L, estos se obtuvieron a partir de la medición de la absorbancia a una longitud de onda entre 600 y 620 nm, la cual se relaciona directamente con la concentración del agente oxidante remanente. Este enfoque permite una evaluación eficiente y reproducible de la carga contaminante del efluente tratado.

Cuadro 4. Resultados de las pruebas de jarras, turbidez y lodos.

Saponina	Colorante	pH	Porcentaje	Absorbancia	Lodos mL/L
			remoción (DQO)	750 nm (Turbidez)	
300 mg	300 mg	3	-	0.016	Menos de 0.1
		6	39.85%	0.015	Menos de 0.1
		9	8.04%	0.010	Menos de 0.1
		-	68.18%	0.013	7.5
Control (FeCl <sub>3</sub> )	400 mg	3	-	0.022	Menos de 0.1
		6	-	0.017	Menos de 0.1
		9	-	0.017	Menos de 0.1
		-	83.92%	0.018	7
300 mg	500 mg	3	16.07%	0.026	0.5
		6	4.53%	0.031	Menos de 0.1
		9	28.89%	0.023	Menos de 0.1
		-	60.26%	0.020	10
500 mg	300 mg	3	19.40 %	0,015	0.75
		6	51.22 %	0.014	0.7
		9	35.31 %	0.014	Menos de 0.1
		-	22.73%	0.030	7
Control (FeCl <sub>3</sub> )	400 mg	3	38.45%	0.019	1
		6	100 %	0.017	1
		9	61.68%	0.017	1
		-	71.42%	0.032	4.5
500 mg	500 mg	3	10.94%	0.023	0.2
		6	-	0.022	0.75
		9	-	0.012	0.1
		-	80.77%	0.048	10
700 mg	300 mg	3	-	0.022	1
		6	69.4%	0.019	1

		9	-	0.019	0.1
<b>Control (FeCl<sub>3</sub>)</b>		-	100%	0.033	5
<b>700 mg</b>	400 mg	3	18.81%	0.025	1
		6	42.03%	0.017	0.5
		9	-	0.015	Menos de 0.1
<b>Control (FeCl<sub>3</sub>)</b>		-	100%	0.045	5
<b>700 mg</b>	500 mg	3	4.53%	0.027	0.75
		6	-	0.022	0.3
		9	4.53%	0.020	0.6
<b>Control (FeCl<sub>3</sub>)</b>		-	52.56%	0.047	10

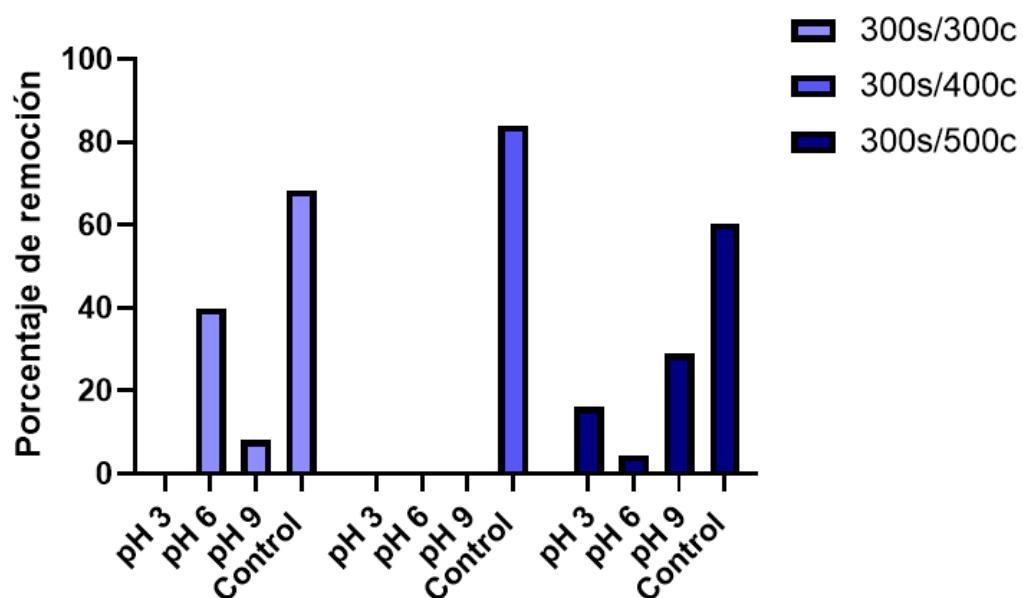


Figura 12. Resultados para la concentración de coagulante a 300 mg/L.

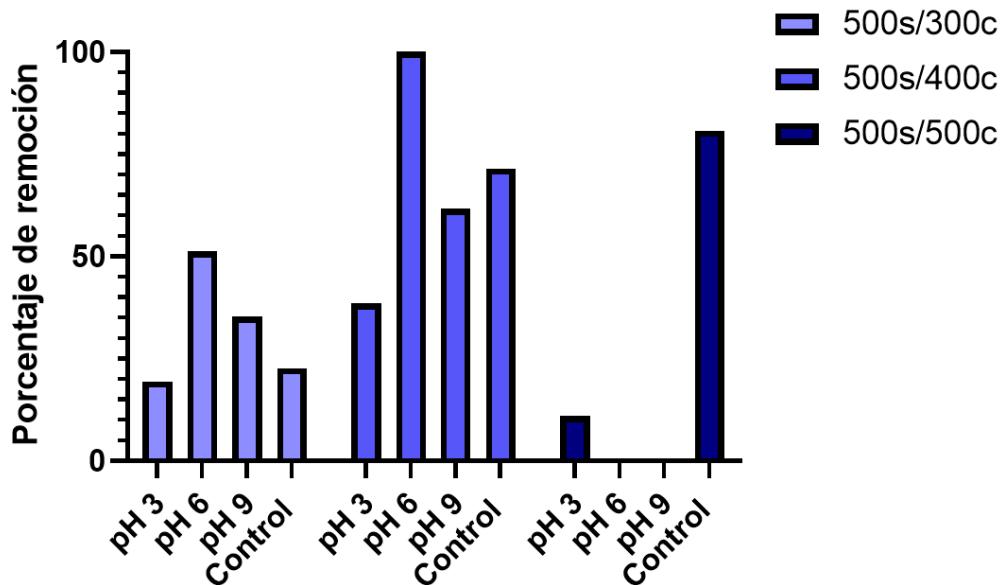


Figura 13. Resultados para la concentración de coagulante a 500 mg/L.

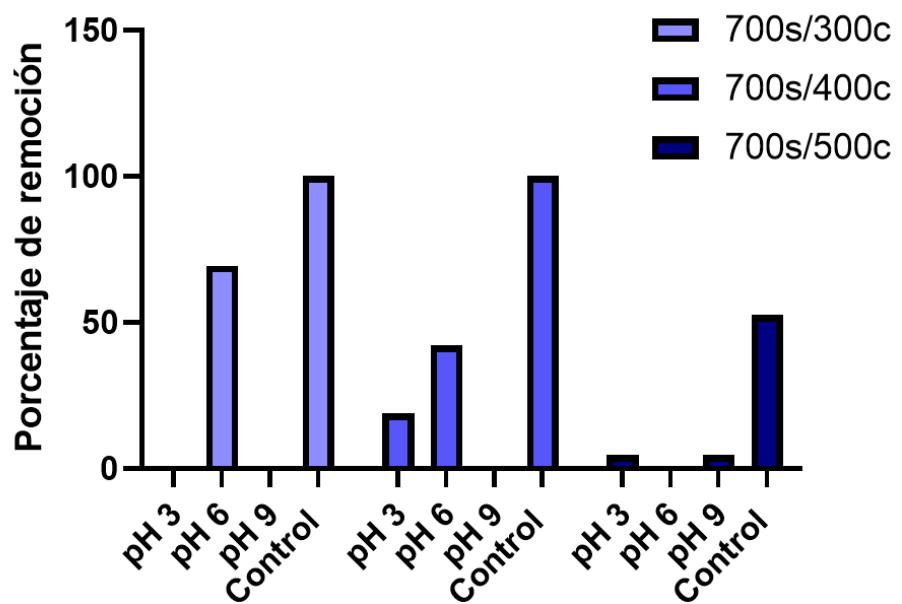


Figura 14. Resultados para la concentración de coagulante a 700 mg/L.

Las condiciones seleccionadas durante esta prueba correspondieron a la condición de 500 mg de saponina, 400 mg de colorante y pH 9, destacada en color verde en Cuadro 4. Estas condiciones se eligieron, debido a que como se observa en la Figura 13, la condición de 500 mg de extracto de saponina presentó una de las mejores eficiencias de remoción en comparación con las demás concentraciones evaluadas. Bajo estas condiciones, se alcanzó un porcentaje de remoción del

61.68%. Sin embargo, el nivel de eliminación obtenido no fue suficiente para que el agua tratada cumpliera con los parámetros requeridos para su descarga o reincorporación al flujo hídrico, por lo que debe tratarse de otra manera. En contraste, el ensayo realizado a pH 6 mostró una remoción del 100%, por lo que no fue necesario someter dicha muestra a un tratamiento adicional por lo que no se tomó para la prueba de tren de tratamiento.

En esta prueba se observa una diferencia notable en la generación de lodos entre el control, cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) y el tratamiento con extracto de saponinas. El extracto de saponinas produce una cantidad mínima de lodos, aproximadamente 1 mL/L o menos, lo que facilita su disposición final. En contraste, las sales inorgánicas generan una mayor cantidad de residuos cuya eliminación resulta más compleja. Además, de manera cualitativa, al finalizar la prueba de coagulación-floculación con cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ), el agua tratada adquirió una tonalidad amarillenta y presentó valores de absorbancia más altos en el espectrofotómetro, lo que podría indicar la presencia de contaminantes residuales no perceptibles a simple vista o de difícil separación (Hadadi et al., 2022).

En el Cuadro 5 se presenta una comparación entre coagulantes naturales, inorgánicos y combinados, junto con los resultados obtenidos en el presente estudio. En general, todos los tipos de coagulantes mostraron desempeños favorables en la remoción de contaminantes; no obstante, como se señaló previamente, la generación de lodos constituye un factor crítico en los procesos de coagulación-floculación. Es indispensable asegurar que dichos lodos no sean tóxicos ni representen un riesgo adicional de contaminación para el agua tratada, especialmente en sistemas que manejan colorantes persistentes. Cabe destacar que los valores reportados en la tabla corresponden a tratamientos aplicados tanto a aguas contaminadas con colorantes como a procesos de clarificación, lo cual permite contextualizar los resultados obtenidos en este proyecto dentro de un marco comparativo amplio.

Cuadro 5. Comparación de la eficiencia de los coagulantes.

Coagulantes naturales	Mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos (SS) o DQO	Referencias
<b>Saponina</b>	100% (DQO)	(Proyecto actual)
<b>Quitosano</b>	82.5% - 94% (SS)	(Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019; Labastida-Núñez et al., 2023)
<b><i>Moringa oleífera</i></b>	65.8% (DQO)	(Desta & Bote, 2021)
<b><i>Cassia obtusifolia</i></b>	86.9 % (SS) - 36.2% (DQO)	(Bravo-Gallardo, 2017)
<b>Naturales + inorgánicos</b>		
<b><i>Moringa oleífera</i> + sulfato de aluminio</b>	99.5% (SS)	(Verbel et al., 2017)
<b>Cloruro polialuminio férrico + sílice de arroz</b>	89.7% (DQO) - 92% (SS)	(Mohamed & Alfalous, 2020)
<b>Inorgánicos</b>		
<b>Cloruro de hierro</b>	100% (DQO)	(Proyecto actual)
<b>Sulfato de aluminio</b>	42% (DQO)	(Al-Abdi & Jaeel, 2023)
<b>Cloruro de polialuminio</b>	23.7% (SS) - 40% (DQO)	(Zaharia, Musteșei, & Afrăsinei, 2024)
<b>Cloruro de magnesio - óxido de polietileno</b>	92% (DQO)	(Zaharia, Musteșei, & Afrăsinei, 2024)

### 5.7. Tren de tratamiento

La Figura 15 muestra las distintas partes que conforman el tren de tratamiento, así como la modificación realizada a los tubos de CPVC. Cada una de las secciones del tren cuenta con una entrada (E) y una salida (S), que indican, respectivamente, el ingreso y egreso del agua. La Figura 16 muestra la disposición de la membrana de filtración dentro del tubo de PVC en la sección correspondiente a la filtración y microfiltración. La Figura 17 muestra el tren de tratamiento completamente ensamblado y listo para su operación.



Figura 15. Componentes requeridos para el tren de tratamiento.



Figura 16. Sección de Filtración.



Figura 17. Tren de tratamiento completo.

## 5.8. Acoplamiento

El tren de tratamiento presentó un desempeño exitoso (Cuadro 6), alcanzando una remoción final de DQO del 71.44%, lo que representa un incremento del 9.77% respecto al valor obtenido únicamente mediante la prueba de coagulación–floculación. Este comportamiento se corroboró mediante las mediciones realizadas por espectrofotometría, los resultados se muestran con mayor claridad en la Figura 18.

Cuadro 6. Resultados de la prueba DQO después del tren de tratamiento, representado en porcentaje.

DQO	Absorbancia 600 nm	Porcentaje de remoción
Coagulación-Floculación	0.179	61.67%
1ra vuelta T-T	0.166	68.93%
2da vuelta T-T	0.162	71.16%
3ra vuelta T-T	0.162	<b>71.44%</b>

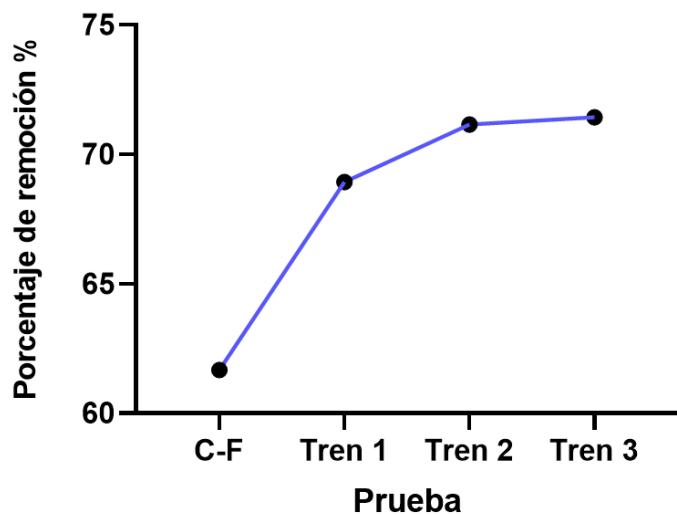


Figura 18. Gráfica del aumento de la remoción del acoplamiento.

Tomando en cuenta las normas NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-CCA-O14-ECOL/1993 en anexos los resultados de la demanda química de oxígeno permisibles son 240 mg/L y 210 mg/L respectivamente para valores instantáneos.

El resultado final fue una remoción del 71.44% tomando en cuenta que el valor inicial de concentración del colorante 500 mg/L, al final del proceso la DQO fue de 142.8 mg/L. Lo que muestra que los valores están dentro de los parámetros necesarios.

### 5.9. Análisis de la disminución de turbidez y color después del acoplamiento

En el Cuadro 7 se presentan los porcentajes de remoción de turbidez tras someter el agua al tren de tratamiento en tres ciclos, se observó un incremento en la eficiencia hasta alcanzar un 26.67% en comparación con el valor obtenido al finalizar la coagulación-floculación. De manera similar, el Cuadro 8 muestra los porcentajes de remoción de color, donde después de tres ciclos por el tren de tratamiento se logró un 27.03% adicional respecto a la muestra posterior a la coagulación-floculación. Estos resultados se ilustran en las Figuras 19 y 20, lo que permite apreciar de forma más clara la tendencia en la disminución de la turbidez y del color.

Cuadro 7. Resultados de la remoción de turbidez del acoplamiento.

<b>Turbidez</b>	<b>Absorbancia 750 nm</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
<i>Coagulación-Floculación</i>	0.045	Valor inicial
<i>1ra vuelta T-T</i>	0.040	11.11
<i>2da vuelta T-T</i>	0.038	15.56
<i>3ra vuelta T-T</i>	0.033	26.67

Cuadro 8. Resultados de la remoción de color del acoplamiento.

<b>Color</b>	<b>Absorbancia 290nm</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
<i>Coagulación-Floculación</i>	0.703	Valor inicial
<i>1ra vuelta T-T</i>	0.649	7.68
<i>2da vuelta T-T</i>	0.592	15.79
<i>3ra vuelta T-T</i>	0.513	27.03

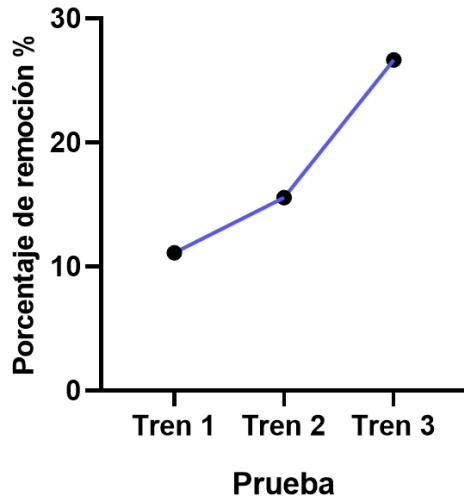


Figura 19. Aumento de remoción de turbidez del acoplamiento.

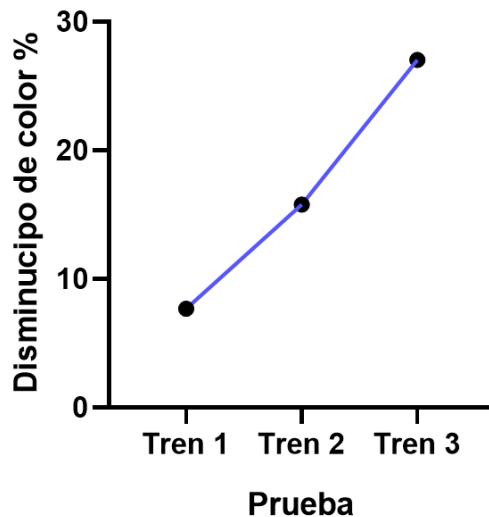


Figura 20. Aumento de remoción de color del acoplamiento.

Este trabajo abre la posibilidad de desarrollar investigaciones adicionales, ya que la configuración del tren de tratamiento permite modificar el orden de sus tres secciones, lo que podría evaluarse en función de los resultados obtenidos en las pruebas de coagulación-floculación.

### 5.10. Evaluación de la aptitud del agua tratada para riego

En la Figura 21 se presenta la gráfica del crecimiento de las plántulas de tomate regadas con agua convencional, utilizada como control, en comparación con aquellas que recibieron riego con agua tratada. En la Figura 22 se muestra la comparación del crecimiento de las plántulas control y el agua tratada.

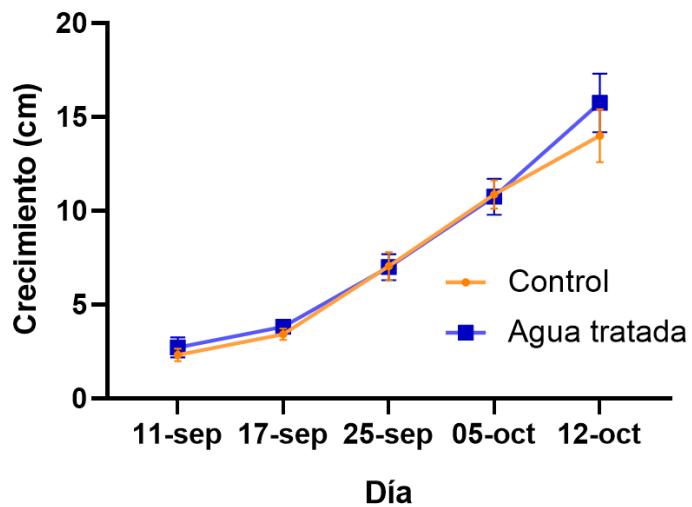


Figura 21. Comparación de crecimiento de las plántulas control y con agua tratada. El gráfico representa la media de 4 réplicas  $\pm$  la desviación estándar.



Figura 22. Plántulas de tomate el último día de la toma de crecimiento. A la izquierda se encuentra un control y en la derecha con agua tratada.

Cuadro 9. Comparación del color y salud general de las plántulas control y con agua tratada.

Día	Control	Agua tratada
11-sep	Color verde claro y salud general correcta, sin signos de marchitez	Color verde claro y salud general correcta, sin signos de marchitez
17-sep	Color verde brillante y salud correcta con un tallo fuerte	Color verde brillante y salud correcta con un tallo fuerte
25-sep	Color verde brillante y brotaron hojas reales	Color verde brillante y brotaron hojas reales
05-oct	Color verde brillante, con un tallo un poco inclinado y sin firmeza	Color verde brillante y gran crecimiento
12-oct	Color verde brillante y varias hojas reales	Color verde brillante, varias hojas reales y gran crecimiento

Las macetas correspondientes al control y aquellas regadas con agua tratada no presentaron diferencias significativas en cuanto al crecimiento ni en sus características generales (Cuadro 9). En ambos casos, las plántulas mostraron un buen estado de salud, con un color verde óptimo, sin hojas secas ni signos de intoxicación, aunque en el control se observó una ligera inclinación de las hojas. Todas las plántulas desarrollaron sus hojas verdaderas; además, las regadas con agua tratada presentaron tallos firmes y sin torceduras.

Se demuestra que la prueba de riego con el agua tratada en cultivos in vitro tuvo resultados positivos respecto a su posible uso como agua de riego. De manera cualitativa, no se observaron diferencias significativas en el crecimiento ni en el estado de salud de las plántulas en comparación con el control, por lo que se infiere que el agua obtenida tras el acoplamiento de los tratamientos podría considerarse

segura, al menos parcialmente, para su aplicación en actividades agrícolas. Se podrían realizar estudios adicionales de suelo para confirmar que el riego con el agua tratada no provoca efectos adversos sobre las plantas.

### 5.11. Comparación final

La Figura 23 muestra un resumen de los resultados de los porcentajes de remoción de DQO, color y turbidez obtenidos antes y después del paso por el tren de tratamiento. En el caso del color y la turbidez, únicamente se reportan los valores posteriores al tratamiento, ya que los valores iniciales corresponden directamente a los obtenidos tras la coagulación-floculación. La integración de ambos procesos incrementa de manera significativa la eficiencia global del sistema. De forma similar, los valores de turbidez y el color alcanzan después del tren, dan remoción de 27% tomando en cuenta como valor inicial tras la prueba de coagulación-floculación, lo que evidencia una mejora adicional respecto al tratamiento inicial. En conjunto, estos resultados indican que la combinación de coagulación-floculación con el tren de tratamiento no solo potencia la eliminación de contaminantes, sino que también constituye una alternativa ambientalmente más favorable, al permitir prescindir total o parcialmente de coagulantes inorgánicos y tóxicos y, con ello, reducir la generación de residuos y los impactos asociados.

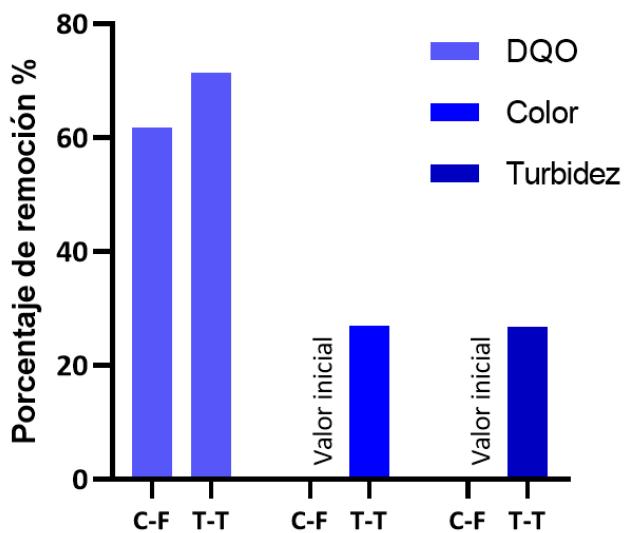


Figura 23. Gráfica de resultados finales. C-T: Coagulación-Floculación, T-T: Tren de Tratamiento.

## 6. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la remoción de colorantes en aguas residuales puede lograrse de manera efectiva mediante el uso de saponinas extraídas de *Agapanthus africanus* a través de procesos de coagulación–floculación. Asimismo, se evidenció que la eficiencia de remoción se incrementa de forma significativa cuando este tratamiento se acopla a un tren de tratamiento compuesto por etapas de adsorción, filtración y microfiltración, siendo esta última basada en el uso de nanotubos de carbono. Las condiciones óptimas del sistema correspondieron a una concentración de 500 mg/L de saponina, 400 mg/L de colorante y un pH de 9. El acoplamiento de estos procesos no generó efluentes con características tóxicas, lo que sugiere su viabilidad para aplicaciones como el riego agrícola, representando una alternativa sostenible frente al desabasto y la elevada demanda de agua para este uso. De esta manera, se contribuiría a la reducción del consumo de agua potable destinada al riego y, consecuentemente, a la mitigación del estrés hídrico. Finalmente, los resultados de este proyecto abren nuevas líneas de investigación orientadas a la optimización y adaptación del sistema para mejorar la eficiencia en la remoción de colorantes en aguas residuales textiles, así como a la posible implementación de estas tecnologías en el ámbito industrial y ecológico, promoviendo un manejo más adecuado y sustentable de los recursos hídricos.

## 7. PERSPECTIVAS

Para lograr una identificación más precisa de las saponinas presentes en *Agapanthus africanus*, sería pertinente comparar los espectros de masas con un estándar analítico y realizar un análisis de los patrones de fragmentación del compuesto en el extracto. Adicionalmente, podría realizarse un análisis de resonancia magnética nuclear (RMN), como se describe en el estudio de Iguchi et al. (2025); considerando que para esto sería necesaria una purificación previa del compuesto y su obtención en cantidades suficientes.

Para trabajos futuros, se podría implementar un tiempo de agitación prolongado durante la prueba de coagulación-flocculación, similar al procedimiento descrito por Samal, Das y Mohanty (2017), quienes emplean una agitación de 200 rpm durante 24 horas. Esta modificación permitiría evaluar si un mayor tiempo de contacto favorece la interacción entre la saponina y el colorante. Se considera una estrategia prometedora, ya que en las pruebas actuales se observó que al dejar reposar las muestras por períodos más prolongados en los tubos Imhoff se formaban flóculos más visibles y se presentaba una disminución de color más notoria.

Un aspecto a considerar para futuras mejoras es que la membrana con nanotubos de carbono tiende a saturarse con rapidez, lo que puede afectar significativamente la eficiencia del proceso. Si bien es posible lavarla para su reutilización, este procedimiento no resulta tan efectivo como el uso de una membrana nueva y, además, implica un costo elevado debido al material de los nanotubos.

Otra alternativa para mejorar el rendimiento del tren de tratamiento sería emplear un tipo diferente de carbón activado. Un ejemplo de ello es el estudio de Peláez-Cid et al. (2024), en el cual se obtuvo carbón activado a partir de semillas de chirimoya y se aplicó en la adsorción de colorantes textiles. Los resultados fueron altamente favorables, logrando la remoción de prácticamente el 100% de los colorantes básicos y otros contaminantes presentes en el agua, además de una notable disminución de la DQO hasta alcanzar los parámetros establecidos por la normativa.

## 8. REFERENCIAS

- Adame, L., & Cubero, B. (2024). *Estrés hídrico y sus principales causas*. Credit Rating Agency. [https://www.bmv.com.mx/docs-pub/eventoca/eventoca\\_1359188\\_2.pdf](https://www.bmv.com.mx/docs-pub/eventoca/eventoca_1359188_2.pdf)
- Adintus (s.f.). Tipos de coagulantes para el tratamiento de aguas residuales. *Blog de Adintus*. <https://adintus.com/blog/coagulantes-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). Saponinas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): un subproducto con alto potencial biológico. *Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas*, 45(3), 438-469. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v45n3.62043>
- Al-Abdi, W., & Jaeel, A. J. (2023). Color and COD removal from textile effluent using Alum and  $\text{FeCl}_3$  coagulation. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 11(1), 126–133. <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol11.Iss1.429>
- Ang, W. L., & Mohammad, A. W. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 250, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>
- Aristizabal, V., Liseth, I., & Lesmes, A. (2020). The environmental impact generated by the denim process. *Convinciones*, 7(13), 6-13.
- Avila-Camacho, F. J., Moreno-Villalba, L. M., Cerón-Montes, G. I., Garrido-Hernández, A., Cardoso-Chávez, C. A., & Pacheco-Piña, C. J. (2021). Diseño de un espectrofotómetro UV-VIS de bajo costo para la industria bioquímica: Una revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(Especial 2), 19–28. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7788>
- Ávila-Castro, L. M. (2016). *Variación en la reducción de la turbiedad de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda, mediante un proceso de coagulación/floculación ayudado por almidón de plátano y aguas termales* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Manizales].

Baeyer, A., & Drewsen, V. (1882). Darstellung von Indigblau aus Orthonitrobenzaldehyd. *15*(2), 2856-2864. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00395-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00395-4)

Bravo-Gallardo, M. A. (2017). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales [Proyecto de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].

Buscio, V., Marín, M., Crespi, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2015). Reuse of textile wastewater after homogenization-decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Journal*, *265*(1), 122-128.

Campinas, M., Viegas, R. M. C., Coelho, R., Lucas, H., & Rosa, M. J. (2021). Adsorption/Coagulation/Ceramic Microfiltration for Treating Challenging Waters for Drinking Water Production. *Membranes*, *11*(2), 91. <https://doi.org/10.3390/membranes11020091>

Carrillo, J. B., Flores, M. F. H., & López, L. R. S. (2021). Tecnologías microbianas de remoción de colorantes azoicos en la industria textil. *RD-ICUAP*, (20), 186–201. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2021.20.608>

Castellanos-Cardona, S. J., & Tusarma Grajales, M. (2014). *Evaluación fisicoquímica por el método de adsorción-coagulación-floculación para la remoción de colorantes del efluente del área de procesos industriales de la empresa textil CO&TEX S.A.S.* [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira].

Comisión Nacional del Agua (2024). *Indicadores de calidad del agua*. <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua?idiom=es>

Desta, W. M., & Bote, M. E. (2021). Wastewater treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera* seeds): Optimization through response surface methodology. *Helijon*, *7*(11), e08451. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08451>

Ferrari, O. (2024). *¿Por qué el azul de tus vaqueros es perjudicial para el medio ambiente? ¿Tiene solución?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2024/02/tinte-azul-pantalones-vaqueros-contaminacion-agua-possible-solucion>

Flores y plantas (2020). *Agapanthus africanus: El lirio del Nilo.* Flores y plantas. [https://www.floresyplantas.net/agapanthus-africanus-el-lirio-del-nilo/#google\\_vignette](https://www.floresyplantas.net/agapanthus-africanus-el-lirio-del-nilo/#google_vignette)

Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). *Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales* [Working paper]. ECAPMA.

Gobierno de México (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/se-publica-nom-001-semarnat-2021-que-establece-lmites-de-contaminantes-en-descargas-de-aguas-residuales>

Godínez, A. (2024). *Diseño de un tren de tratamiento de agua contaminada para la eliminación de coliformes fecales, microplásticos y paracetamol empleando filtración, microfiltración y sistema de adsorción.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro].

Góngora-Chi, G. J., Lizardi-Mendoza, J., López-Franco, Y., López-Mata, M., & Quihui-Cota, L. (2023). Métodos de extracción, funcionalidad y bioactividad de saponinas de Yucca: una revisión. *Biotechnia*, 25(1), 147–155. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v25i1.1800>

Gómez-Velázquez, H. D. J., Aparicio-Fernández, X., Escobar-Ortiz, A., & et al. (2024). Phytochemical fingerprint of chia sprouts grown under chemical elicitation with salicylic acid and hydrogen peroxide. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79, 127–136. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01133-y>

Hadadi, A., Imessaoudene, A., Bollinger, J.-C., Assadi, A. A., Amrane, A., & Mouni, L. (2022). Comparison of four plant-based bio-coagulants performances against alum and ferric chloride in the turbidity improvement of bentonite synthetic water. *Water*, 14(20), 3324. <https://doi.org/10.3390/w14203324>

Hernández, S. R., Lugo, C. C. E., Díaz, J. L., & Villanueva, S. (2005). Extracción y cuantificación indirecta de las saponinas de agave lechuguilla Torrey. DOAJ: Directory Of Open Access Journals. <https://doaj.org/article/a0949362e6184dc79f537daa375d51ac>

Holkar, C., Jadhav, A., Pinjari, D., Mahamuni, N., & Pandit, A. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible. *Journal of Environmental Management*, 182, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>

Iguchi, T., Shimazaki, T., & Mimaki, Y. (2025). Agapanthussaponin A from the Underground Parts of Agapanthus africanus Induces Apoptosis and Ferroptosis in Human Small-Cell Lung Cancer Cells. *Molecules*, 30(15), 3189. <https://doi.org/10.3390/molecules30153189>

Ingeniería ambiental (2020). *Tratamiento terciario de aguas residuales: desinfección y características*. Ingeniería ambiental. <https://ingenieriaambiental.net/tratamiento-terciario-de-aguas-residuales/>

Jurado-Chora, P. V., & Suntaxi-Cantuña, G. M. (2020). *Evaluación de la cáscara de banano como material de empaque en un sistema de biofiltración para tratar aguas residuales provenientes del lavado y tinturado de jeans* [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20970/1/CD%2010492.pdf>

Labastida-Núñez, I., Velasco-Pérez, M., Pablo-Reyes, E. P., González-Aragón, A., & Beltrán-Villavicencio, M. (2023). Evaluation of wastewater coagulation/flocculation with chitosan from shrimp exoskeletons waste and aluminum sulfate. *Revista Terra Latinoamericana*, 41, e1743. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1743>

Lara-Severino, R., Gomez-Olivan, L., Sandoval-Trujillo, Á., Issac-Olive, K., & Ramírez-Durán, N. (2017). Búsqueda de capacidad productora de biosurfactantes en actinobacterias haloalcalófilas y haloalcalotolerantes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, (3), 529-539. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.15>

- Liao, Y., Li, Z., Zhou, Q., Sheng, M., Qu, Q., Shi, Y., Yang, J., Lv, L., Dai, X., & Shi, X. (2021). Saponin surfactants used in drug delivery systems: A new application for natural medicine components. *International Journal of Pharmaceutics*, 603, 120709. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120709>
- Lopera-López, F. C. (2019). *Proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales de una heladería: Eficiencia de diferentes coagulantes de origen inorgánico* [Tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
- López, R., Parada, M., & Carrera, L. (2022). Quantification of Saponins in Quinoa Mojuelo (*Chenopodium quinoa* Willd.) for Use at Industrial Scale. ESPoCH Congresses: *The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 2(2), 686-704. <https://doi.org/10.18502/epoch.v2i2.11423>
- Mahato, S. B., & Nandy, A. K. (1991). Triterpenoid saponins discovered between 1987 and 1989. *Phytochemistry*, 30(5), 1357–1390. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)84170-W](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)84170-W)
- Marcano, D. (2018). *Introducción a la química* (2 ed.). Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales.
- Martínez, D. (2021). *Lavado de suelo contaminado de diésel empleando un biotenoactivo obtenido de Agapanthus africanus*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro].
- Martínez-Pérez, G. A. (2015). *Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana].
- Martínez-Stagnaro, S. Y. (2017). *Evaluación sobre el uso de arcillas para la adsorción de colorantes utilizados en la industria textil* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/59441>

Méndez, A. M., Penieres-Carrillo, J. G., & Ortega-Jiménez, F. (2017). *Cromatografía en capa fina y columna* [Material didáctico, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán].

Mendoza, B. M., Avelar, A. A. C., De Lucio, B. S. V., Del Rosario Romero López, M., & Juárez, F. M. (2025). Saponinas: características, métodos de extracción y su acción como agente antihipertensivo. *Revista Veritas de Difusión Científica*, 6(1), 739–766. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.431>

Mohamed, F., & Alfalous, K. (2020). The effectiveness of activated silica derived from rice husk in coagulation process compared with inorganic coagulants for wastewater treatment. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(2), 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.03.004>

Muhaimin, Prayoga, R. A., & Eniati, E. (2022). Determination of chemical oxygen demand (COD) concentration in domestic wastewater using UV-Vis spectrophotometry method based on the effect of reflux time and preservation time. *Stannum: Jurnal Sains dan Terapan Kimia*, 4(2), 13–18. <https://doi.org/10.33019/jstk.v4i1.2866>

National Center for Biotechnology Information (2025). *PubChem Compound Summary for CID 11954197, 7alpha,25-Dihydroxycholesterol*. [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7alpha\\_25-Dihydroxycholesterol](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7alpha_25-Dihydroxycholesterol)

Naciones Unidas (2019). *El costo ambiental de estar a la moda*. Naciones Unidas Noticias. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161>

Naglaa-Ahmed, M. Y., Alshymaa AbdelRahman, G., Alyaa Hatem, I., Mohamed S.A., A., & Samar Yehia, D. (2022). The genus *Agapanthus*: A review of traditional uses, pharmacological and phytochemical attributes. *South african journal of botany*, 150, 1168-1183. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.029>

Naglaa-Ahmed, M. Y., Alshymaa Abdel-Rahman, G., Alyaa Hatem, I., & Samar Yehia, D. (2024). Pharmacognostical studies of the flower, leaf, root, and rhizome used for the identification and authentication of *Agapanthus africanus*

[L.], cultivated in Egypt. *Journal of Advanced Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 4(1), 41-52.

Nath, A., Mishra, A., & Pande, P. P. (2021). A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. *Materials Today: proceeding*, 46(14), 6113-6117. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551>

Pedrozo, R. & Betancur, M. (2015). *Remoción de índigo carmín a partir de carbón activado obtenido de neumáticos usados*. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/6684>.

Peláez-Cid, A. A., López-Hernández, D. L., Gómez-Merino, E., & Herrera-González, A. M. (2024). Síntesis de carbones activados con semillas de chirimoya y su aplicación en la adsorción de colorantes textiles. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 263–278. <https://doi.org/10.20937/RICA.54967>

Pérez-Beltrán, J. P. (2017). *Evaluación de la sustitución del agente coagulante sulfato de aluminio en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP* [Tesis de licenciatura, Fundación Universidad de América].

Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. (2022). Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Clean Technologies*, 4(4), 1088–1102. <https://doi.org/10.3390/cleantechol4040066>

Rai, S., Acharya-Siwakoti, E., Kafle, A., Devkota, H., & Bhattarai, A. (2021). Plant-Derived Saponins: A Review of Their Surfactant Properties and Applications. *Sci*, 3(44). <https://doi.org/10.3390/sci3040044>

Ramos-Cortéz, J. J. (2021). *Desarrollo de una metodología para la detección y caracterización de metales contenidos en el agua por medio de espectrofotometría UV-Visible* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].

Razali, M. C., Wahab, N. A., Sunar, N., & Shamsudin, N. H. (2023). Existing Filtration Treatment on Drinking Water Process and Concerns Issues. *Membranes*, 13(3), 285. <https://doi.org/10.3390/membranes13030285>

Rodríguez-Jiménez, D. M., & Gallego-Suárez, D. D. J. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 6–17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>

Rodríguez-Landa, J., Hernández-Lozano, M., & Méndez-Ventura, L. (2020). *Manual de prácticas de farmacognosia*. Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/qfb/files/2020/09/Guia-de-Farmacognosia.pdf>

Romo, M. (2001). *Análisis de agua: Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Secretaría de Economía DGN. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/01/nmx-aa-030-scfi-2001.pdf>

Samal, K., Das, C., & Mohanty, K. (2017). Eco-friendly biosurfactant saponin for the solubilization of cationic and anionic dyes in aqueous system. *Dyes and Pigments*, 140, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.01.031>

Secretaría de gobernación (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993*. Diario Oficial de la Federación. [https://diariooficial.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4794015&fecha=18/10/1993#gsc.tab=0](https://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794015&fecha=18/10/1993#gsc.tab=0)

Sefiltrá (s.f.). *Filtración tangencial*. Sefiltrá. <https://www.sefiltrá.com/productos/filtracion-tangencial/>

Sela, G. (2024). *La coagulación en el tratamiento de aguas*. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/la-coagulacion-en-el-tratamiento-de-aguas/#:~:text=Los%20coagulantes%20inorg%C3%A1nicos%20producen%20lodo,sulfato%20con%20sulfato%20de%20aluminio.>

- Sentená-Montero, M. A. (2021). *Huella ecológica del sector textil-confección en Colombia para el año 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/52684>
- Siddiqui, A. (2019). *A comparative analysis of fecal sterol distribution to investigate the disappearance of mastodon at the Page-Lason Sinkhole* [Undergraduate honors thesis]. Baylor University.
- Singh, D., Verma, N., Raghuvanshi, S., Shukla, P., & Kulshreshtha, D. (2008). Antifungal activity of *Agapanthus africanus* extractives. *Fitoterapia*, 79(4), 298-300. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2007.12.004>
- Uribe-Valenzuela, C. L. (2021). *Estrategia 3R para la gestión de los efluentes textiles generados por los procesos tintóreos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Federico Villarreal].
- Valderrama, A., Neme, O., & Flores, H. (2020). Manufacturing Water footprint. A comparison between rich and poor countries. *Análisis económico*, 35(88).
- Vasco-Pérez, A. V. (2014). *Evaluación de la adsorción de índigo carmín en pellets abrasivos para la industria textil* [Tesis de licenciatura, Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2221>
- Verbel, R., Vergara, A., Fellizola, L., & Aguas, G. (2017). Evaluation of the mixture of natural coagulants *Opuntia ficus* and *Moringa oleífera* in water clarification. *Producción + Limpia*, 12(2), 71–79. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a6>
- Vilca, J. (2022). *Comparación de tratamientos de oxidación avanzada, carbón activado y filtración por membrana para la remoción de colorantes utilizados en industrias textiles de la ciudad de Arequipa, Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d8b2c4b6-8771-4580-8fba-b2b9363df04a/content>
- Villegas-Zapata, Y. (2024). *Sostenibilidad económica de la industria textil*. [Tesis de licenciatura, Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria].

Zaharia, C., Musteței, C.-P., & Afrăsinei, M.-A. (2024). The use of coagulation–flocculation for industrial colored wastewater treatment—I: The application of hybrid materials. *Applied Sciences*, 14(5), 2184. <https://doi.org/10.3390/app14052184>

Zamudio, E. (2013). *Acoplamiento del proceso de coagulación-flocculación por biopolímeros y desinfección por ozono de aguas residuales municipales*. [Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional].

Zeba Denim (2024). El índigo del denim: origen, proceso y aplicaciones. *Zeba Denim*. <https://www.zevadenim.com/el-indigo-del-denim-origen-proceso-y-aplicaciones/#:~:text=El%20proceso%20de%20s%C3%ADntesis%20que%C3%A9mica,compuesto%20que%C3%A9mico%20conocido%20como%20%C3%A9ndigo>

## ANEXOS

### NOM-001-SEMARNAT-2021

La norma tiene por objeto “establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales”. Todos los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo de la Nación tienen que regirse por esta norma. Los valores que se tomarán como referencia es DQO en ríos, arroyos, canales y drenes como se muestra en la primera columna de datos. Las siglas PM se refieren a Promedio Mensual, PD se refiere a Promedio Diario y VI significa Valor Instantáneo. (Gobierno de México, 2022)

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo										
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico				
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.		
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	21	
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28		
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84		
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21		
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30		
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15		
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1										
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200		
Enterococos fetales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200		
pH (UpH)	6-9																			
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo										
	436 nm									7,0 m <sup>-1</sup>										
	525 nm									5,0 m <sup>-1</sup>										
	620 nm									3,0 m <sup>-1</sup>										

### **NOM-CCA-O14-ECOL/1993**

La presente norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil (Secretaría de gobernación, 1993).

Parámetros	Promedio diario	Instantáneo
pH	6 - 9	6 - 9
Demanda química de oxígeno (mg/L)	200	240
Sólidos sediméntales (mg/L)	1.0	1.2