

Evaluación de estrategias para minimizar el impacto ambiental del jugo generado durante la
extracción de la fibra de fique

Silvia Karina Caballero Melo y Frank Marco Rangel Herrera

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director

German Adolfo Díaz Ramírez

Doctor en Ingeniería de Materiales

Codirector

Luz Marina Ballesteros Rueda

Doctora en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	9
1. Objetivos.....	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
2. Estado del arte.....	12
3. Metodología.....	13
3.1 Extracción del jugo de fique.....	14
3.2 Caracterización fisicoquímica	14
3.2.1 Determinación de la densidad relativa	14
3.2.2 Determinación del pH y oxígeno disuelto.....	15
3.2.3 Determinación de la turbidez.....	15
3.2.4 Determinación del punto de ebullición	15
3.3 Caracterización fitoquímica	15
3.3.1 Detección de saponinas.....	16
3.3.2 Detección de alcaloides	17
3.3.3 Detección de flavonoides.....	17
3.3.4 Detección de taninos.....	18
3.3.5 Detección de esteroides	18
3.4 Estrategias de tratamiento	18
3.4.1 Coagulación - Flocculación	19
3.4.2 Centrifugación	20
3.4.3 Inactivación enzimática	20
3.5 Evaluación analítica del desempeño del tratamiento	20

3.6	Estrategias de valorización tecnológica.....	21
3.6.1	Identificación y análisis de rutas de valorización.....	21
4.	Resultados.....	21
4.1	Caracterización fisicoquímica	21
4.2	Caracterización fitoquímica	23
4.3	Aplicación de los tratamientos	25
4.3.1	Estabilidad y formación del sedimento	25
4.3.2	Condiciones fisicoquímicas obtenidas del jugo tratado de <i>F. macrophylla</i>	27
4.3.3	Condiciones fitoquímicas obtenidas del jugo tratado de <i>F. macrophylla</i>	29
4.3.4	Condiciones fisicoquímicas obtenidas del jugo tratado de <i>F. gigantea</i>	29
4.3.5	Condiciones fitoquímicas obtenidas del jugo tratado de <i>F. gigantea</i>	30
4.4	Análisis comparativo de desempeño	31
4.4.1	Demanda química de oxígeno.....	31
4.4.2	Turbidez.....	33
4.4.3	Oxígeno disuelto.....	35
4.5	Valorización tecnológica	37
4.5.1	Aplicaciones tecnológicas de las saponinas	38
4.5.2	Aplicaciones tecnológicas de los flavonoides	40
4.5.3	Aplicaciones tecnológicas de los alcaloides.....	43
5.	Conclusiones.....	46
	Referencias bibliográficas.....	48
	Apéndice.....	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Métodos analíticos empleados para la detección cualitativa de metabolitos secundarios.	16
Tabla 2. Criterios empleados para reportar la presencia de metabolitos secundarios.....	16
Tabla 3. Configuración de los métodos de tratamiento evaluados.	19
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del jugo de <i>F. macrophylla</i> y <i>F. gigantea</i>	22
Tabla 5. Metabolitos secundarios en el jugo de <i>F. macrophylla</i> y <i>F. gigantea</i>	24
Tabla 6. Efecto de los tratamientos en las propiedades del jugo de <i>Furcraea macrophylla</i>	28
Tabla 7. Metabolitos secundarios en el jugo tratado de <i>F. macrophylla</i>	29
Tabla 8. Efecto de los tratamientos en las propiedades del jugo de <i>Furcraea gigantea</i>	30
Tabla 9. Metabolitos secundarios en el jugo tratado de <i>F. gigantea</i>	31
Tabla 10. Matriz de Pugh para la valorización tecnológica de saponinas.	39
Tabla 11. Matriz de Pugh para la valorización tecnológica de flavonoides.	41
Tabla 12. Matriz de Pugh para la valorización tecnológica de alcaloides.	44

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Flujo del diseño metodológico implementado en el desarrollo de la investigación.....	14
Figura 2. Metodología general para el tratamiento del jugo de <i>F. macrophylla</i> y <i>F. gigantea</i>	18
Figura 3. Evolución de la formación y estabilidad del sedimento en el jugo de <i>F. macrophylla</i>	26
Figura 4. Evolución de la formación y estabilidad del sedimento en el jugo de <i>F. gigantea</i>	27
Figura 5. Desempeño en la reducción de la DQO tras la aplicación de los tratamientos.....	32
Figura 6. Registro visual de los tratamientos aplicados sobre <i>F. macrophylla</i>	34
Figura 7. Registro visual de los tratamientos aplicados sobre <i>F. gigantea</i>	34
Figura 8. Desempeño en la reducción de turbidez tras la aplicación de los tratamientos.....	35
Figura 9. Desempeño en el aumento del oxígeno disuelto tras la aplicación de los tratamientos.....	36

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Prueba de Molisch	56
Apéndice B. Prueba de Mayer.....	57
Apéndice C. Prueba de Shinoda.....	58
Apéndice D. Prueba de cloruro férrico	59
Apéndice E. Prueba de Liebermann-Burchard	59

Resumen

Título: Evaluación de estrategias para minimizar el impacto ambiental del jugo generado durante la extracción de la fibra de fique*

Autores: Silvia Karina Caballero Melo, Frank Marco Rangel Herrera**

Palabras clave: Jugo de fique, *Furcraea macrophylla*, *Furcraea gigantea*, Coagulación-Floculación, Impacto ambiental, Valorización tecnológica

Descripción: Durante la extracción de la fibra de fique se generan subproductos que representan cerca del 96% de la hoja, entre ellos el jugo, cuyo desaprovechamiento ha favorecido su vertimiento directo, convirtiéndose en una fuente de contaminación para suelos y fuentes hídricas. Por lo tanto, en esta investigación se evaluaron estrategias de tratamiento orientadas a minimizar el impacto ambiental del jugo residual y se analizaron mediante revisión bibliográfica estrategias de valorización tecnológica para su aprovechamiento. En la primera parte del estudio, se implementó un diseño experimental con dos especies de fique, *Furcraea macrophylla* y *Furcraea gigantea*, empleando tratamientos de coagulación-floculación con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y policloruro de aluminio (PAC), seguidos de centrifugación e inactivación enzimática. La caracterización fitoquímica del jugo sin tratamiento evidenció perfiles similares entre especies, con presencia abundante de saponinas y moderada de alcaloides, diferenciándose en la intensidad superior de flavonoides en *F. gigantea*. Tras la aplicación de los tratamientos, las saponinas permanecieron en ambas especies, pero en *F. macrophylla* no se detectaron alcaloides ni flavonoides, en contraste con *F. gigantea* que los mantuvo, aunque en menor intensidad. Esta diferencia en el perfil fitoquímico explicó las variaciones en la efectividad del tratamiento, dado que los flavonoides interfieren con la coagulación mediante quelación de iones metálicos. El tratamiento M4 que integró la aplicación de hidróxido de sodio (NaOH), PAC y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ demostró el mejor desempeño en ambas especies, alcanzando para *F. macrophylla* una reducción en la demanda química de oxígeno del 56,81%, turbidez del 99,21% y aumento de oxígeno disuelto del 36,67%, mientras que para *F. gigantea* logró 13,63%, 98,66% y 20,83% respectivamente. En la segunda parte del estudio, se identificó la producción de surfactantes naturales como alternativa de valorización prometedora para las saponinas, y el uso de flavonoides y alcaloides con potencial como antioxidantes y pesticidas botánicos, respectivamente.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: German Adolfo Díaz Ramírez. Doctor en Ingeniería de Materiales. Codirector: Luz Marina Ballesteros Rueda. Doctora en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Abstract

Title: Evaluation of strategies to minimize the environmental impact of juice generated during fique fiber extraction*

Author: Silvia Karina Caballero Melo, Frank Marco Rangel Herrera **

Key Words: Fique juice, *Furcraea macrophylla*, *Furcraea gigantea*, Coagulation-Flocculation, Environmental impact, Technological valorization

Description: During fique fiber extraction, by-products are generated that represent approximately 96% of the leaf, including the juice, whose underutilization has favored its direct discharge, becoming a source of contamination for soils and water sources. Therefore, this research evaluated treatment strategies aimed at minimizing the environmental impact of residual juice and analyzed technological valorization strategies for its utilization through bibliographic review. In the first part of the study, an experimental design was implemented with two fique species, *Furcraea macrophylla* and *Furcraea gigantea*, employing coagulation-flocculation treatments with aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) and polyaluminum chloride (PAC), followed by centrifugation and enzymatic inactivation. Phytochemical characterization of untreated juice revealed similar profiles between species, with abundant presence of saponins and moderate alkaloids, differing in the superior intensity of flavonoids in *F. gigantea*. After treatment application, saponins remained in both species, but in *F. macrophylla* neither alkaloids nor flavonoids were detected, in contrast with *F. gigantea* which retained them, although at lower intensity. This difference in phytochemical profile explained variations in treatment effectiveness, given that flavonoids interfere with coagulation through chelation of metallic ions. Treatment M4, which integrated the application of sodium hydroxide (NaOH), PAC and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, demonstrated the best performance in both species, achieving for *F. macrophylla* a reduction in chemical oxygen demand of 56.81%, turbidity of 99.21% and dissolved oxygen increase of 36.67%, while for *F. gigantea* it achieved 13.63%, 98.66% and 20.83% respectively. In the second part of the study, natural surfactant production was identified as a promising valorization alternative for saponins, and the use of flavonoids and alkaloids with potential as antioxidants and botanical pesticides, respectively.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: German Adolfo Díaz Ramírez. Ph.D in Materials Engineering. Co-Director: Luz Marina Ballesteros Rueda. Ph.D in Electrochemistry, Science and Technology

Introducción

En Colombia, la planta de fique (*Furcraea spp.*) se utiliza tradicionalmente para la extracción de fibra celulósica del fique, conocida como cabuya, para la fabricación de cuerdas, bolsos, textiles y materiales de embalaje como sacos de café mediante el descortezado mecánico de la penca. Durante, este proceso solo se utiliza el 4% del peso total de la hoja y el porcentaje restante son subproductos formados por jugo, pulpa y estopa que generalmente son desaprovechados, generando grandes volúmenes de residuos orgánicos sin una gestión adecuada (Ovalle, 2018; Delgado, 2018).

De este modo, el aprovechamiento inadecuado de los residuos y el lavado de la fibra en aguas corrientes para retirar el mucílago adherido causan un impacto negativo sobre el medio ambiente, dado que estos “jugos verdes” tienen propiedades tensoactivas proporcionadas por la disposición de un alto contenido de azúcares y saponinas esteroidales, que provocan la ruptura de la tensión superficial del agua, turbidez y una concentración de oxígeno disuelto de 2,3 mg/L (Durán, 2022). Además, los residuos generados presentan una alta conductividad iónica atribuida a la presencia de fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio, y un pH que oscila entre 5,03 y 6,5 lo que ocasiona la acidificación de los suelos y de las fuentes hídricas circundantes (Castro, 2024).

Por esta razón, los subproductos de jugo de fique han sido estudiados en diferentes áreas de investigación como materia prima para la generación de productos de valor agregado. Algunas de las aplicaciones reportadas incluyen su uso como sustrato en procesos de producción de biocombustibles, tales como el metano y etanol (Vasco *et al.*, 2014). Asimismo, se ha incorporado en la elaboración de bioinsumos agrícolas para el control de plagas en cultivos y en la preparación de biofertilizantes foliares a partir de la combinación del jugo verde fermentado con otras sustancias como estiércol bovino, melaza, leche, sales minerales, calcio, magnesio, azufre, boro, hierro, entre otros (Díaz *et al.*, 2012).

En este sentido, con el propósito de contribuir a la conservación de áreas ecológicas y prevenir el deterioro ambiental asociado al manejo inadecuado de los residuos del fique, se llevó a cabo una evaluación

de estrategias de tratamiento, complementada con un análisis bibliográfico sobre alternativas de valorización tecnológica orientadas al aprovechamiento del jugo residual generado en la extracción de la fibra. Este enfoque no solo busca disminuir el impacto ambiental de dicho subproducto, sino también aportar bases científicas y técnicas que fortalezcan su gestión sostenible.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar estrategias de tratamiento y aprovechamiento del jugo residual generado durante la extracción de la fibra de fique para minimizar su impacto ambiental.

1.2 Objetivos específicos

Evaluar un método de tratamiento para reducir la carga orgánica presente en el jugo de fique, a fin de establecer una línea base para su aprovechamiento.

Analizar alternativas tecnológicas sobre el método seleccionado para la valorización del jugo de fique y su potencial uso como insumo en la producción de productos de valor agregado, considerando su viabilidad económica y su impacto ambiental.

2. Estado del arte

En lo referente a los daños medioambientales causados por el vertimiento del jugo de fique en fuentes hídricas, Castro *et al.*, (2024) evaluaron el impacto generado por la carga transportada por la escorrentía y la lixiviación del jugo de fique dispuesto sin ningún proceso previo al suelo mediante el cálculo de la huella hídrica gris (HHgris). El mayor impacto de HHgris obtenido fue de $6,05 \pm 0,23$ m³/kg de fique por la Demanda Química de Oxígeno o cantidad de materia orgánica (DQO), seguido de $4,08 \pm 0,18$ m³/kg de fique por la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), indicando que el vertimiento del jugo generado durante la extracción de la fibra de fique causa daños medioambientales severos.

Adicionalmente, Dagua *et al.*, (2008) en su evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique, determinaron que la biodegradabilidad promedio del jugo generado durante la extracción de la fibra es del 22%, haciendo evidente la necesidad de plantear alternativas para el aprovechamiento y disminución de vertimiento del jugo residual de la extracción de la fibra de fique.

Con el fin de reducir el impacto ambiental, se han desarrollado alternativas para el aprovechamiento y mitigación de la contaminación en fuentes hídricas, Taborda *et al.*, (2011) aplicaron electrocoagulación para la remoción de materia orgánica presente en el jugo de fique, obteniendo hasta 27,86% de remoción con una corriente y voltaje constante de 1,5A y 7,5V respectivamente. Además, indican que existe una correlación negativa entre el tiempo y DQO, junto con una correlación positiva entre la temperatura y el pH y entre la corriente y el voltaje.

Por otra parte, varios estudios han explorado diversas tecnologías y los desafíos inherentes en el aprovechamiento del jugo de fique, haciendo uso del residuo generado durante la extracción de la fibra de fique, evitando la contaminación en el suelo y fuentes hídricas. Villota y Pantoja (2015) evaluaron un bioinsumo elaborado a base de jugo de fique para el control del crecimiento y desarrollo de roya (*Hemileia vastatrix*) en el café. Para ello, ensayaron diferentes concentraciones del bioinsumo y determinaron que el

porcentaje de acción biosida, es atribuido por la presencia y aprovechamiento de metabolitos secundarios tales como saponinas, alcaloides, flavonoides, taninos, esteroides.

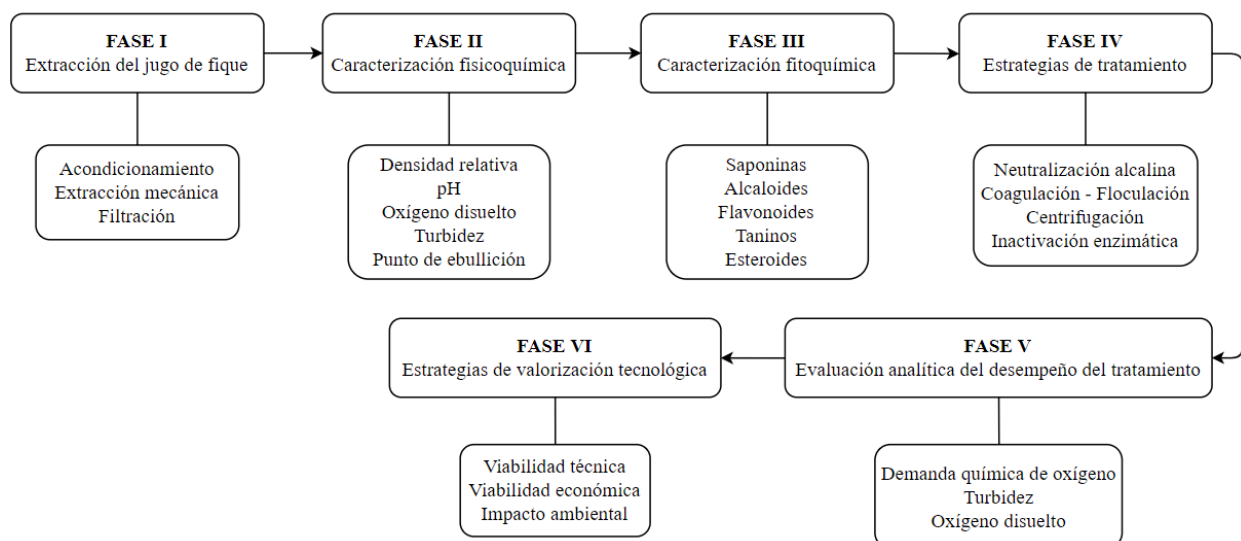
Vélez y Velásquez (2020) realizaron un diseño conceptual de una planta piloto para la extracción de saponinas presentes en el jugo de fique mediante procesos de floculación con bajo consumo energético, simplicidad tecnológica y uso de solventes inocuos al medio ambiente como agua y etanol, obteniendo una eficiencia de 87,45%. Adicionalmente, mencionan que la producción de saponinas puede generar un impacto ambiental positivo al reducir de forma significativa la DQO y la DBO₅ de los efluentes en las plantas de beneficio.

3. Metodología

El proyecto se desarrolló mediante un enfoque experimental que integró técnicas de caracterización fisicoquímica y fitoquímica, seguidas de la implementación de estrategias de tratamiento para el análisis de la valorización del jugo residual de fique. El desarrollo experimental se realizó con las dos especies de fique de mayor predominio en cultivo en el país, *Furcraea macrophylla* y *Furcraea gigantea* (Murillo *et al.*, 2018), con el propósito de establecer las posibles variaciones en las propiedades del jugo residual entre especies y su influencia en la efectividad de los tratamientos propuestos. El esquema metodológico experimental empleado para el desarrollo de esta investigación se presenta en la Figura 1 y se detalla en las secciones posteriores.

Figura 1.

Flujo del diseño metodológico implementado en el desarrollo de la investigación.



3.1 Extracción del jugo de fique

Las hojas de fique procedentes del municipio de San Gil y zonas rurales aledañas fueron sometidas a un lavado superficial con agua para eliminar impurezas y material particulado adherido. Posteriormente, se realizó la remoción manual de la corteza exterior de las hojas, seguido del corte en fragmentos de aproximadamente 2 cm por lado para facilitar el procesamiento. Los trozos fueron procesados por lotes de 0,1 kg utilizando un picador doméstico de 0,5 kW de potencia, obteniéndose una masa húmeda que fue sometida a un proceso de prensado manual a través de una tela de malla fina de nylon.

3.2 Caracterización fisicoquímica

3.2.1 Determinación de la densidad relativa

La densidad relativa del jugo de fique se determinó mediante picnometría a 27 °C utilizando un picnómetro de vidrio borosilicato de 25 mL. Las determinaciones se realizaron por triplicado empleando una balanza analítica de precisión $\pm 0,1$ mg, aplicando la relación de masas entre el jugo de fique y agua ultrapura como fluido de referencia.

3.2.2 Determinación del pH y oxígeno disuelto

La determinación del pH se realizó mediante potenciometría directa con un Metrohm 913 pH/DO Meter, calibrado con soluciones buffer estándar y con una precisión de $\pm 0,001$ unidades. El oxígeno disuelto se midió con el mismo equipo mediante un sensor óptico basado en la extinción de la luminiscencia, con una precisión de $\pm 0,1$ mg/L.

3.2.3 Determinación de la turbidez

La turbidez del jugo de fique se determinó teniendo en cuenta el método SM 2130-B mediante medición turbidimetría en RATIO, entre la señal de luz dispersa nefelométrica (90°) y la señal de luz dispersa transmitida. Se empleó un turbidímetro portátil Hach modelo 2100Q, con una precisión de lectura de $\pm 2\%$. En el caso específico de las muestras de jugo fresco sin tratamiento previo, se aplicó el método EPA 180.1 incorporando un factor de dilución de 3,2 para garantizar mediciones dentro del rango óptimo de detección del equipo.

3.2.4 Determinación del punto de ebullición

El punto de ebullición se determinó mediante calentamiento directo de una muestra de 25 mL de jugo de fique sobre una plancha calefactora, a una presión atmosférica de 757 mmHg. Como referencia, se monitoreó la temperatura de una muestra de agua ubicada en la misma superficie mediante una termocupla. La medición sobre el jugo se realizó con un termómetro digital de punzón BRIXCO con una presión de lectura de ± 1 °C, registrando la temperatura una vez alcanzada la estabilización térmica.

3.3 Caracterización fitoquímica

Con el propósito de establecer la presencia de metabolitos secundarios en el jugo de fique, se realizaron ensayos cualitativos dirigidos hacia cinco grupos principales: saponinas, alcaloides, flavonoides, taninos y esteroides. Las pruebas se llevaron a cabo siguiendo los protocolos descritos en la literatura científica, ajustados a los recursos disponibles y a las condiciones experimentales del estudio. Para cada

caso, se aplicaron pruebas colorimétricas y/o de precipitación, permitiendo observar reacciones específicas ante la presencia de metabolitos. Los métodos analíticos utilizados se presentan en la Tabla 1 mientras que los criterios de intensidad visual de los cambios observados se establecen en la Tabla 2.

Tabla 1.

Métodos analíticos empleados para la detección cualitativa de metabolitos secundarios.

Grupo de metabolitos	Método	Referencia
Saponinas	Molisch	(Domínguez, 1973)
Alcaloides	Mayer	(Domínguez, 1973)
Flavonoides	Shinoda	(Domínguez, 1973)
Taninos	Cloruro férrico	(Bulugahapitiya, 2013)
Esteroides	Liebermann-Burchard	(Rojas, 2008)

Tabla 2.

Criterios empleados para reportar la presencia de metabolitos secundarios.

Criterio	Nomenclatura
Presencia abundante	+++
Presencia moderada	++
Presencia leve	+
Ausencia	-

3.3.1 Detección de saponinas

La detección de saponinas se realizó mediante la prueba de Molisch, siguiendo el protocolo establecido por Domínguez (1973) con modificaciones adaptadas al sistema de análisis. El reactivo de Molisch se preparó mediante la disolución de 1 mL de α -naftol en 19 mL de etanol al 96% v/v, asegurando la homogeneización completa de la solución antes de su aplicación.

Para la ejecución de la prueba se emplearon 2 mL de jugo fresco, a la que se adicionaron 0,4 mL (8 gotas equivalentes) del reactivo de Molisch, previamente preparado. Posteriormente, se incorporó 1 mL de ácido sulfúrico concentrado de manera cuidadosa por las paredes del recipiente, evitando la agitación directa. La formación de un anillo de color violeta en la interfase constituye el indicador de la presencia de saponinas en la muestra.

3.3.2 Detección de alcaloides

La identificación de alcaloides se llevó a cabo conforme al procedimiento descrito por Domínguez (1973) con modificaciones adaptadas al sistema de análisis, que contempla el uso del reactivo de Mayer como indicador cualitativo. Se preparó una solución ácida al 5% v/v mediante la disolución de 1 mL de ácido clorhídrico en 19 mL de agua ultrapura, la cual se incorporó a 80 mL de jugo de fique. La mezcla resultante se sometió a calentamiento indirecto mediante baño maría a 60 °C durante cinco minutos. Transcurrido el tiempo, se permitió el enfriamiento gradual hasta alcanzar la temperatura ambiente, seguido de filtración al vacío.

La preparación del reactivo de Mayer se realizó mediante la disolución de 1,36 g de cloruro de mercurio en 60 mL de agua ultrapura, preparando simultáneamente una solución de 5 g de yoduro de potasio en 10 mL de agua ultrapura. Ambas disoluciones se mezclaron y se aforó a 100 mL con agua ultrapura.

Para la detección, se utilizaron muestras de 2 mL del extracto previamente acidulado, a las cuales se le adicionaron 0,15 mL (3 gotas equivalentes) del reactivo de Mayer. La formación de un precipitado lechoso constituye el indicador de la presencia de alcaloides.

3.3.3 Detección de flavonoides

Se empleó la prueba de Shinoda para la detección de flavonoides, conforme a los parámetros establecidos por Domínguez (1973) con modificaciones adaptadas al sistema de análisis. Para ello, se utilizó 1 mL de jugo de fique, al cual se le adicionaron 0,1 g de limadura de magnesio. Posteriormente, se incorporó 1 mL de ácido clorhídrico concentrado de manera cuidadosa por las paredes del recipiente, evitando la agitación directa. La aparición de una coloración amarilla, anaranjada, roja, roja azulosa o violeta en la muestra constituye el indicador de la presencia de flavonoides.

3.3.4 Detección de taninos

La identificación de compuestos tánicos se realizó mediante el ensayo colorimétrico con cloruro férrico, utilizando la metodología reportada por Bulugahapitiya (2013). Se empleó 1 mL de jugo de fique, al cual se le añadió 0,15 mL (3 gotas equivalentes) de una solución preparada disolviendo 2 g de cloruro férrico en 12 mL de agua ultrapura. La transición colorimétrica desde verde oscuro hasta azul se interpreta como indicio de la presencia de taninos en la muestra.

3.3.5 Detección de esteroides

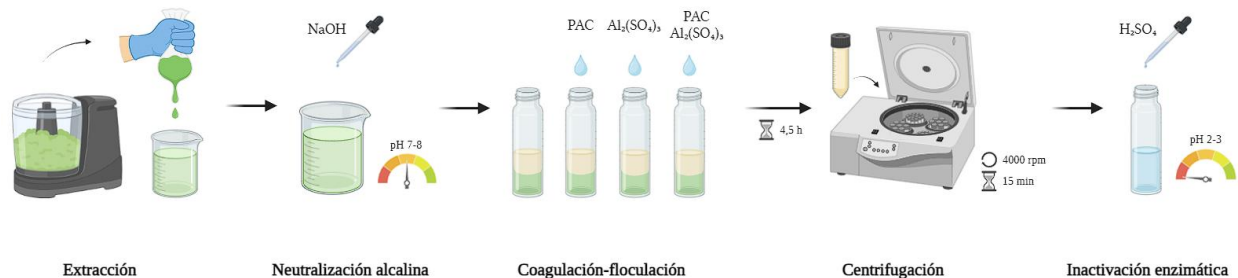
La caracterización de compuestos esteroidales se realizó mediante la aplicación de la prueba de Liebermann-Burchard, basándose en el protocolo desarrollado por Rojas (2008). Se empleó 1 mL de jugo de fique al cual se adicionaron 1 mL de cloroformo, anhídrido acético y ácido sulfúrico concentrado, agitando la mezcla asegurando una adecuada mezcla entre los reactivos. Un cambio de coloración a rosado-azul, verde intenso y luego verde oscuro-negro indica la presencia de esteroides.

3.4 Estrategias de tratamiento

Para el tratamiento del jugo de *F. macrophylla* y *F. gigantea* se estableció un procedimiento sistemático que integró distintas operaciones fisicoquímicas orientadas a la reducción de la carga orgánica. El diagrama de flujo general del procedimiento de tratamiento empleado se presenta en la Figura 2.

Figura 2.

Metodología general para el tratamiento del jugo de *F. macrophylla* y *F. gigantea*.



Se implementó un diseño experimental factorial 2^2 que contempló la evaluación individual y combinada de dos factores: el uso de sulfato de aluminio tipo A ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y Policloruro de Aluminio (PAC) como agentes coagulantes-floculantes. En todos los tratamientos se incluyó la aplicación de hidróxido de sodio (NaOH) como agente alcalinizante. La matriz experimental de los métodos de tratamiento aplicados se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.

Configuración de los métodos de tratamiento evaluados.

Tratamiento	NaOH	PAC	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
M1	Sí	No	No
M2	Si	Sí	No
M3	Si	No	Sí
M4	Sí	Sí	Si

3.4.1 Coagulación - Floculación

Las concentraciones de los agentes coagulantes-floculantes se establecieron siguiendo las dosificaciones recomendadas por los fabricantes en cuerpos de agua dulce. Específicamente, se consideró una dosis de 20 mL/m^3 para el PAC y 50 g/m^3 para el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Al ajustar las concentraciones al volumen experimental de trabajo de 20 mL de jugo de fique por tratamiento, las dosis requeridas correspondieron a $4,0 \times 10^{-4} \text{ mL}$ de PAC y $1,3 \times 10^{-3} \text{ g}$ de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Con el propósito de facilitar la dosificación, se prepararon soluciones en agua ultrapura. La solución de PAC se preparó mediante un proceso de dilución en dos etapas: inicialmente se incorporó 1 mL de PAC en 200 mL de agua, y posteriormente se extrajeron 10 mL de esta disolución madre para diluirlos con 100 mL de agua adicional, resultando en una concentración de 0,045 % v/v. Paralelamente, la solución de sulfato de aluminio se preparó disolviendo 0,125 g de sulfato de aluminio en 100 mL de agua, alcanzando una concentración final de 0,125 % m/v.

En los tratamientos que incluyeron la aplicación de los agentes, se dosificó un volumen fijo de 1 mL de la solución correspondiente en cada muestra de 20 mL, garantizando el cumplimiento de la dosis. El

proceso se optimizó mediante el ajuste controlado del pH en un rango de 7 a 8, empleando una solución de NaOH al 4 % m/v, preparada a partir de la disolución de 1 g de hidróxido de sodio en 25 mL de agua.

Luego de la aplicación de los agentes floculantes, los recipientes se dejaron en reposo y se registró la altura de la materia orgánica precipitada cada 30 minutos, hasta la estabilización de la altura del sedimento.

3.4.2 Centrifugación

El líquido sobrenadante obtenido luego de la etapa de coagulación-floculación fue sometido a centrifugación a 4000 rpm durante 15 minutos como etapa complementaria para la separación de partículas suspendidas remanentes del tratamiento previo y la obtención de un sobrenadante clarificado.

3.4.3 Inactivación enzimática

La inactivación enzimática del sobrenadante clarificado obtenido tras la centrifugación se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito por Castro *et al.*, (2006) orientado a reducir la actividad relativa de las enzimas peroxidasa (POD) y polifenol oxidasa (PPO) a valores inferiores al 10%. Para ello, el jugo se acidificó mediante la adición de ácido sulfúrico concentrado hasta alcanzar un pH inferior a 3.

3.5 Evaluación analítica del desempeño del tratamiento

La eficiencia de remoción de materia orgánica presente en el jugo de fique se evaluó mediante la determinación de tres parámetros fisicoquímicos principales: la Demanda Química de Oxígeno (DQO), determinada mediante el método de reflujo cerrado SM 5220-D en el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), constituyéndose como el indicador principal de la materia orgánica presente y su grado de remoción tras la aplicación de los tratamientos; la turbidez, medida mediante nefelometría por el método SM 2130-B, parámetro utilizado para determinar la clarificación de los tratamientos mediante la cuantificación de partículas suspendidas residuales y sustancias coloidales presentes; y el contenido de

oxígeno disuelto (OD), determinado mediante un sensor óptico (O₂ Lumitrode) como parámetro complementario para evaluar integralmente la calidad del jugo tratado.

3.6 Estrategias de valorización tecnológica

3.6.1 Identificación y análisis de rutas de valorización

La valorización tecnológica se fundamentó en el aprovechamiento de los metabolitos secundarios remanentes en el jugo tratado del método seleccionado. Se integró una revisión bibliográfica para identificar aplicaciones reportadas en la literatura científica, complementada con la aplicación de la matriz de Pugh desarrollada por Pugh (1991) como técnica cuantitativa utilizada para clasificar las opciones multidimensionales de un conjunto de alternativas, permitiendo evaluar las diferentes rutas de valorización considerando criterios de viabilidad técnico-económica e impacto ambiental.

4. Resultados

4.1 Caracterización fisicoquímica

El jugo de fique mostró diferencias entre especies que se evidenciaron tanto en sus propiedades organolépticas como en los parámetros analíticos. En cuanto a la coloración, *F. macrophylla* exhibió un verde ocre más intenso, mientras que *F. gigantea* presentó una tonalidad más clara. Estas variaciones se le atribuyen a la presencia de clorofila en el material vegetal (Arroyave y Velásquez, 2001), cuya abundancia se ha relacionado directamente con la intensidad del color verde en extractos vegetales (Arteaga *et al.*, 2014). En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica del jugo de fique para ambas especies evaluadas.

Tabla 4.

Parámetros fisicoquímicos del jugo de F. macrophylla y F. gigantea.

Parámetro	Unidad	<i>F. macrophylla</i>	<i>F. gigantea</i>
pH	-	4,98	4,95
Densidad relativa	-	1,022	1,027
Punto de ebullición	°C	96	97
Turbidez	NTU	1.450	1.014
DQO	mg O ₂ /L	49.433	42.183
Oxígeno disuelto	mg/L	4,99	5,09

El jugo de fique presentó un carácter ácido en ambas especies, con valores de pH de 4,98 para *F. macrophylla* y 4,95 para *F. gigantea*. Este comportamiento coincide con lo reportado por Bacca (2012), quien señala que *F. macrophylla* presenta un pH sutilmente mayor en comparación con *F. gigantea*. En cuanto a la densidad relativa, se observó un valor levemente superior en *F. gigantea* de 1,027, consistente con lo descrito por Rojas y Luque (2012), quienes indican que para el jugo recién extraído este parámetro oscila entre 1,027 y 1,03. Por su parte, *F. macrophylla* registró una densidad de 1,022.

En lo referente a las propiedades térmicas, se registraron puntos de ebullición de 96 °C para *F. macrophylla* y 97 °C para *F. gigantea*, determinados a una presión atmosférica de 101.491 Pa. Estos valores difieren de los reportados por Coral y Guevara (2012), quienes a una presión de 75.350 Pa obtuvieron un punto de ebullición de 92 °C para ambas especies, indicando una influencia directa de la presión sobre el parámetro, dado que un incremento en la presión del sistema conduce a un aumento en la temperatura de ebullición (Forero *et al.*, 2015).

En cuanto al contenido de materia orgánica, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) alcanzó valores de 49.433 mg O₂/L para *F. macrophylla* y 42.183 mg O₂/L para *F. gigantea*. Aunque no existen reportes específicos en la literatura científica para estas especies particulares, estos resultados se encuentran dentro del rango general documentado para *Furcraea spp.*, que varía entre 15.367 y 86.600 mg O₂/L (Lozano, 2012; Vasco *et al.*, 2014). Este amplio intervalo puede atribuirse a factores como el grado de

madurez de la planta, así como las condiciones ambientales y de cultivo que influyen directamente en la concentración de compuestos orgánicos presentes (Vera *et al.*, 2010).

La turbidez presentó diferencias entre las especies, con un valor de 1.450 NTU para *F. macrophylla*, superior al obtenido en *F. gigantea* de 1.014 NTU. La mayor cifra de turbidez registrada en *F. macrophylla* resulta coherente con los datos de DQO obtenidos para cada especie, donde también se observó una elevada concentración, lo que se asocia a una mayor presencia de compuestos orgánicos, los cuales aportan al incremento de partículas suspendidas (Fuentes *et al.*, 2015). En concordancia, los niveles de oxígeno disuelto fueron de 4,99 mg/L para *F. macrophylla* y 5,09 mg/L para *F. gigantea*, evidenciando una limitada disponibilidad de oxígeno derivada de la alta concentración de materia orgánica y la consecuente demanda microbiana.

4.2 Caracterización fitoquímica

Los análisis fitoquímicos realizados sobre el jugo de fique permitieron establecer la presencia de tres grupos principales de metabolitos secundarios en las especies *Furcraea macrophylla* y *Furcraea gigantea*. Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 5.

En el jugo de *F. macrophylla* y *F. gigantea*, las saponinas constituyeron el grupo de metabolitos secundarios predominantes. La prueba de Molisch confirmó su presencia mediante una reacción de alta intensidad, evidenciada por la formación de un anillo violeta característico en la interfase en ambas especies. Los alcaloides y flavonoides también estuvieron presentes, mostrando reacciones positivas moderadas, siendo abundantes en el caso de los flavonoides de *F. gigantea*. Para los alcaloides, la prueba de Mayer produjo un aumento en la turbidez acompañado de la formación de un precipitado. De igual manera, la prueba de Shinoda generó una coloración amarilla, siendo esta reacción más intensa en *F. gigantea*.

En contraste, no se detectaron las reacciones características esperadas en las pruebas para taninos y esteroides en ninguna de las especies. La prueba de cloruro férrico no produjo alguna reacción

colorimétrica visible, mientras que la prueba de Liebermann-Burchard generó una coloración marrón opaca, diferente a los tonos verde o azul verdoso característicos de una respuesta positiva.

Tabla 5.

Metabolitos secundarios en el jugo de F. macrophylla y F. gigantea.

Metabolitos	Prueba	<i>F. macrophylla</i>	<i>F. gigantea</i>
Saponinas	Molisch	+++	+++
Alcaloides	Mayer	++	++
Flavonoides	Shinoda	++	+++
Taninos	Cloruro férrico	-	-
Esteroides	Liebermann-Burchard	-	-

Nota. Presencia abundante (+++), Presencia moderada (++), Presencia leve (+), Ausencia (-)

En términos generales, ambas especies presentaron un perfil fitoquímico similar, con diferencias notables en la intensidad de algunos metabolitos. La presencia abundante de saponinas en ambas especies sugiere que estos compuestos constituyen metabolitos característicos del género *Furcraea spp.*, lo cual coincide con lo señalado por Rojas (2008) en su análisis fitoquímico preliminar, quien reportó una presencia positiva para este grupo de compuestos.

La detección moderada de alcaloides en ambas especies sugiere la presencia de compuestos nitrogenados con una distribución uniforme entre *F. macrophylla* y *F. gigantea*. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Bacca (2012), quien mediante una marcha fitoquímica cualitativa confirmó la presencia positiva de alcaloides en ambas especies procedentes del municipio de El Tambo, estableciendo así un patrón consistente de distribución de estos metabolitos.

En cuanto a los flavonoides, se observó una diferencia significativa entre las especies, registrándose en *F. gigantea* la mayor intensidad de presencia de estos compuestos. Esta variación sugiere que, aunque ambas especies pueden producir flavonoides, *F. gigantea* lo hace de manera más eficiente, reflejándose en concentraciones relativamente más altas. Sin embargo, lo que resulta evidente es la detección de estos metabolitos en ambas especies, lo cual concuerda con los hallazgos de Bacca (2012), quien confirmó mediante la prueba de Rosenhein resultados positivos para flavonoides en ambas especies, y con lo

reportado por Rojas (2012), quien utilizando la prueba de Shinoda identificó de manera general estos compuestos en *Furcraea spp.*

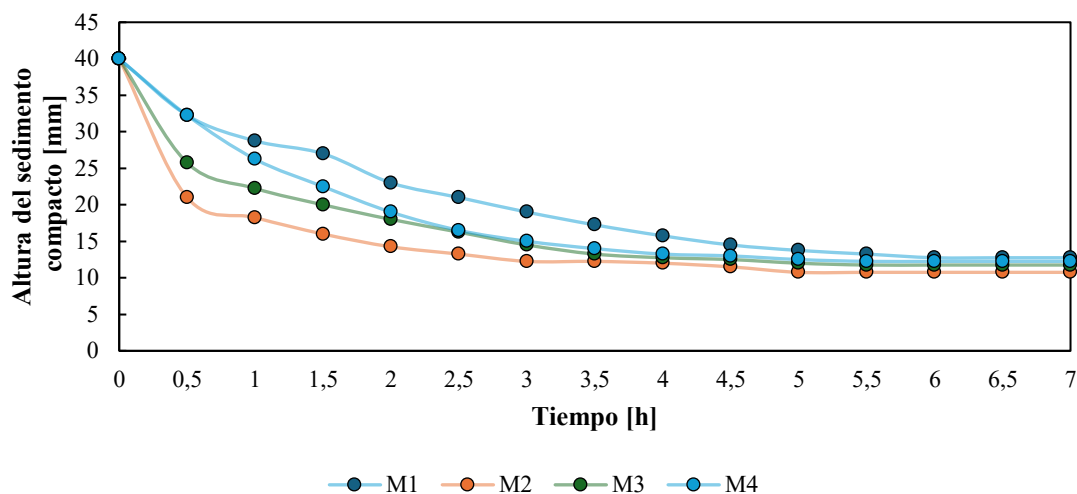
4.3 Aplicación de los tratamientos

4.3.1 Estabilidad y formación del sedimento

Durante la interacción inicial entre las partículas coloidales y los agentes floculantes, se observaron comportamientos diferenciados entre las especies. En el caso de *F. macrophylla*, la altura del sedimento compacto se redujo progresivamente con el tiempo hasta alcanzar el límite máximo de floculación. Todos los tratamientos (M1, M2, M3 y M4) iniciaron con una altura común de 40 mm y experimentaron una separación de fases gradual durante el proceso de sedimentación. Aproximadamente a las 4,5 horas todos los tratamientos alcanzaron la estabilidad, convergiendo todas las muestras hacia un valor final cercano a 12 mm. En este punto se evidenció claramente la separación de dos fases bien definidas (líquido sobrenadante y sedimento), lo cual es consistente con lo señalado por Lorenzo (2006), quien indica que durante el proceso de floculación se estimula la sedimentación de los sólidos suspendidos mediante la desestabilización de los coloides cargados y la neutralización de las fuerzas que los mantienen en suspensión, permitiendo la formación de flóculos que conducen finalmente a la sedimentación de los sólidos y a la separación bifásica. El comportamiento de sedimentación del jugo de *F. macrophylla* se presenta en la Figura 3.

Figura 3.

Evolución de la formación y estabilidad del sedimento en el jugo de *F. macrophylla*.

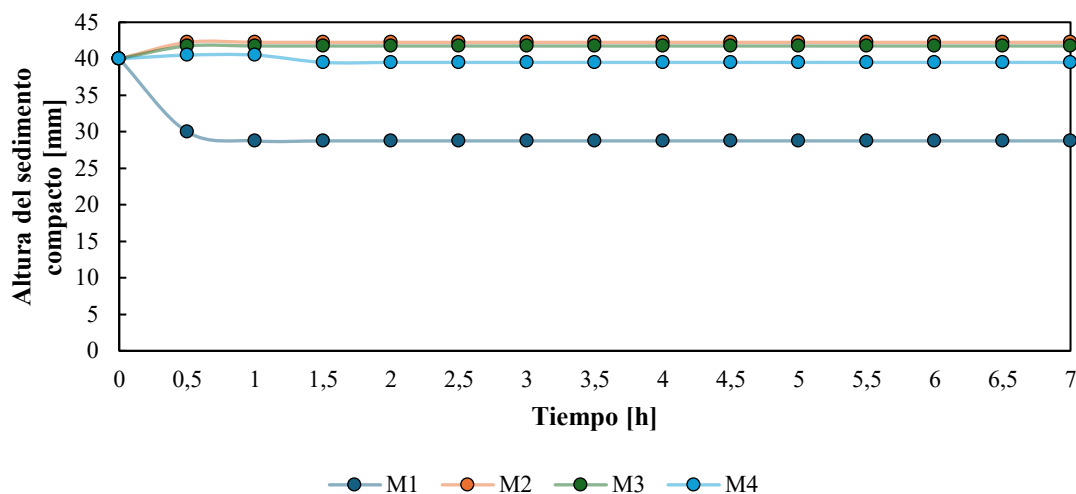


Nota. M1 (NaOH), M2 (NaOH + PAC), M3 (NaOH + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), M4 (NaOH + PAC + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

En contraste, las muestras de *F. gigantea* no presentaron variaciones significativas en las alturas del sedimento a lo largo del tiempo evaluado. Las muestras M2, M3 y M4 mantuvieron valores constantes de aproximadamente 42, 41 y 40 mm respectivamente, mientras que M1 mostró una ligera reducción inicial de 40 a 30 mm en los primeros 30 minutos, permaneciendo estable en este valor durante el resto del período de observación. Este comportamiento indica que los agentes coagulantes no fueron aprovechados eficientemente, debido al perfil fitoquímico diferencial entre especies, aspecto que se analiza en profundidad en las secciones posteriores. El comportamiento de sedimentación del jugo de *F. gigantea* se presenta en la Figura 4.

Figura 4.

*Evolución de la formación y estabilidad del sedimento en el jugo de *F. gigantea*.*



Nota. M1 (NaOH), M2 (NaOH + PAC), M3 (NaOH + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), M4 (NaOH + PAC + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

Para garantizar una separación eficiente, la acción de los floculantes por sí sola resulta insuficiente, siendo necesario también controlar adecuadamente el tiempo de retención. En este sentido, Menéndez (2022) señala que en los tratamientos biológicos convencionales de aguas residuales se debe considerar el tiempo de retención para evitar la resuspensión de los sólidos y alcanzar una separación satisfactoria entre los sólidos sedimentables y la obtención de un sobrenadante claro. Por consiguiente, se estableció un tiempo aproximado de sedimentación de 4 horas y 30 minutos, puesto que a partir de este momento no se registraron variaciones significativas en la altura del sedimento en *F. macrophylla*, evitándose así la resuspensión de los sólidos suspendidos.

4.3.2 Condiciones fisicoquímicas obtenidas del jugo tratado de *F. macrophylla*

En el caso de *F. macrophylla*, todos los tratamientos evaluados evidenciaron una reducción significativa en los parámetros fisicoquímicos analizados, tal como se presenta en la Tabla 6, en donde se destaca particularmente la disminución en la demanda química de oxígeno, con valores que oscilaron entre 50,74% y 56,81%. El tratamiento M4, que integró la aplicación combinada de NaOH, PAC y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, presentó la mayor eficiencia de remoción de DQO con 56,81%, reduciendo la concentración desde 49.433

mg/L O₂ hasta 21.350 mg/L O₂. El tratamiento M2, que empleó únicamente NaOH y PAC, logró una remoción de 52,76%, mientras que M3 (NaOH + Al₂(SO₄)₃) alcanzó 50,74%. Por su parte, el tratamiento M1, basado únicamente en la adición de NaOH, logró una reducción del 51,58 %, evidenciando que el ajuste de pH genera un efecto significativo en la disminución de la carga orgánica.

En términos de turbidez, todos los tratamientos evidenciaron una capacidad sobresaliente de clarificación, con reducciones superiores al 98%. El tratamiento M4 mostró el mejor desempeño con una reducción de 99,21%, disminuyendo la turbidez desde 1.450 NTU hasta 11,400 NTU. Los tratamientos M3, M2 y M1 alcanzaron reducciones de 99,09%, 98,90% y 98,44%, respectivamente, evidenciando que la implementación de los tratamientos potencia significativamente el proceso de clarificación.

En cuanto al oxígeno disuelto (OD), se registraron incrementos en todos los tratamientos aplicados, con valores que oscilaron entre 25,05% y 36,67%. El tratamiento M4 presentó el mayor aumento con 36,67%, elevando la concentración desde 4,99 mg/L hasta 6,82 mg/L. Los tratamientos M2 y M1 alcanzaron incrementos similares de 30,46% y 29,86%, respectivamente, con concentraciones finales de 6,51 mg/L y 6,48 mg/L. Por su parte, M3 registró el menor aumento con 25,05%, alcanzando una concentración final de 6,18 mg/L. Estos resultados indican que los tratamientos aplicados favorecieron una mayor disponibilidad de oxígeno en el medio, condición que contribuye a mejorar la calidad del jugo tratado.

Tabla 6.

*Efecto de los tratamientos en las propiedades del jugo de *Furcraea macrophylla*.*

Tratamiento	DQO [mg/L O ₂]	Reducción DQO [%]	Turbidez [NTU]	Reducción Turbidez [%]	OD [mg/L]	Aumento OD [%]
M1	23.933	51,58	22,63	98,44	6,48	29,86
M2	23.350	52,76	15,97	98,90	6,51	30,46
M3	24.350	50,74	13,13	99,09	6,18	25,05
M4	21.350	56,81	11,40	99,21	6,82	36,67

Nota. Los porcentajes de reducción se calcularon utilizando como valores de referencia los parámetros fisicoquímicos del jugo de *F. macrophylla* no tratado

4.3.3 Condiciones fitoquímicas obtenidas del jugo tratado de *F. macrophylla*

Los ensayos fitoquímicos realizados sobre el jugo tratado de *F. macrophylla* evidenciaron una modificación en la presencia de metabolitos secundarios tras la aplicación de los tratamientos, tal como se presenta en la Tabla 7. Las saponinas mantuvieron su presencia abundante en todos los métodos de tratamiento evaluados confirmando su presencia dentro del perfil fitoquímico de la especie y sugiriendo su estabilidad frente a los procesos aplicados. En contraste, tanto los alcaloides como los flavonoides, inicialmente presentes en concentraciones moderadas, fueron removidos en todos los tratamientos, evidenciando una alta susceptibilidad a las condiciones fisicoquímicas empleadas. Esta remoción sugiere que los mecanismos de tratamiento actúan de manera específica sobre ciertos grupos de metabolitos, resultando en un jugo con un perfil fitoquímico simplificado dominado por saponinas.

Tabla 7.

Metabolitos secundarios en el jugo tratado de F. macrophylla.

Metabolitos	Prueba	M1	M2	M3	M4
Saponinas	Molisch	+++	+++	+++	+++
Alcaloides	Mayer	-	-	-	-
Flavonoides	Shinoda	-	-	-	-

Nota. Presencia abundante (+++), Presencia moderada (++) , Presencia leve (+), Ausencia (-)

4.3.4 Condiciones fisicoquímicas obtenidas del jugo tratado de *F. gigantea*

Los resultados de la aplicación de los tratamientos sobre el jugo de *F. gigantea* se presentan en la Tabla 8, en donde se evidencia un comportamiento diferencial principalmente en la reducción de la demanda química de oxígeno, reportando desempeños entre 0,00% y 13,63%. El tratamiento M4, que incorporó la combinación de NaOH, PAC y $Al_2(SO_4)_3$, alcanzó la máxima eficiencia de remoción con 13,63%, reduciendo la concentración de DQO desde el valor inicial de 42.183 mg/L O_2 hasta 36.433 mg/L O_2 . El tratamiento M3 (NaOH + $Al_2(SO_4)_3$) logró una reducción de 3,56% hasta 40.683 mg/L O_2 , mientras que M2 (NaOH + PAC) no presentó remoción alguna, sugiriendo que el PAC como agente individual no genera efecto sobre la carga orgánica en esta especie. Por su parte, el tratamiento M1, basado exclusivamente en

la alcalinización con NaOH, tampoco evidenció remoción de DQO, sugiriendo que el ajuste de pH por sí solo no tiene impacto en la reducción de materia orgánica para *F. gigantea*.

En términos de turbidez, todos los tratamientos demostraron una capacidad de clarificación, con reducciones superiores al 96%. El tratamiento M4 mostró el mejor desempeño con una reducción de 98,66%, disminuyendo la turbidez desde 1.014 NTU hasta 13,633 NTU. Los tratamientos M3, M2 y M1 alcanzaron reducciones de 98,26%, 97,64% y 96,89%, respectivamente, evidenciando que la implementación de los tratamientos potencia significativamente el proceso de clarificación.

En cuanto al oxígeno disuelto, se observaron incrementos en todos los tratamientos, con valores que oscilaron entre 2,16% y 20,83%. El tratamiento M4 registró el mayor aumento con 20,83%, elevando la concentración desde 5,09 mg/L hasta 6,15 mg/L. Los tratamientos M2 y M3 alcanzaron incrementos de 9,43% y 13,36%, respectivamente, con concentraciones finales de 5,57 mg/L para ambos casos. El tratamiento M1 presentó el menor incremento con 2,16%, alcanzando una concentración final de 5,20 mg/L.

Tabla 8.

Efecto de los tratamientos en las propiedades del jugo de Furcraea gigantea.

Tratamiento	DQO [mg/L O ₂]	Reducción DQO [%]	Turbidez [NTU]	Reducción Turbidez [%]	OD [mg/L]	Aumento OD [%]
M1	47.767	0,00	31,50	96,89	5,20	2,16
M2	42.183	0,00	23,97	97,64	5,57	9,43
M3	40.683	3,56	17,63	98,26	5,57	13,36
M4	36.433	13,63	13,63	98,66	6,15	20,83

Nota. Los porcentajes de reducción se calcularon utilizando como valores de referencia los parámetros fisicoquímicos del jugo de *F. gigantea* no tratado

4.3.5 Condiciones fitoquímicas obtenidas del jugo tratado de *F. gigantea*

Los ensayos fitoquímicos realizados sobre el jugo tratado de *F. gigantea* revelaron un comportamiento distinto en comparación con *F. macrophylla*, evidenciando la retención de metabolitos secundarios tras la aplicación de los tratamientos, tal como se evidencia en la Tabla 9. Las saponinas se mantuvieron con una intensidad abundante en todos los métodos evaluados, confirmando nuevamente su estabilidad frente a los procesos de tratamiento implementados. Sin embargo, a diferencia de *F.*

macrophylla, esta especie conservó una respuesta positiva para alcaloides y flavonoides, aunque con menor intensidad que en el jugo sin tratar. Los alcaloides se detectaron de forma leve en todos los tratamientos, mientras que los flavonoides se mantuvieron en un nivel moderado.

Tabla 9.

Metabolitos secundarios en el jugo tratado de F. gigantea.

Metabolitos	Prueba	M1	M2	M3	M4
Saponinas	Molisch	+++	+++	+++	+++
Alcaloides	Mayer	+	+	+	+
Flavonoides	Shinoda	++	++	++	++

Nota. Presencia abundante (+++), Presencia moderada (++), Presencia leve (+), Ausencia (-)

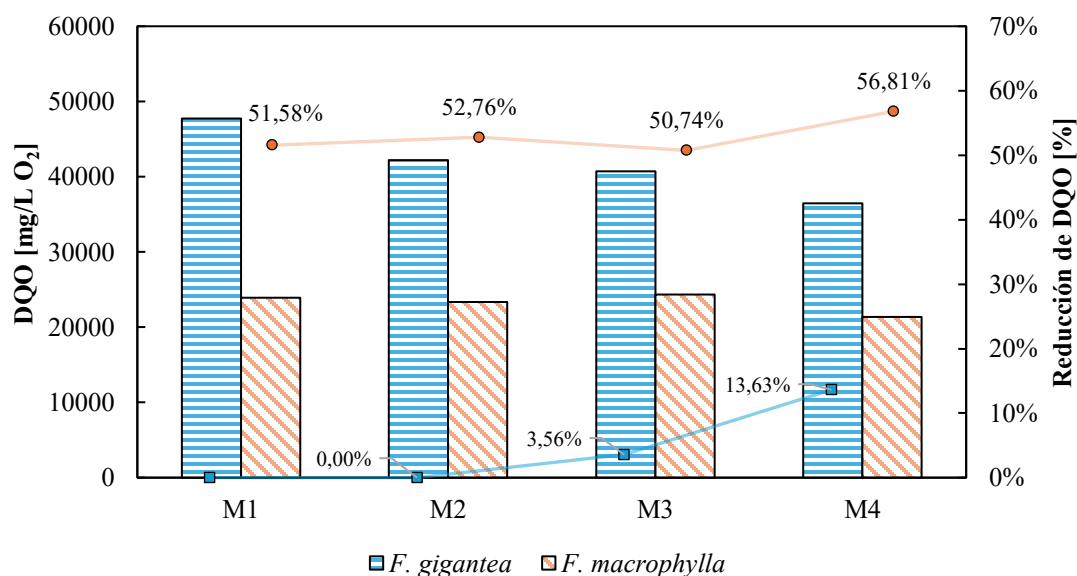
4.4 Análisis comparativo de desempeño

4.4.1 Demanda química de oxígeno

El desempeño de los métodos entre especies evidencia una marcada diferencia en la respuesta a los tratamientos aplicados. En la Figura 5, donde se presenta el desempeño en la disminución de la DQO, se observa que *F. macrophylla* demostró una mayor susceptibilidad a los tratamientos aplicados, reflejada en porcentajes más altos de remoción de materia orgánica medidos a través de la DQO, alcanzando eficiencias de reducción que superaron el 50% en todos los tratamientos evaluados, con un rango de variación relativamente estrecho de 6,07 puntos porcentuales entre el menor y mayor valor registrado. En contraste, *F. gigantea* presentó un menor desempeño, con eficiencias que no superaron el 14% y exhibieron una mayor variabilidad en su comportamiento. Esta diferencia se atribuye principalmente a las variaciones en la composición fitoquímica entre especies, particularmente en la concentración de metabolitos secundarios como flavonoides, donde *F. gigantea* mostró mayor presencia.

Figura 5.

Desempeño en la reducción de la DQO tras la aplicación de los tratamientos.



Nota. M1 (NaOH), M2 (NaOH + PAC), M3 (NaOH + Al₂(SO₄)₃), M4 (NaOH + PAC + Al₂(SO₄)₃)

Los flavonoides interfieren con los mecanismos de coagulación-floculación mediante quelación selectiva de cationes metálicos, particularmente Al³⁺ (Ochoa y Ayala, 2004), formando complejos aluminio-flavonoide que reducen la disponibilidad de especies activas de aluminio necesarias para la desestabilización coloidal, exhibiendo propiedades anticoagulantes que comprometen la eficiencia del tratamiento (Yarleque *et al.*, 2017). Esta interferencia se evidencia en el comportamiento observado entre especies, donde *F. gigantea*, con flavonoides inicialmente abundantes, mantuvo una presencia moderada tras la aplicación de los tratamientos, sugiriendo un exceso de estos metabolitos frente al aluminio disponible en los coagulantes y resultando en menores eficiencias de remoción de la DQO. Contrariamente, *F. macrophylla*, con flavonoides moderados que fueron completamente removidos tras el tratamiento, alcanzó mayores desempeños, sugiriendo que la concentración inicial moderada permitió una relación favorable entre los coagulantes y los flavonoides presentes, donde la cantidad de aluminio disponible fue suficiente, permitiendo una desestabilización coloidal más efectiva y, en consecuencia, mayores reducciones de la DQO.

Si bien los porcentajes de reducción de DQO obtenidos no alcanzan los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales establecidos en la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, representan una base sólida para el tratamiento del jugo de fique. Este residuo líquido, generado en el proceso agroindustrial y clasificado dentro de la fabricación de productos textiles, tiene un valor máximo permitido de 400 mg/L O₂ de DQO para vertimiento. En este contexto, los resultados obtenidos, particularmente para *F. macrophylla* con eficiencias de reducción entre 50,74% y 56,81%, superan significativamente los reportados en trabajos anteriores donde la electrocoagulación alcanzó 27,86% de remoción (Taborda *et al.*, 2011), evidenciando el potencial de optimización de los métodos de coagulación-floculación evaluados.

4.4.2 Turbidez

Posterior a la etapa de centrifugación, se evidenciaron diferencias en la intensidad de coloración entre las especies, donde *F. gigantea* exhibió una pigmentación amarilla intensa contrastando con la coloración amarilla tenue de *F. macrophylla*, variación que se atribuye a las propiedades de pigmentación de los flavonoides que generan una coloración amarilla tras el retiro del enmascaramiento ejercido por la clorofila durante el proceso de centrifugación (Martínez, 2005). El posterior proceso de inactivación enzimática mediante ácido sulfúrico generó modificaciones en el color, reduciendo la pigmentación de *F. gigantea* a una tonalidad amarilla tenue y provocando la completa transparencia de *F. macrophylla*, debido a la producción de formas sulfónicas incoloras que resultan de la acción del ácido sobre los flavonoides (Ochoa y Ayala, 2004). En la Figura 6 se presenta la documentación visual del jugo de *F. macrophylla* antes y después de los métodos de tratamiento aplicados. A su vez, la Figura 7 muestra el registro correspondiente a *F. gigantea*.

Figura 6.

Registro visual de los tratamientos aplicados sobre F. macrophylla.



Nota. De izquierda a derecha: sin tratamiento, M1, M2, M3 y M4.

Figura 7.

Registro visual de los tratamientos aplicados sobre F. gigantea

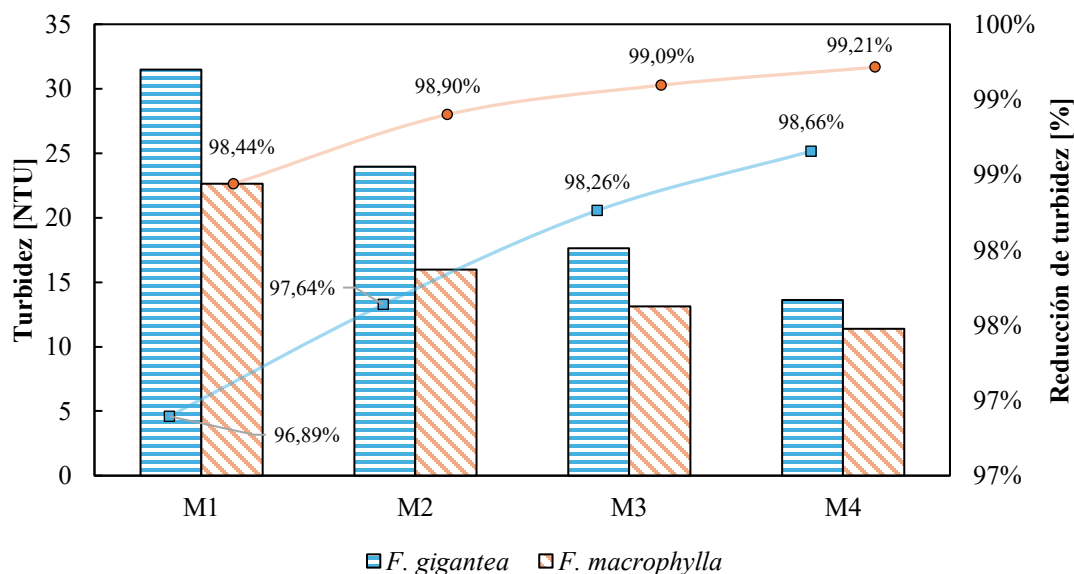


Nota. De izquierda a derecha: sin tratamiento, M1, M2, M3 y M4.

La evaluación de la turbidez como parámetro de clarificación demostró que todos los tratamientos aplicados lograron reducciones superiores al 96% en ambas especies. Como se observa en la Figura 8, donde se presenta el desempeño en la disminución de la turbidez, *F. macrophylla* presentó reducciones entre 98,44% y 99,21%, mientras que *F. gigantea* alcanzó valores entre 96,89% y 98,66%.

Figura 8.

Desempeño en la reducción de turbidez tras la aplicación de los tratamientos.



Nota. M1 (NaOH), M2 (NaOH + PAC), M3 (NaOH + Al₂(SO₄)₃), M4 (NaOH + PAC + Al₂(SO₄)₃)

La turbidez, determinada a partir de la dispersión de la luz ocasionada por partículas en suspensión, se reconoce como un indicador directo de la presencia de material particulado y coloidal en el medio (Marcó *et al.*, 2004). Los valores obtenidos, inferiores a 32 NTU en todos los casos, representan una mejora en las características organolépticas del jugo tratado. Esta diferencia en el desempeño entre especies se atribuye a las variaciones en la composición fitoquímica del jugo fresco analizada previamente, la cual influye directamente en los mecanismos de coagulación y sedimentación de partículas. Por ende, estas diferencias en los perfiles fitoquímicos condicionan la eficiencia en la remoción de material suspendido y coloidal en el jugo, reflejándose directamente en los valores de turbidez alcanzados entre especies.

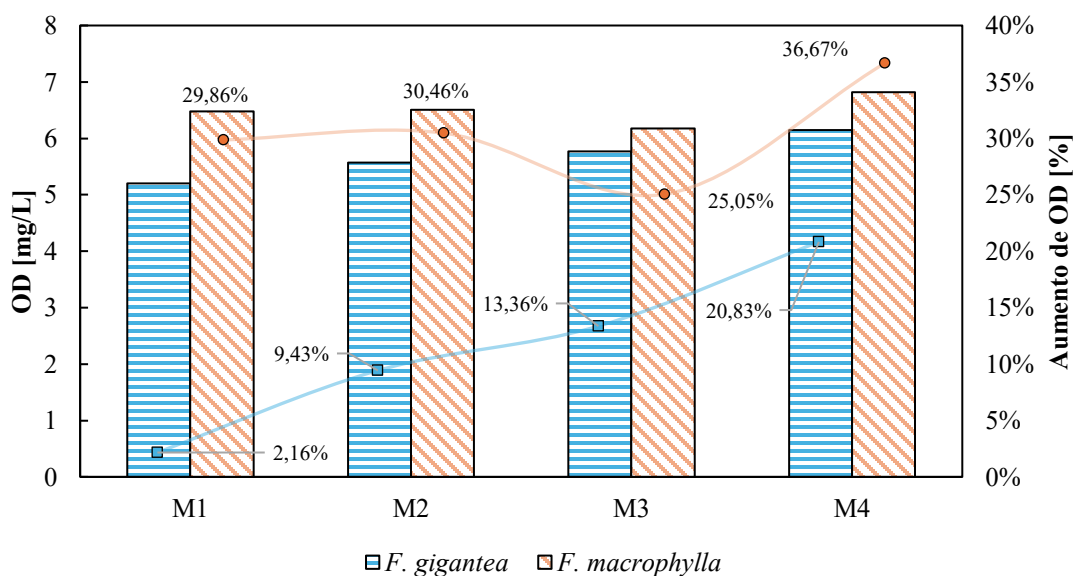
4.4.3 Oxígeno disuelto

En relación con el contenido de oxígeno disuelto, todos los tratamientos demostraron la capacidad de incrementar la disponibilidad de oxígeno en el jugo de ambas especies, aunque con diferencias en la magnitud de los aumentos obtenidos. Como se observa en la Figura 9, donde se presenta el desempeño en

el aumento del oxígeno disuelto, *F. macrophylla* presentó incrementos entre 25,05% y 36,67%, mientras que *F. gigantea* alcanzó valores entre 2,16% y 20,83%.

Figura 9.

Desempeño en el aumento del oxígeno disuelto tras la aplicación de los tratamientos.



Nota. M1 (NaOH), M2 (NaOH + PAC), M3 (NaOH + $Al_2(SO_4)_3$), M4 (NaOH + PAC + $Al_2(SO_4)_3$)

El comportamiento de los resultados obtenidos confirma la relación inversa existente entre la presencia de un alto contenido de materia orgánica y el consumo de oxígeno disuelto (Guarnizo *et al.*, 2024). Esta correlación se evidencia al comparar los desempeños de los tratamientos en ambos parámetros, aquellos métodos que lograron mayores reducciones de la DQO presentaron también los incrementos más significativos en oxígeno disuelto. Para *F. macrophylla*, el tratamiento M4, que alcanzó la mayor reducción de la DQO con 56,81%, también registró el mayor aumento en oxígeno disuelto con 36,67%. De manera similar, en *F. gigantea*, el mismo tratamiento que obtuvo la máxima reducción de la DQO (13,63%) presentó el mayor incremento en oxígeno disuelto (20,83%). La diferencia en magnitud entre especies se explica por la efectividad de los tratamientos en la remoción de materia orgánica. *F. macrophylla*, al experimentar reducciones de la DQO superiores al 50% en todos los tratamientos, evidenció incrementos mayores en

oxígeno disuelto. En contraste, *F. gigantea*, con eficiencias de remoción de la DQO más reducidas, mostró aumentos más moderados en la disponibilidad de oxígeno disuelto.

Esta relación se fundamenta en el principio de que los compuestos orgánicos presentes en el jugo requieren oxígeno para ser descompuestos por los microorganismos, estableciendo así una demanda constante sobre el oxígeno disponible en el medio, cuanto mayor sea la concentración de materia orgánica, mayor será la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitarán para degradarla completamente (Posada y Mosquera, 2007). Al reducir la carga orgánica mediante los tratamientos aplicados, se disminuye la competencia por el oxígeno disuelto, resultando en mayor disponibilidad de este en el medio (Guarnizo *et al.*, 2024). El incremento observado en el oxígeno disuelto aporta como indicador de la efectividad de los tratamientos en la reducción de la carga contaminante y representa una mejora significativa en la calidad del jugo tratado.

4.5 Valorización tecnológica

De acuerdo con los resultados fitoquímicos obtenidos después de la aplicación del tratamiento M4 en el jugo de fique, seleccionado como la alternativa más adecuada, se evidenció una presencia abundante de saponinas en ambas especies (*F. macrophylla* y *F. gigantea*), así como presencia moderada de flavonoides y leve de alcaloides en *F. gigantea*. Considerando estos metabolitos secundarios presentes en el jugo tratado, se realizó una revisión bibliográfica para identificar estrategias de valorización tecnológica. Sin embargo, dada la limitada disponibilidad de estudios específicos sobre fique, las aplicaciones de valorización propuestas se fundamentaron en investigaciones realizadas con otros materiales vegetales que presentan perfiles fitoquímicos similares, adaptando su potencial aplicación al contexto del jugo de fique tratado.

Se aplicó una matriz de Pugh considerando tres criterios principales de evaluación en las alternativas tecnológicas analizadas: la viabilidad económica, definida por la relación entre los costos del proceso y el beneficio económico del producto obtenido; el impacto ambiental, asociado al consumo de

recursos, al uso de insumos químicos y a la generación de residuos derivados de cada alternativa; y la viabilidad técnica, que contempla el grado de desarrollo o madurez de la tecnología, la complejidad operativa, la infraestructura requerida y la facilidad de implementación. Adicionalmente, para cada criterio se estableció un sistema de calificación: favorable (1) cuando la alternativa aporta ventajas frente al criterio analizado, neutro (0) cuando no existen diferencias claras o la información es intermedia, y desfavorable (-1) cuando se identifican limitaciones o efectos negativos.

4.5.1 Aplicaciones tecnológicas de las saponinas

Según Benavides *et al.*, (2012) las saponinas son moléculas constituidas por agliconas no polares unidas a una o más fracciones de monosacáridos, una estructura que combina regiones polares y no polares y que les confiere propiedades tensoactivas. Estas características explican su capacidad para generar espumas estables y formar complejos con distintas moléculas, lo que ha permitido su uso tradicional en detergentes y limpiadores faciales. De este modo, Duque y Gonzáles (1999) reportaron que las saponinas presentes en el jugo de fique se destacan como surfactantes naturales, principalmente por su capacidad de generar espuma, reducir la tensión superficial y actuar como agentes desengrasantes. Por otra parte, sus aplicaciones se extienden al ámbito agrícola, donde Hoyos *et al.*, (2012) evaluaron el jugo de fique (*Furcraea* sp.) como agente de control de plagas en cultivos de repollo (*Brassica oleracea*), basándose en la actividad tóxica y antimicótica atribuida a las saponinas. De este modo, en consideración con lo previamente mencionado, en la Tabla 10 se sintetizan las alternativas junto con la aplicación de los criterios de evaluación empleados en la matriz de Pugh, teniendo en cuenta los hallazgos de la bibliografía que sustentan la valoración otorgada en cada criterio y que se desarrollan en el análisis posterior.

Tabla 10.

Matriz de Pugh para la valorización tecnológica de saponinas.

Criterio	Surfactantes naturales	Insecticidas
Viabilidad económica	1	-1
Impacto ambiental	1	1
Viabilidad técnica	1	0
Total	3	0

Nota. Condición favorable (1), Condición neutra (0), Condición desfavorable (-1)

La evaluación del uso de saponinas como surfactantes naturales ha mostrado resultados prometedores en términos de eficiencia técnica. Vélez y Velásquez (2020) reportaron en procesos de extracción de saponinas a partir del jugo de fique, eficiencias del 87,45% utilizando tecnologías de bajo consumo energético, simplicidad tecnológica y solventes inocuos como agua y etanol. Esta eficiencia de extracción se complementa con las evaluaciones de Chen *et al.*, (2010), quienes compararon la capacidad detergente de las saponinas extraídas de *Camellia oleifera* con compuestos comerciales, determinando que soluciones al 0,5% de extracto crudo de saponinas eliminaron 53,8% de sebo, mientras que el lauril sulfato de sodio y el Tween 80 alcanzaron 90,4% y 77,6% respectivamente, configurando un panorama favorable (+1) respaldado por la eficiencia comprobada y la simplicidad del proceso.

Esta capacidad funcional justifica la condición favorable en viabilidad económica. Según Vélez y Velásquez (2020), quienes señalaron que la producción representa una opción económicamente viable (+1) al permitir obtener un surfactante a través de procesos de floculación con bajo consumo energético y aplicabilidad directa sobre la matriz de interés. Los mismos autores indicaron que la producción puede generar un impacto ambiental positivo (+1) al tener potencial para reducir significativamente la DQO y la DBO₅ de los efluentes en las plantas de beneficio, mientras que Faccioli *et al.*, (2024) demostraron que los biosurfactantes exhiben biodegradabilidad inmediata según directrices de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), contribuyendo a reducir riesgos de toxicidad a largo plazo en ambientes marinos, contrastando favorablemente con los surfactantes derivados del petróleo.

En contraste, la aplicación técnica como control biológico presenta un panorama más complejo. Hoyos *et al.*, (2012) demostraron efectividad insecticida evaluando soluciones del extracto de fique en concentraciones de 10, 20 y 30% v/v sobre *Brassica oleracea*, obteniendo reducciones significativas en la incidencia de mariposa (*Pieris sp.*), palomilla (*Plutella xylostella*) y áfidos (*Brevicoryne brassicae* y *Myzus persicae*), atribuyendo estos resultados a la actividad tóxica y antimicótica de las saponinas. Sin embargo, esta efectividad contrasta con los desafíos identificados por Francis *et al.*, (2002) quienes advirtieron que persisten limitaciones asociadas al entendimiento de las rutas biosintéticas, dificultando la estandarización de métodos y la evaluación de eficacia en aplicaciones a gran escala, configurando así una condición neutra (0) al contar con efectividad demostrada, pero con limitaciones para su escalamiento.

De acuerdo con Hameed *et al.*, (2025) las limitaciones técnicas identificadas en el uso de saponinas para control de plagas se reflejan también en desafíos económicos, dado que su implementación depende de factores productivos. Los autores señalan que los requerimientos de formulación para garantizar estabilidad junto con las dificultades de escalabilidad condicionan su competitividad frente a plaguicidas sintéticos, desfavoreciendo económicamente su aplicación (-1) por altos costos de formulación y baja competitividad alcanzada. Paralelamente, aunque Hussain *et al.*, (2019) indicaron que las saponinas representan una alternativa prometedora por su actividad bioquímica que interfiere en procesos digestivos de insectos, De Geyter *et al.*, (2012) advirtieron sobre efectos adversos potenciales en organismos no objetivo, incluyendo insectos benéficos como polinizadores que deben ser tenidos en cuenta al momento de su implementación. No obstante, su potencial radica en los beneficios ambientales a largo plazo, puesto que contribuyen a la reducción del impacto ecológico y su aplicación en prácticas agrícolas orgánicas que buscan la producción sostenible de pesticidas naturales y la disminución de la huella ambiental (Casas y Crisancho, 2022), lo que configura una condición favorable para su aplicación a largo plazo (+1) por su menor toxicidad y aporte a prácticas sostenibles.

4.5.2 Aplicaciones tecnológicas de los flavonoides

De acuerdo con Ruiz *et al.*, (2017) la actividad antioxidante de los flavonoides se relaciona con la presencia de grupos hidroxilo capaces de donar electrones por resonancia y estabilizar radicales libres. De manera complementaria, Hassanpour *et al.*, (2023) indican que esta propiedad antioxidante contribuye a prevenir cambios de color, sabor y olor en los alimentos. Por otra parte, en el ámbito cosmético Filho *et al.*, (2016) reportaron que estos metabolitos presentan una absorción significativa en las regiones ultravioleta A y B, atribuida a su estructura química, lo que les otorga un alto potencial para su incorporación en formulaciones destinadas a la protección de la piel frente a la radiación UVB y UVA. De este modo, en consideración con lo previamente mencionado, la Tabla 11 reúne las alternativas evaluadas y su valoración según los criterios aplicados en la matriz de Pugh, considerando los hallazgos bibliográficos que respaldan cada calificación asignada y que se explican con mayor detalle en el análisis posterior.

Tabla 11.

Matriz de Pugh para la valorización tecnológica de flavonoides.

Criterio	Antioxidantes	Agente fotoprotector
Viabilidad económica	-1	-1
Impacto ambiental	1	1
Viabilidad técnica	1	0
Total	1	0

Nota. Condición favorable (1), Condición neutra (0), Condición desfavorable (-1)

La evaluación del uso de flavonoides como antioxidantes naturales ha sido documentada en estudios experimentales que analizaron su capacidad para inhibir procesos oxidativos. Choi *et al.*, (2002) evaluaron la actividad antioxidante de flavonoides extraídos de diversas plantas de Corea mediante la inhibición de la *xantina oxidasa* y la peroxidación del ácido linoleico, reportando porcentajes de inhibición de hasta 82%. Esta capacidad antioxidante contrasta con los resultados de Burda y Oleszk (2001), quienes reportaron que antioxidantes sintéticos como el butilhidroxitolueno (BHT) presentaron actividades inhibitorias entre 88 y 95%, evidenciando una diferencia de eficiencia que limita la competitividad directa de los flavonoides naturales. Sin embargo, Ruiz *et al.*, (2017) señalaron que, aunque las eficiencias de los

flavonoides son ligeramente menores que los antioxidantes sintéticos, siguen siendo suficientemente altas para la aplicabilidad en matrices alimentarias y respaldar su potencial de escalabilidad, lo que configura una condición técnica favorable (+1) por su efectividad comprobada y aplicabilidad industrial. Asimismo, estos autores destacaron que la utilización de flavonoides como metabolitos de origen vegetal se relaciona con la posibilidad de obtenerlos sin recurrir a procesos de síntesis química, los cuales generan emisiones y residuos contaminantes, favoreciendo ambientalmente su aplicación (+1). No obstante, Arias *et al.*, (2011) reportaron que para su aplicación como antioxidantes es necesario emplear técnicas de obtención eficientes, como la extracción asistida por ultrasonidos combinada con purificación mediante resina macroporosa, procesos que pueden llegar a incrementar el contenido total de flavonoides en los extractos de *Chionanthus retusus* hasta 121,28 mg·g⁻¹ con una purificación del 88,51%, implicando un aumento en los costos de producción que configura económicamente una condición desfavorable (-1).

En contraste, la aplicación técnica como agentes fotoprotectores presenta un panorama distinto. Stevanato *et al.*, (2014) evaluaron diversos flavonoides individuales, extraídos de diversos materiales vegetales no especificados, encontrando factores de protección que variaron desde 7,3 hasta 28,8. Sin embargo, los autores señalaron que los flavonoides aislados generalmente no proporcionan valores de SPF satisfactorios por sí solos y estudios en el campo cosmético deben conducirse asociando estos metabolitos con filtros sintéticos para reducir sus concentraciones mediante diferentes combinaciones, ya que usar el flavonoide solo para proporcionar fotoprotección aparentemente no es una opción ventajosa. De manera complementaria, Choquenot *et al.*, (2008) demostraron que la asociación de la quercetina (un tipo de flavonoide) con filtros como dióxido de titanio incrementó significativamente los valores de protección, confirmando que los efectos sinérgicos mejoran el desempeño y respaldan el uso de flavonoides en formulaciones fotoprotectoras, aunque la eficacia limitada de los compuestos aislados impide considerarlos plenamente competitivos (0).

Paralelamente a estos desafíos técnicos, los flavonoides presentan consideraciones ambientales y económicas que influyen en su viabilidad como agentes fotoprotectores. Fonseca *et al.*, (2023) señalaron

que los flavonoides, al estar presentes en una amplia variedad de materiales vegetales, pueden incorporarse en protectores solares con formulaciones más sustentables y ecológicas, constituyendo una alternativa con menor impacto ambiental frente a los filtros UV sintéticos convencionales (+1). Los mismos autores indicaron que esta característica representa un hito obligatorio en las tendencias de las industrias farmacéutica y cosmética hacia productos más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, advirtieron que el desarrollo de estas formulaciones con flavonoides cargados en nanosistemas representa posibles nuevas formulaciones con mayor potencial de fotoprotección UVA y un perfil mejorado comparado con formulaciones sintéticas convencionales, pero requiere estrategias especializadas para combinar los activos derivados de las plantas con filtros UV sintéticos, implicando inversiones adicionales en investigación y desarrollo de nanoformulaciones especializadas desfavoreciendo económicamente su aplicación (-1).

4.5.3 Aplicaciones tecnológicas de los alcaloides

Los alcaloides presentan aplicaciones tecnológicas vinculadas con su estructura química y actividad biológica. En el campo de los biosensores Al-Azzawi *et al.*, (2023) señalaron que los alcaloides extraídos de *Catharanthus roseus* poseen la capacidad para formar enlaces de hidrógeno y exhiben reactividad asociada a diversos grupos funcionales. Por otro parte, al igual que las saponinas, donde en análisis anteriores demostraron potencial en el control de plagas, Karakoti *et al.*, (2023) reportaron que los alcaloides exhiben de manera general actividades pesticidas que se reflejan en propiedades antifúngicas, antivirales, antibacterianas, insecticidas, nematocidas y herbicidas, con más de 20.000 alcaloides identificados de significancia farmacológica y toxicológica en diversos materiales vegetales. En este contexto, la Tabla 12 se sintetizan las alternativas junto con la aplicación de los criterios de evaluación empleados en la matriz de Pugh, teniendo en cuenta los hallazgos de la bibliografía que sustentan la valoración otorgada en cada criterio y que se desarrollan en el análisis posterior.

Tabla 12.

Matriz de Pugh para la valoración tecnológica de alcaloides.

Criterio	Biosensores	Pesticidas botánicos
Viabilidad económica	1	0
Impacto ambiental	-1	1
Viabilidad técnica	-1	0
Total	-1	1

Nota. Condición favorable (1), Condición neutra (0), Condición desfavorable (-1)

La aplicación técnica de los alcaloides como biosensores muestra un panorama que aún requiere ajustes para su implementación práctica. Durante los estudios experimentales realizados por Al-Azzawi *et al.*, (2023) en la fabricación de biosensores amperométricos basados en compuestos alcaloides derivados de nanopartículas de extracto de *Catharanthus Roseus*, identificó una respuesta lineal para la detección de cadmio (metal pesado causante de contaminación ambiental), en agua dentro del rango de 0,02 a 0,16 ppm. No obstante, según lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), este rango no se encuentra cercano al valor guía para cadmio en agua potable de 0,003 mg/L (equivalente a 0,003 ppm) en sus directrices sobre calidad del agua potable, lo que en conjunto traduce un panorama desfavorable para el objetivo regulatorio de detección (-1).

Paralelamente a estos desafíos técnicos, los biosensores basados en compuestos alcaloides presentan consideraciones ambientales que influyen en su viabilidad. Pabón *et al.*, (2020) señalan que los metales pesados como el cadmio, mercurio y plomo son altamente tóxicos incluso a bajas concentraciones, debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación en organismos vivos. En este sentido, la ausencia de una detección temprana o en bajas concentraciones de estas sustancias en las fuentes hídricas implicaría efectos tóxicos o daños graves en los organismos vivos (Moreno, 2005), por lo que, bajo las capacidades técnicas reportadas, el balance ambiental resulta desfavorable (-1).

En términos de viabilidad económica, Al-Azzawi *et al.*, (2023) reportaron que la fabricación de biosensores a partir de extractos alcaloides de *Catharanthus roseus* emplea materiales de bajo costo y amplia disponibilidad comercial, como quitosano con pureza del 98%, tripolifosfato de sodio y anhídrido

maleico, además de procesos de extracción convencionales tipo Soxhlet a 50 °C. Según los autores, el uso de insumos estandarizados y accesibles facilita la obtención de nanopartículas y su integración con compuestos los alcaloídicos. Asimismo, indicaron que los electrodos modificados conservaron estabilidad química durante seis meses bajo condiciones de almacenamiento controlado, lo que se relaciona con la reducción en la frecuencia de reposición y los costos de operación (+1).

Por el contrario, la evaluación del uso de alcaloides como pesticidas botánicos ha mostrado resultados prometedores en términos de eficiencia técnica. Raghavendra *et al.*, (2009) señalaron que extractos alcaloides de *Prosopis juliflora*, comúnmente llamado mezquite en México, alcanzaron concentraciones inhibitorias mínimas (MIC) de 4 a 6 µg/mL frente a diferentes especies de *Xanthomonas* (bacterias), mientras que Shaheen y Issa (2020) reportaron que extractos de *Peganum harmala* o ruda siria evidenciaron zonas de inhibición de entre 7,67 y 26,67 mm frente a bacterias como *Ralstonia solanacearum*, *Erwinia amylovora*, *Pectobacterium carotovorum* y *Burkholderia gladioli*. No obstante, Wu *et al.*, (2021) señalaron que, aunque la investigación sobre las propiedades pesticidas de los alcaloides ha avanzado en los últimos años, aún se encuentra en etapa de consolidación que requiere mayor desarrollo para optimizar formulaciones y métodos de aplicación, configurando así una condición neutra (0) al contar con resultados experimentales alentadores pero con la necesidad de superar limitaciones para su aplicación a gran escala.

Paralelamente a estos aspectos técnicos, los alcaloides presentan consideraciones ambientales y económicas que influyen en su desarrollo comercial. Wu *et al.*, (2021) reportaron que el uso de pesticidas botánicos está creciendo en popularidad debido a su baja toxicidad, descomposición rápida y compatibilidad ambiental, debido a la disminución de los riesgos de contaminación asociados al uso de agroquímicos convencionales, sugiriendo un panorama ambientalmente favorable (+1). Sin embargo, Karakoti *et al.*, (2023) señalaron que existe una amplia variedad de alcaloides identificados de significancia farmacológica y toxicológica, evidenciando un vasto potencial, pero también la necesidad de investigación extensa para identificar y desarrollar los compuestos más prometedores. Por su parte, Wu *et al.*, (2021)

advirtieron que la comercialización exitosa depende de inversiones en investigación para optimizar métodos de extracción, formulación y evaluación de eficacia a gran escala, evidenciando así una condición de rentabilidad neutra (0) dado que la disponibilidad de materias primas se ve contrarrestada por exigencias de desarrollo tecnológico.

5. Conclusiones

Los métodos de tratamiento evaluados establecieron una línea base sólida para la reducción de la carga orgánica del jugo de fique, con eficiencias diferenciadas que se atribuyen principalmente por las variaciones en el perfil fitoquímico entre especies. El tratamiento M4, que integró la aplicación combinada de hidróxido de sodio (NaOH), policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), demostró el mejor desempeño, alcanzando reducciones en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), como indicador de la presencia de materia orgánica, del 56,81% para *F. macrophylla* y 13,63% para *F. gigantea*. Asimismo, se obtuvieron reducciones de turbidez del 99,21% y 98,66%, y aumentos del oxígeno disuelto del 36,67% y 20,83%, respectivamente.

La revisión bibliográfica orientada a identificar estrategias de valorización tecnológica a partir de materiales vegetales con perfiles fitoquímicos semejantes al jugo de fique tratado permitió establecer alternativas prometedoras, respaldadas mediante la aplicación de la matriz de Pugh, revelando un panorama favorable de oportunidades para el aprovechamiento de los metabolitos secundarios remanentes tras el tratamiento M4.

El desarrollo de surfactantes naturales se destacó como una alternativa prometedora para la valorización de las saponinas, con eficiencias de extracción reportadas en la literatura del 87,45%, ofreciendo ventajas económicas por el aprovechamiento de subproductos residuales sin costo de materia prima y ventajas ambientales por biodegradabilidad inmediata según directrices de la OCDE frente a surfactantes derivados del petróleo.

Las investigaciones consultadas demostraron el potencial de los flavonoides como antioxidantes naturales con hasta 82% de inhibición oxidativa, aportando ventajas ambientales al reducir la dependencia de compuestos sintéticos, pero con limitaciones económicas vinculadas a los altos costos de extracción y purificación que comprometen su competitividad comercial frente a antioxidantes sintéticos con eficiencias del 88-95%.

La literatura reportada señaló que los alcaloides poseen potencial como pesticidas botánicos con ventajas ambientales asociadas a su menor toxicidad y descomposición rápida comparado con agroquímicos convencionales, pero con limitaciones económicas derivadas de los requerimientos de investigación y desarrollo para optimizar formulaciones.

Referencias bibliográficas

- Al-Azzawi, M. A., & Saleh, W. R. (2023). Fabrication of Environmental Monitoring Amperometric Biosensor Based on Alkaloids Compound Derived from *Catharanthus Roseus* Extract Nanoparticles for Detection of Cadmium Pollution of Water. *Chemical Methodologies*, 7(5), 358–371. <https://doi.org/10.22034/CHEMM.2023.380792.1643>
- Annu, & Raja, A. N. (2020). Recent development in chitosan-based electrochemical sensors and its sensing application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 4231–4244. 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.012
- Arias, R. S., Techen, N., Rinehart, T. A., Olsen, R. T., Kirkbride, J. H., & Scheffler, B. E. (2011). Development of simple sequence repeat markers for *Chionanthus retusus* (Oleaceae) and effective discrimination of closely related taxa. *HortScience*, 46(1), 23–29. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.1.23>
- Arroyave, P., & Velasquez, D. (2001). Aprovechamiento integral de *Furcraea macrophylla*. Backer. Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Procesos, Medellín.
- Arteaga Dalgo, M., Andrade Cuvi, M. J., & Moreno Guerrero, C. (2014). Relación del desarrollo del color con el contenido de antocianinas y clorofila en diferentes grados de madurez de mortiño (*Vaccinium floribundum*). *Enfoque UTE*, 5(2), 14-28.
- Bacca Erazo, Diana Jhazmina (2012) Estudio fitoquímico del jugo de fique de las especies negra común (*Furcraea gigantea*) y uña de águila (*Furcraea macrophylla*) de los municipios de El Tambo y Guaitarilla (Nariño). Project Report. Universidad de Nariño, Pasto.
- Bulugahapitiya, V. P. (2013). Plants based natural products extraction, isolation and phytochemical screening methods (1ra. ed.). Matara, Sri Lanka: Indika Graphics.
- Burda, S., & Oleszek, W. (2001). Antioxidant and antiradical activities of flavonoids. *Journal of agricultural and food chemistry*, 49(6), 2774–2779. <https://doi.org/10.1021/jf001413m>

- Casas Pinzón, M y Cristancho Vega, J. (2022). Determinación de la actividad plaguicida de las saponinas presentes en la cáscara de las semillas de la especie vegetal quinua (*Chenopodium quínoa*) para aplicación en cultivos de fresa (*Fragaria albión*). Corporación Tecnológica de Bogotá. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/5005>
- Castro Herazo, C. I., Betancur Velez, M., Rios Arango, J. A., Posada Quintero, L., & Jiménez G, F. J. (2024). Caracterización fisicoquímica y evaluación ambiental del jugo generado durante la extracción de la fibra de fique (*Furcraea* sp). Revista EIA, 21(42), 1-19. <https://doi.org/10.24050/reia.v21i42.1770>
- Castro Rivera, Jhon Alexander, Baquero Duarte, Lucia Estrella, & Narváez Cuenca, Carlos Eduardo. (2006). CATALASA, PEROXIDASA Y POLIFENOLOXIDASA DE PITAHAYA AMARILLA (*Acanthocereus pitajaya*). Revista Colombiana de Química, 35(1), 91-100. Retrieved September 16, 2025, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042006000100009&lng=en&tlng=es.
- Chen, Y. F., Yang, C. H., Chang, M. S., Ciou, Y. P., & Huang, Y. C. (2010). Foam Properties and Detergent Abilities of the Saponins from *Camellia oleifera*. International Journal of Molecular Sciences 2010, Vol. 11, Pages 4417-4425, 11(11), 4417–4425. <https://doi.org/10.3390/IJMS11114417>
- Chirinos, D. T., Castro, R., Cun, J., Castro, J., Peñarrieta Bravo, S., Solis, L., & Geraud-Pouey, F. (2019). Los insecticidas y el control de plagas agrícolas: la magnitud de su uso en cultivos de algunas provincias de Ecuador: la magnitud de su uso en cultivos de algunas provincias de Ecuador. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), 1–16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:1276
- Choi, C. W., Kim, S. C., Hwang, S. S., Choi, B. K., Ahn, H. J., Lee, M. Y., Park, S. H., & Kim, S. K. (2002). Antioxidant activity and free radical scavenging capacity between Korean medicinal plants and flavonoids by assay-guided comparison. *Plant Science*, 163(6), 1161–1168. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00332-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00332-1)
- Choquenot B, Couteau C, Papis E, Coiffard LJM (2008). Quercetin and rutin as potential sunscreen agents: determination of efficacy by an in vitro method. *J. Nat. Prod.* 71(6):1117-1118.

- Coral, M., & Guevara, A. (2012). Determinación de las propiedades térmicas del jugo de fique *Furcraea* spp. de las variedades uña de águila y negra común, provenientes del municipio de el Tambo-Nariño.
- Dagua Mosquera, C., Dagua Mosquera, D., & Morales, S. (2008). Evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique en el municipio de Totoró - Cauca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 6(2), 47–55. Recuperado a partir de <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/690>
- De Geyter, E., Swevers, L., Caccia, S., Geelen, D., & Smagghe, G. (2012). Saponins show high entomotoxicity by cell membrane permeation in Lepidoptera. *Pest Management Science*, 68(8), 1199–1205. <https://doi.org/10.1002/PS.3284>
- Delgado Muñoz, Elizabeth (2018) Aprovechamiento de los residuos agroindustriales del beneficio del fique. Project Report. Universidad de Nariño, Pasto.
- Díaz Mora, Jhon Jairo Y Meneses Armero, Giovanni Alejandro (2012) Obtención y evaluación de un biofertilizante foliar a partir de jugo de fique variedad negra común (*Furcraea gigantea*), en un cultivo de acelga (*Beta vulgaris*) variedad Cicla L. en el municipio de Guaitarilla, departamento de Nariño. Project Report. Universidad de Nariño, Pasto.
- Domínguez, X. (1973). Métodos de investigación fitoquímica. Editorial Limusa . México
- Duque, J. A., & González, L. P. (1999). Propuesta tecnológica para la producción de un agente tensoactivo biodegradable a partir del jugo del fique como desecho del proceso de desfibrado. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Medellín, Colombia.
- Durán González, D. V. y Gómez Gutiérrez, A. F. (2022) Determinación del uso de los residuos de fique provenientes del proceso de desfibrado, como sustrato para la producción de sorbitol. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8829>
- Europea, U. (2020). Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. *D Unión Eur*, 53, 1-62.

- Faccioli, Y. E. da S., de Oliveira, K. W., Campos-Guerra, J. M., Converti, A., Soares da Silva, R. de C. F., & Sarubbo, L. A. (2024). Biosurfactants: Chemical Properties, Ecofriendly Environmental Applications, and Uses in the Industrial Energy Sector. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 5042, 17(20), 5042. <https://doi.org/10.3390/EN17205042>
- Filho, J. M. T. A., Sampaio, P. A., Pereira, E. C. V., de Oliveira JÃºnior, R. G., Silva, F. S., Almeida, J. R. G. S., Rolim, L. A., Nunes, X. P., & AraÃºjo, E. C. C. (2016). Flavonoids as photoprotective agents: A systematic review. *Journal of Medicinal Plants Research*, 10(47), 848-864.
- Forero, Luz & Bernal, Hugo & Chaves-Guerrero, Arlex. (2015). Efecto de las variables de evaporaci3n: presi3n y flujo cal3rico en la calidad de la panela. *Corpoica Ciencia y TecnologÃa Agropecuaria*. 16. 7. 10.21930/rcta.vol16_num1_art:376.
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, HPS y Becker, K. (2002). La acci3n biol3gica de las saponinas en sistemas animales: una revisi3n. *British Journal of Nutrition*, 88 (6), 587–605. <https://doi.org/10.1079/BJN2002725>
- Fuentes Rivas, Rosa MarÃa, Ramos Leal, Jos3 Alfredo, Jim3nez Mole3n, MarÃa del Carmen, & Esparza Soto, Mario. (2015). Caracterizaci3n de la materia org3nica disuelta en agua subterr3nea del Valle de Toluca mediante espectrofotometrÃa de fluorescencia 3D. *Revista internacional de contaminaci3n ambiental*, 31(3), 253-264. Recuperado en 20 de septiembre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000300005&lng=es&tlng=es.
- Guarnizo Crespo, D. M., Lapo Escobar, L. M., & Rodriguez IÃ±iguez, D. L. (2024). Medici3n de la DQO como Par3metro Eficaz en el Control Ambiental en Descargas de 3reas Urbanas . *Ciencia Latina Revista CientÃfica Multidisciplinar*, 8(4), 9399-9417. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13083
- Hameed, M. S., Urooj, N., Basit, A., Abbas, A. N., & Qasim, M. (2025). Exploring the potential of saponins from Dicotyledonous plants in sustainable pest management: Innovations and challenges: A review. *Journal of Natural Pesticide Research*, 11, 100111. <https://doi.org/10.1016/J.NAPERE.2025.100111>

- Hassanpour, S. H., & Doroudi, A. (2023). Review of the antioxidant potential of flavonoids as a subgroup of polyphenols and partial substitute for synthetic antioxidants. *Avicenna journal of phytomedicine*, 13(4), 354–376. <https://doi.org/10.22038/AJP.2023.21774>
- Hoyos, J. I., Velasco, S. M., & Lopez, N. A. (2012). Utilización del subproducto de fique: licor verde, como controlador de plagas en el cultivo de repollo (*brassica oleracea*). *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 109-115.
- Hussain, M., Debnath, B., Qasim, M., Steve Bamisile, B., Islam, W., Hameed, M. S., Wang, L., & Qiu, D. (2019). Role of Saponins in Plant Defense Against Specialist Herbivores. *Molecules* 2019, Vol. 24, Page 2067, 24(11), 2067. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24112067>
- Karakoti, Himani & Mahawer, Sonu & Kabdal, Tanuja & Kumar, Ravendra & Prakash, Om. (2023). Alkaloids as Botanical Pesticides for Plants Protection.
- Lorenzo Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, XL(2), 10–17. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Lozano Rivas, William Antonio. (2012). Uso del extracto de fique (*Furcraea* sp.) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 219-227. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992012000300004&lng=es&tlng=es.
- Marcó, L.N., Azario, R.R., Metzler, C., & García, M.D. (2004). Turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay, Entre, Ríos, Argentina.
- Martínez, A. (2005). *Flavonoides*. Medellín: Universidad de Antioquia, Facultad de Química Farmacéutica.
- Menéndez Gutiérrez, C. (2022). La sedimentación secundaria en los tratamientos biológicos de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(3), 24-33.

- Moreno Rabasco, M. C. (2005). Valoración del residuo de rapa de uva como bioadsorbente para la eliminación de cadmio de efluentes acuosos. <https://hdl.handle.net/2099.1/3126>
- Murillo-Serna, J. S., Rincón-Barón, E. J., & Alzate-Guarín, F. (2018). Anatomía foliar comparativa de tres especies de *Furcraea* (Asparagaceae: Agavoideae). *Hoehnea*, 45, 607-615.
- Ochoa M, C. I., & Ayala A, A. A. (2004). Los Flavonoides: Apuntes Generales y su Aplicación en la Industria de Alimentos. *Ingeniería Y Competitividad*, 6(2), 64-74. <https://doi.org/10.25100/iyc.v6i2.2280>
- Ovalle Serrano, Sergio A., Blanco-Tirado, C., & Combariza, M. Y. (2018). Exploring the composition of raw and delignified Colombian fique fibers, tow and pulp. *Cellulose*, 25(1), 151-165. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1599-9>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre ciencia e ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Posada Uribe, Luisa Fernanda & Mosquera López, Sandra. (2007). Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas. <http://hdl.handle.net/10784/362>
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley.
- Raghavendra, M. P., Satish, S., & Raveesha, K. A. (2009). Alkaloids isolated from leaves of *Prosopis juliflora* against *Xanthomonas pathovars*. *Archives of Phytopathology and Plant protection*, 42(11), 1033-1041.
- Rojas Salas, M. C., & Luque Turriago, J. E. (2012). Biofungicida a partir del jugo de fique (*Furcraea* spp.) y evaluación de su efectividad sobre la gota (*Phytophthora infestans*) en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). *Revista Digital Educación En Ingeniería*, 7(13), 13-22. <https://doi.org/10.26507/rei.v7n13.162>
- Rojas Salas, Myriam Carmenza (2008) Caracterización fisicoquímica del jugo de fique (*Furcraea* spp.), elaboración y evaluación de un biofungicida útil en el control agroecológico de la gota (*Phytophthora Infestans*) en la papa. <https://sired.udenar.edu.co/12218/>

- Ruiz Cruz, S., Chaparro Hernández, S., Ruiz, K. L. H., Cira Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Ortega, L. E. G., ... Mata, M. A. L. (2017). Flavonoids: Important Biocompounds in Food. InTech. <https://doi.org/10.5772/67864>
- Stevanato R, Bertelle M, Fabris S (2014). Photoprotective characteristics of natural antioxidant polyphenols. Regul. Toxicol. Pharm. 69:71-77.
- Taborda O., G., Zuluaga R., V., Palomá P, L., & Penagos González, J. P. (2011). Aplicación de métodos electroquímicos en la remoción de materia orgánica en los jugos producto del beneficio del fique: alternativa biotecnológica para mitigar la contaminación en los afluentes hídricos. Revista Nova publicación científica En Ciencias biomédicas, 9(16), 166-169. <https://doi.org/10.22490/24629448.1063>
- Vasco Echeverri, Óscar, Ramírez Carmona, M. ., Vélez Salazar, Y. ., & Giraldo Ramírez, M. (2014). Producción de bioetanol empleando fermentación tradicional y extractiva a partir de jugo de fique. Hechos Microbiológicos, 4(2), 91–97. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.21090>
- Vélez Salazar, Y. H., & Velásquez Flórez, M. A. (2020). Diseño Conceptual de una Planta de Extracción de Saponinas Presentes en el Jugo de Fique. Ingeniería, 25(1), 50–67. <https://doi.org/10.14483/23448393.15298>
- Vera, Alexandra, Andrade, Charity, Flores, Eddymar, Núñez, Marisel, Cárdenas, Carmen, & Morales, Ever. (2010). Remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal construido en función del desarrollo de la macrófita *Typha dominguensis* Pers. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 33(2), 153-163. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702010000200006&lng=es&tlng=es.
- Villota Montezuma, J. F., & Pantoja Agreda, C. H. (2015). Evaluación de un bioinsumo a partir del jugo del fique (*Furcraea* spp.) para el control de la roya (*Hemileia vastatrix*) en el café, variedad Caturra. Revista De Investigaciones De UNIAGRARIA, 3(1), 81-94. <https://doi.org/10.33133/riu-3-2015-93>

- World Health Organization. (2011). Cadmium in Drinking-Water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Geneva: WHO Press.
<https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cadmium.pdf>
- Wu, Y., Ren, D., Gao, C., Li, J., Du, B., Wang, Z., & Qian, S. (2021). Recent advances for alkaloids as botanical pesticides for use in organic agriculture. *International Journal of Pest Management*, 1-11.
- Yan, X., Rahman, S., Rostami, M., Tabasi, Z. A., Khan, F., Alodhayb, A., & Zhang, Y. (2021). Carbon quantum dot-incorporated chitosan hydrogel for selective sensing of Hg²⁺ ions: Synthesis, characterization, and density functional theory calculation. *ACS omega*, 6(36), 23504-23
- Yarleque, Mirtha & Armando, Yarlequé & Zaldivar, Miguel & Bonilla, Bonilla. (2017). Aislamiento de Fracciones Anticoagulantes de una Planta Medicinal Andina *Mutisia acuminata* "chinchircuma".
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36076.90249>

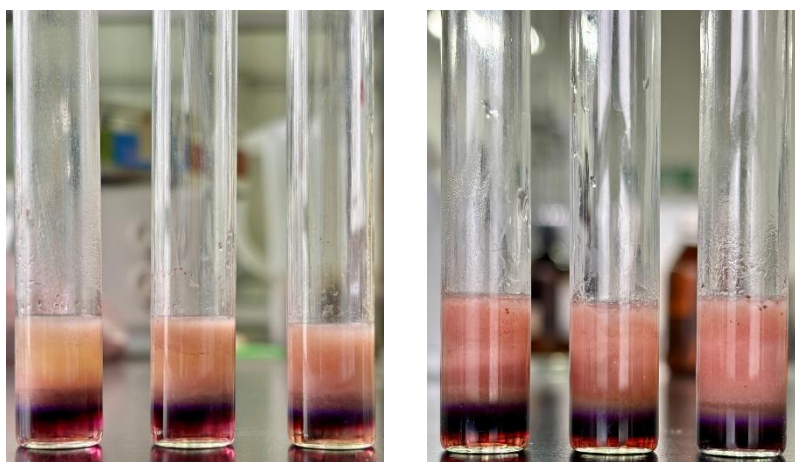
Apéndice

Apéndice A. Prueba de Molisch

En la Figura A.1 se presenta la documentación visual de la aplicación de la prueba de Molisch en el jugo fresco de ambas especies sin tratamiento. A su vez, la Figura A.2 muestra la aplicación de la misma prueba en el jugo tratado mediante los diferentes métodos evaluados.

Figura A.1.

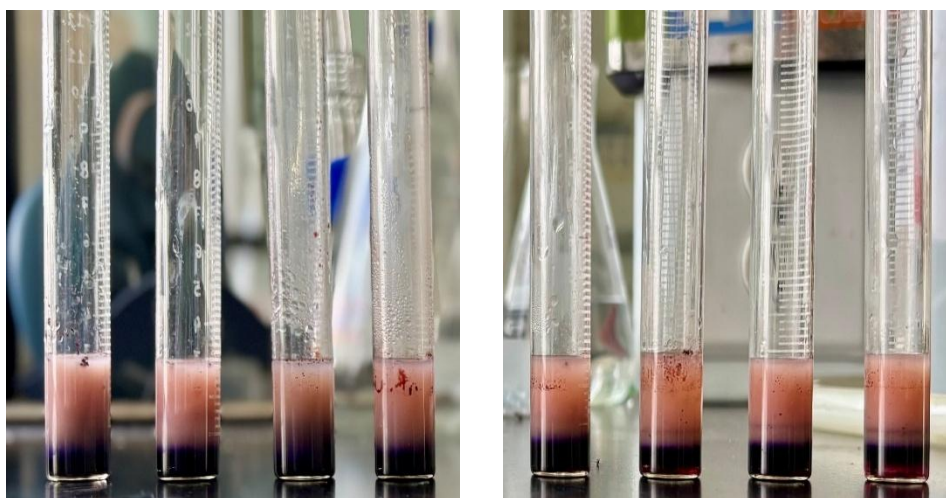
Prueba de Molisch para saponinas en el jugo sin tratamiento.



Nota. Izquierda: F. macrophylla. Derecha: F. gigantea

Figura A.2.

Prueba de Molisch para saponinas en el jugo con tratamiento.



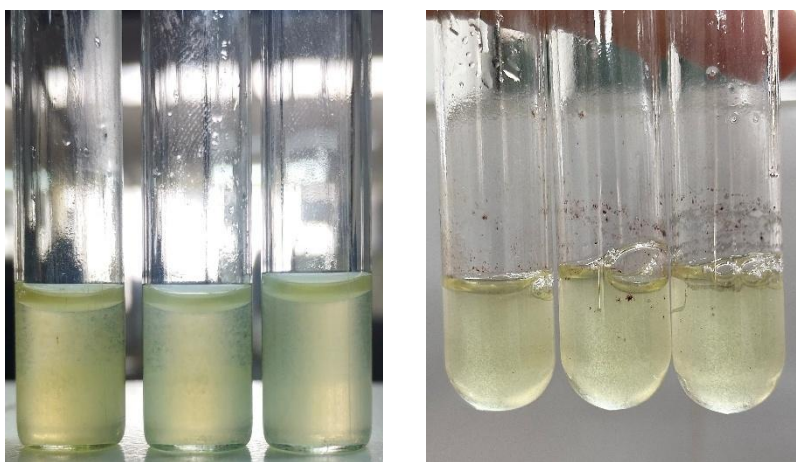
Nota. Izquierda: F. macrophylla (M1 a M4). Derecha: F. gigantea (M1 a M4).

Apéndice B. Prueba de Mayer

En la Figura B.1 se presenta la documentación visual de la aplicación de la prueba de Mayer en el jugo fresco de ambas especies sin tratamiento. A su vez, la Figura B.2 muestra la aplicación de la misma prueba en el jugo tratado mediante los diferentes métodos evaluados.

Figura B.1.

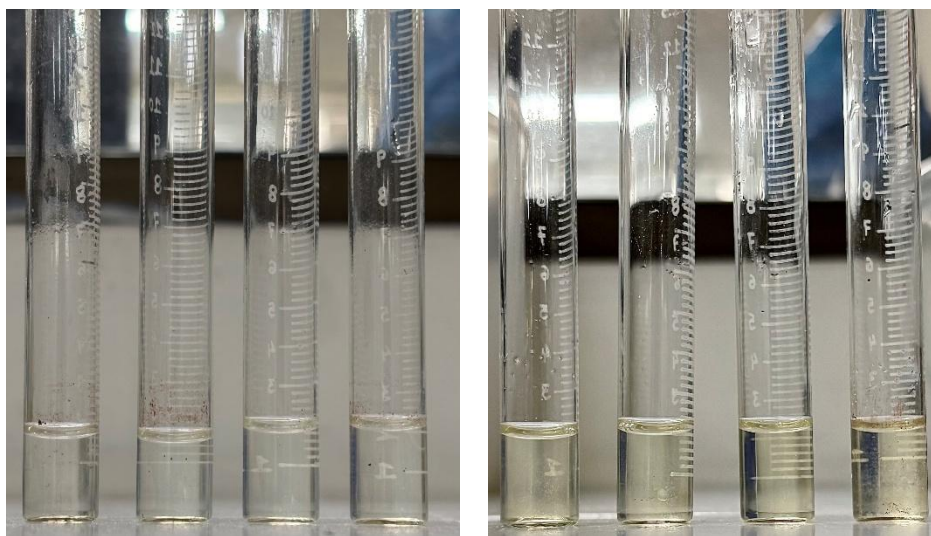
Prueba de Mayer para alcaloides en el jugo sin tratamiento.



Nota. Izquierda: *F. macrophylla*. Derecha: *F. gigantea*

Figura B.2.

Prueba de Mayer para alcaloides en el jugo con tratamiento.



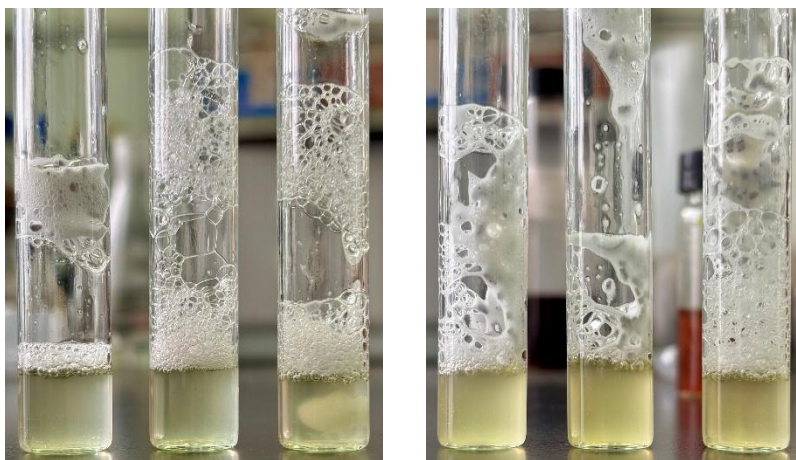
Nota. Izquierda: *F. macrophylla* (M1 a M4). Derecha: *F. gigantea* (M1 a M4).

Apéndice C. Prueba de Shinoda

En la Figura C.1 se presenta la documentación visual de la aplicación de la prueba de Shinoda en el jugo fresco de ambas especies sin tratamiento. A su vez, la Figura C.2 muestra la aplicación de la misma prueba en el jugo tratado mediante los diferentes métodos evaluados.

Figura C.1.

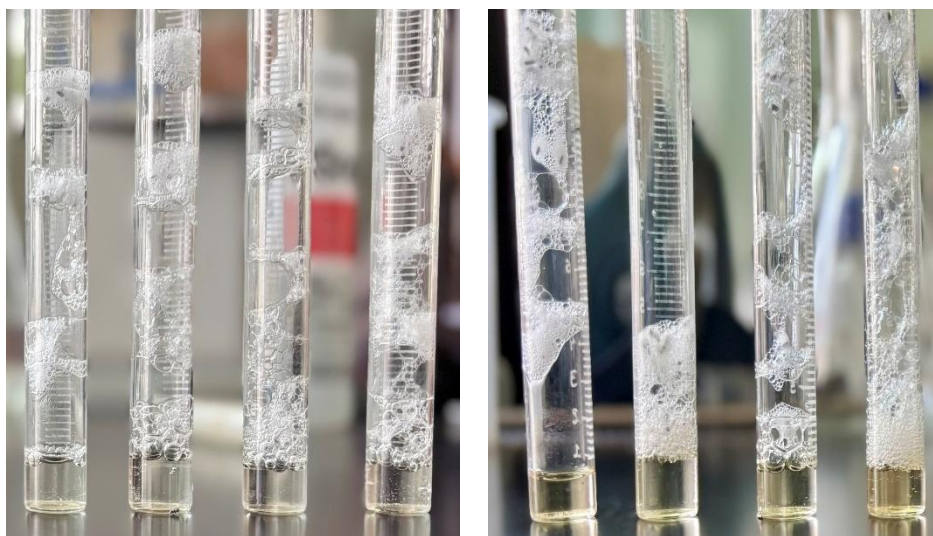
Prueba de Shinoda para flavonoides en el jugo sin tratamiento.



Nota. Izquierda: *F. macrophylla*. Derecha: *F. gigantea*

Figura C.2.

Prueba de Shinoda para flavonoides en el jugo con tratamiento.



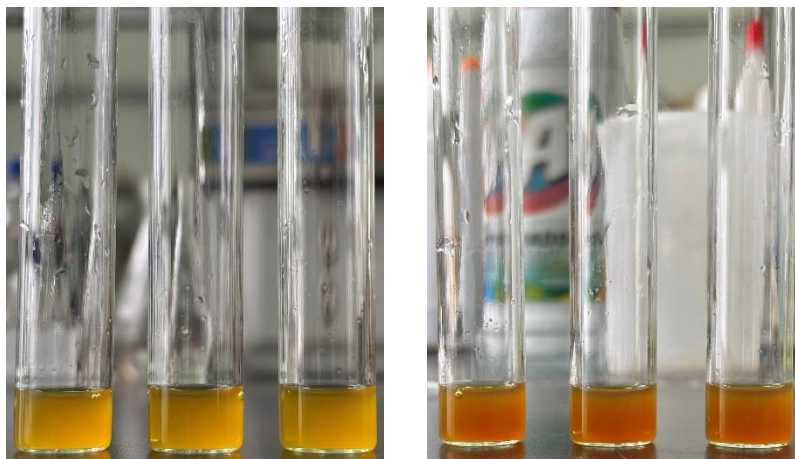
Nota. Izquierda: *F. macrophylla* (M1 a M4). Derecha: *F. gigantea* (M1 a M4).

Apéndice D. Prueba de cloruro férrico

En la Figura D.1 se presenta la documentación visual de la aplicación de la prueba de cloruro férrico en el jugo fresco de ambas especies sin tratamiento.

Figura D.1.

Prueba de cloruro férrico para taninos en el jugo sin tratamiento.



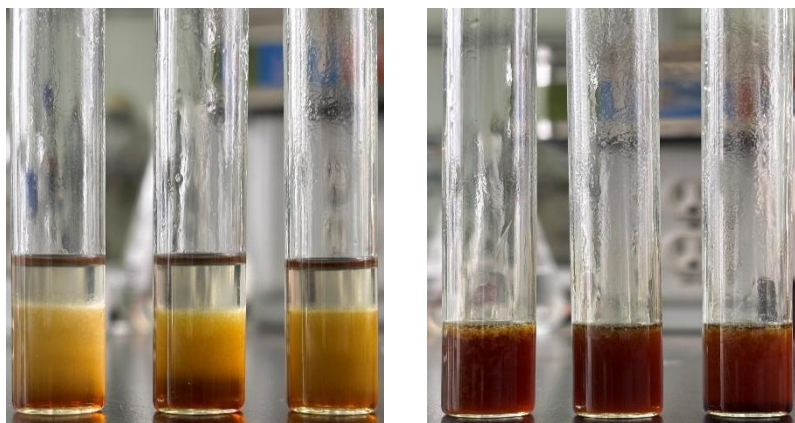
Nota. Izquierda: *F. macrophylla*. Derecha: *F. gigantea*

Apéndice E. Prueba de Liebermann-Burchard

En la Figura E.1 se presenta la documentación visual de la aplicación de la prueba de Liebermann-Burchard en el jugo fresco de ambas especies sin tratamiento.

Figura E.1.

Prueba de Liebermann-Burchard para esteroides en el jugo sin tratamiento.



Nota. Izquierda: *F. macrophylla*. Derecha: *F. gigantea*