Universidad Popular del Cesar | Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO, A PARTIR DE GEOMEMBRANAS ELABORADAS CON *PSEUDOTALLO* DE PLÁTANO, PARA OPTIMIZAR LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA UTILIZADA EN LA FINCA EL TAMARINDO DE LA VEREDA ESTADOS UNIDOS, MUNICIPIO DE BECERRIL

Ingeniería Ambiental y Sanitaria

AUTORES:

ENERIETH RANGEL MONSALVE

SANTIAGO JAVIER PERTUZ MARTINEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026

Universidad Popular del Cesar | Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO, A PARTIR DE GEOMEMBRANAS ELABORADAS CON *PSEUDOTALLO* DE PLÁTANO, PARA OPTIMIZAR LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA UTILIZADA EN LA FINCA EL TAMARINDO DE LA VEREDA ESTADOS UNIDOS, MUNICIPIO DE BECERRIL

AUTORES:

ENERIETH RANGEL MONSALVE

SANTIAGO JAVIER PERTUZ MARTINEZ

DIRECTOR

LINA PATRICIA RODRIGUEZ BECERR

MAGISTER EN PEDAGOGIA AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

CODIRECTOR

JOSE MAURICIO PEREZ

MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026

DEDICATORIA

Con gratitud y un profundo sentido de reconocimiento, dedico este proyecto a Dios, presente en los momentos decisivos de este proceso y en cada paso que exigió fortaleza y determinación. A mi madre, por su apoyo constante, por creer incluso cuando el camino se hacía difícil y por ser ese impulso que nunca me permitió detenerme. Este logro no proviene de un camino perfecto, sino de uno lleno de retos, aprendizajes y esfuerzos sostenidos. En cada avance y en cada obstáculo superado se refleja el acompañamiento y la confianza que hicieron posible llegar hasta aquí. Más que un requisito académico, este trabajo representa una meta alcanzada con constancia, compromiso y el respaldo de quienes fueron fundamentales en este proceso de formación profesional.

Santiago Javier Pertuz Martínez

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para alcanzar esta meta. A mi madre, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida y ejemplo de lucha constante. Gracias por no rendirte nunca, incluso en los días más difíciles, por darme todo sin esperar nada a cambio, solo con el propósito de verme salir adelante. Tu amor y sacrificio han sido la base de cada uno de mis logros. Este triunfo también te pertenece, porque sin ti no habría sido posible. A mi hermana, por ser ese apoyo incondicional en cada momento. Gracias por estar presente y darme fuerzas cuando más lo necesitaba. A ustedes, con todo mi amor, les dedico este sueño hecho realidad.

Enerieth Rangel Monsalve

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de corazón a Duver Andrés Verano López y Jhon César De La Torre Bedoya, con quienes tuve la fortuna de recorrer este camino desde el inicio hasta el final; más que compañeros y amigos, se convirtieron en mis hermanos, en ese apoyo incondicional que hizo más llevaderos los momentos difíciles y más significativos cada uno de los logros. También quiero expresar mi gratitud a Jair José Socarrás Díaz por sus ideas y por el apoyo brindado en el desarrollo de este proyecto, siendo una base importante desde sus inicios, así como a Enerieth Rangel Monsalve, mi compañera de tesis, con quien compartí esfuerzo, compromiso y la satisfacción de alcanzar juntos esta meta tan importante. De igual manera, agradezco a la Universidad Popular del Cesar por abrirme sus puertas y formarme en este proceso, y de manera especial a la docente Lina Patricia Rodríguez Becerra, directora de tesis, por su guía, paciencia y acompañamiento, fundamentales para hacer posible la culminación de este logro.

Santiago Javier Pertuz Martínez

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este importante logro académico. En especial, a mis amigas Karina Andrea Charris Mata, Eva Sofía Morelo Navarro y Dayana Andrea Cervantes Guerra, quienes han estado conmigo desde el inicio de la carrera. Juntas enfrentamos cada semestre con esfuerzo, dedicación y perseverancia, creciendo tanto personal como académicamente. Nuestra amistad y aprendizaje son parte fundamental de este logro alcanzado. Asimismo, agradezco a mi compañero de tesis, Santiago Javier Pertuz Martínez, por su esfuerzo, disciplina y compromiso para sacar adelante nuestro proyecto. Agradezco especialmente a la Universidad Popular del Cesar por abrirme sus puertas y a la docente Lina Patricia Rodríguez Becerra, directora de tesis, por su orientación, paciencia y constante acompañamiento.

Enerieth Rangel Monsalve

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema piloto de filtración utilizando una geomembrana elaborada a partir del pseudotallo de plátano para el tratamiento de agua destinada al consumo humano en la finca El Tamarindo. La investigación surgió ante la necesidad de buscar alternativas sostenibles y de bajo costo para mejorar la calidad del agua en zonas rurales con acceso limitado a sistemas convencionales de potabilización. La metodología desarrollada incluyó la selección y preparación del pseudotallo de plátano, la elaboración de la geomembrana filtrante mediante fibras vegetales estabilizadas con almidón de yuca, la caracterización física y química del material filtrante y el diseño e implementación de un sistema piloto operado por gravedad. Posteriormente, se realizaron pruebas de filtración y análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después del tratamiento, evaluando además la durabilidad de la geomembrana a partir de la disminución del caudal de filtración. Los resultados evidenciaron reducciones significativas en parámetros como turbidez, sólidos suspendidos, conductividad y carga microbiológica, alcanzando valores compatibles con los criterios establecidos en la normatividad colombiana para agua potable. Asimismo, la geomembrana presentó una vida útil aproximada de 20 días bajo las condiciones experimentales evaluadas, manteniendo estabilidad estructural y funcionalidad durante el proceso. Se concluye que el pseudotallo de plátano posee potencial como material filtrante en sistemas alternativos de tratamiento de agua, representando una opción sostenible, accesible y viable para aplicaciones rurales a pequeña escala.

Palabras clave: pseudotallo de plátano, geomembrana filtrante, tratamiento de agua, filtración natural, biomateriales.

ABSTRACT

This project aimed to design and implement a pilot filtration system using a geomembrane made from banana pseudostems for treating drinking water at the El Tamarindo farm. The research arose from the need to find sustainable and low-cost alternatives to improve water quality in rural areas with limited access to conventional water treatment systems. The methodology included the selection and preparation of banana pseudostems, the fabrication of the filtering geomembrane using plant fibers stabilized with cassava starch, the physical and chemical characterization of the filter material, and the design and implementation of a gravity-operated pilot system. Subsequently, filtration tests and physicochemical and microbiological analyses of the water were performed before and after treatment, also evaluating the durability of the geomembrane by assessing the reduction in filtration flow rate. The results showed significant reductions in parameters such as turbidity, suspended solids, conductivity, and microbiological load, reaching values compatible with the criteria established in Colombian regulations for drinking water. Furthermore, the geomembrane exhibited an approximate lifespan of 20 days under the evaluated experimental conditions, maintaining structural stability and functionality throughout the process. It is concluded that the banana pseudostem has potential as a filter material in alternative water treatment systems, representing a sustainable, accessible, and viable option for small-scale rural applications.

Keywords: banana pseudostem, filter geomembrane, water treatment, natural filtration, biomaterials.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

DEDICATORIA 3

AGRADECIMIENTOS 4

RESUMEN 5

ABSTRACT 6

INTRODUCCIÓN 12

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14

1.1 Formulación del problema 15

2 JUSTIFICACIÓN 16

3 OBJETIVOS 18

3.1 OBJETIVO GENERAL 18

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

4 MARCO REFERENCIAL 19

4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 19

4.2 MARCO TEÓRICO 23

4.2.1 Agua potable 23

4.2.1.1 Parámetros físico-químicos del agua potable 23

4.2.1.2 Parámetros microbiológicos del agua potable 24

4.2.1.3 Problemáticas actuales de acceso a agua potable en zonas rurales y vulnerables 25

4.2.2 Tratamiento de agua potable 26

4.2.2.1 Procesos Convencionales de Tratamiento de Agua 26

4.2.2.2 Tecnologías Alternativas y Sostenibles para el Tratamiento de Agua 27

4.2.2.2.1 Filtración como Técnica de Tratamiento 28

4.2.3 El pseudotallo de plátano como material de filtración....28
4.2.3.1 Composición Química y Propiedades Físico-Mecánicas del Pseudotallo 29
4.2.3.2 Potencial del Pseudotallo como Material para Filtración 29
4.2.3.2.1 Bioadsorción 29
4.2.3.2.2 Porosidad....30
4.2.3.2.3 Retención de Contaminantes....30
4.3 MARCO CONCEPTUAL 30
4.4 MARCO CONTEXTUAL. 32
4.4.1.1 Geografía....33
4.4.1.2 Economía 33
4.5 MARCO LEGAL....34
5 MARCO METODOLÓGICO....36
5.1 LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN 36
5.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN 36
5.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN....36
5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO 36
5.5 MUESTRA POBLACIONAL 37
5.6 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 37
5.7 DESARROLLO METODOLÓGICO....39
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS 55
6.1 CARACTERIZAR EL AGUA CRUDA CAPTADA DEL RÍO ALTOS DE MANANTIAL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS (PH, ALCALINIDAD, TURBIEDAD, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV), DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) Y OXÍGENO DISUELTO), ASÍ COMO PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS (COLIFORMES TOTALES Y ESCHERICHIA

COLI), MEDIANTE LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007. 55

6.1.1 Muestreos de agua realizados 56

6.1.2 Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua cruda 58

6.1.3 Comparación de los resultados obtenidos con los estándares de calidad del agua potable 61

6.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO ELABORADA A PARTIR DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA ADAPTADO A LAS CONDICIONES DE LA FINCA EL TAMARINDO 65

6.2.1 Selección y preparación del pseudotallo de plátano 66

6.2.2 Obtención de la geomembrana filtrante a partir del pseudotallo de plátano 69

6.2.3 Caracterización del medio filtrante 73

6.2.4 Diseño e implementación del prototipo del sistema de filtración a escala piloto con geomembrana filtrante 76

6.2.5 Filtración del agua cruda y evaluación de la durabilidad de la geomembrana 82

6.2.6 Cálculo de la durabilidad de la geomembrana 85

6.3 EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA GEOMEMBRANA A BASE DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO, COMPARANDO LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS OBTENIDOS ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO, CONFORME A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007 Y EL DECRETO 1575 DE 2007. 88

6.3.1 Análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada 88

6.3.2 Comparación de los resultados con la caracterización inicial 92

6.3.3 Comparación de los resultados con la normatividad vigente 100

7 CONCLUSIONES 104

8 RECOMENDACIONES 107

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....110

10 ANEXOS 115

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. *Procesos Convencionales de Tratamiento de Agua* 27
Figura 2. *Tecnologías Alternativas y Sostenibles para el Tratamiento de Agua* 27
Figura 3. *Tipos de Filtración* 28
Figura 4. *Localización del área de estudio* 32
Figura 5. *Plano esquemático* 49
Figura 6. *Toma de muestra inicial* 57
Figura 7. *Captación del agua para el consumo humano* 57
Figura 8. *Vertimiento de agua de lavado al rio* 58
Figura 9. *Selección del pseudotallo de plátano* 67
Figura 10. *Limpieza y desinfección con peróxido de hidrógeno* 67
Figura 11. *Preparación del agente estabilizador* 70
Figura 12. *Geomembrana después del secado* 72
Figura 13. *Pruebas preliminares* 77
Figura 14. *Construcción del sistema* 79
Figura 15. *Construcción del prefiltro* 80
Figura 16. *Construcción de la cámara de filtración e instalación de la membrana* 81
Figura 17. *Sistema de filtración construido* 82
Figura 18. *Filtración del agua cruda* 83

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. *Marco legal aplicable al proyecto* 34
Tabla 2. *Variables del estudio* 37
Tabla 3. *Fases del experimento* 38
Tabla 4. *Métodos de análisis fisicoquímico* 40
Tabla 5. *Procedimiento para la caracterización del medio filtrante* 45
Tabla 6. *Paso a paso para el cálculo de la durabilidad de la geomembrana* 50
Tabla 7. *Tabla de registro* 51
Tabla 8. *Comparación de resultados* 53
Tabla 9. *Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua cruda antes del tratamiento* 59
Tabla 10. *Comparación de los resultados obtenidos con los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007* 61
Tabla 11. *Registro de monitoreo de caudal y vida útil de la geomembrana* 86
Tabla 12. *Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua tratada* 89
Tabla 13. *Comparación de resultados antes y después del proceso de filtración* 92
Tabla 14. *Porcentaje de remoción* 98
Tabla 15. *Comparación de resultados del agua filtrada con la normatividad vigente* 100

INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable continúa siendo uno de los principales desafíos ambientales en las zonas rurales de Colombia, donde múltiples comunidades aún dependen de fuentes de agua superficiales sin tratamiento previo para satisfacer sus necesidades domésticas y de consumo. Esta situación incrementa la exposición a contaminantes físicos, químicos y microbiológicos que afectan de forma directa la salud y la calidad de vida de la población, en este contexto, la finca El Tamarindo, ubicada en la vereda Estados Unidos del municipio de Becerril, presenta limitaciones relacionadas con el uso de agua cruda proveniente de una fuente de agua superficial cercana, que no cuenta con un sistema de tratamiento que garantice condiciones óptimas para su consumo.

Frente a esta problemática, el presente proyecto desarrolló el diseño e implementación de un sistema de filtración a escala piloto utilizando geomembranas elaboradas a partir de fibras obtenidas del pseudotallo de plátano (*Musa spp.),* aprovechando un residuo agroindustrial abundante en la región y con propiedades físico-mecánicas favorables para procesos de bioadsorción y retención de contaminantes. La investigación se orientó hacia la búsqueda de una alternativa sostenible, de bajo costo y técnicamente viable, que permitiera mejorar la calidad del agua utilizada en la finca, reduciendo parámetros críticos asociados a la turbidez, solidos suspendidos, carga orgánica y contaminación microbiológica.

Metodológicamente, el estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño experimental, en el cual se llevó a cabo la caracterización inicial del agua cruda, la obtención y caracterización del medio filtrante, el diseño del prototipo y la evaluación comparativa de la calidad del agua antes y después del tratamiento. Para ello, se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio, así como pruebas de desempeño hidráulico, durabilidad y eficacia de remoción del sistema implementado.

La importancia del proyecto radicó en su aporte técnico, ambiental y social, debido a que demostró el potencial del pseudotallo de plátano como biomaterial filtrante aplicable al tratamiento de agua en contextos rurales con acceso limitado a tecnologías y recursos que permitan la potabilización. Así mismo, mediante este proyecto se proporcionó una base

metodológica y experimental para futuras investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos en procesos de saneamiento básico.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global, el acceso a agua potable de alta calidad continúa siendo un reto esencial. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), cerca de 2.2 mil millones de individuos a nivel global carecen de acceso a agua potable segura, lo que ocasiona serios problemas de salud y bienestar (OMS, 2020). Este problema se intensifica en áreas rurales y en naciones en vías de desarrollo, donde las fuentes de agua suelen estar contaminadas con partículas suspendidas y sustancias químicas perjudiciales para la salud de las personas (Conejeros et al., 2021).

A pesar de que en Colombia se han logrado progresos en el acceso al agua potable, todavía existen retos significativos. De acuerdo con el Plan Departamental de Agua del Cesar, de los 25 municipios del departamento, únicamente 19 han presentado proyectos para ser contemplados en el mencionado plan, excluyendo a municipios como Aguachica, San Alberto, San Martín, Becerril, Manaure y Valledupar de la lista (El Pilón, 2022). Actualmente, a pesar de los intentos, elementos como la tramitología, el desconocimiento técnico de las administraciones municipales y la intervención política continúan prevaleciendo sobre las buenas intenciones, lo que justifica la persistente carencia de acceso al agua potable en diversas áreas del Cesar. Amaya et al. (2024) indican que municipios como Bosconia, Chiriguaná, Gamarra, Manaure, El Paso y Astrea suponen un alto peligro para la salud debido a la mala calidad del agua que sus residentes utilizan. Adicionalmente, los episodios de sequía, intensificados por el cambio climático, han impactado a las dos ciudades más importantes del Cesar, Valledupar y Aguachica.

En este contexto, la finca el Tamarindo ubicada en la vereda Estados Unidos en el municipio de Becerril enfrenta una problemática relacionada con el acceso al agua potable. Sus habitantes dependen del agua cruda proveniente de un río cercano para su consumo y actividades diarias lo que representa un riesgo para la salud y dificulta su calidad de vida. Según Bulla (2023) la falta de un sistema de tratamiento adecuado incrementa la exposición a contaminantes físicos y químicos presentes en el agua, lo que puede derivar en enfermedades de origen hídrico.

La ausencia de un sistema de filtración eficiente en la finca El Tamarindo se debe a la carencia de infraestructura adecuada y al desconocimiento sobre tecnologías de tratamiento accesibles para la comunidad, como consecuencia los habitantes consumen agua sin procesar y esto los expone a posibles afecciones gastrointestinales y otros problemas de salud. Además, según Salamanca (2016) las enfermedades transmitidas por el consumo de agua cruda pueden generar graves afectaciones en la salud humana en especial aquellas relacionadas con el sistema digestivo, por ejemplo, la diarrea, la fiebre, el vómito y la deshidratación y estas condiciones pueden agravarse cuando el agua contiene parásitos bacterias o virus lo cual incrementa el riesgo de infecciones intestinales severas e incluso provocar la muerte.

Si esta situación persiste es probable que las enfermedades de origen hídrico aumenten entre los habitantes, afectando su bienestar y productividad. De igual manera la contaminación del agua utilizada en labores agrícolas y pecuarias podría deteriorar la calidad de los productos y reducir la rentabilidad de la finca generando una afectación en la economía local. Ante esta problemática se hizo necesario implementar una alternativa de tratamiento accesible, sostenible y adaptable a las condiciones locales, que permitió el aprovechamiento de materiales disponibles en la región. En este sentido, el pseudotallo de plátano surgió como una opción viable debido a su estructura, porosidad y capacidad de bioadsorción.

1.1 Formulación del problema

¿Qué sistemas de filtración pueden implementarse en la finca El Tamarindo para purificar el agua cruda y mejorar sus parámetros fisicoquímicos, incluyendo el uso de membranas de pseudotallo de plátano?

2 JUSTIFICACIÓN

La ejecución de este proyecto respondió a la necesidad de diseñar e implementar un sistema de filtración a escala piloto utilizando membranas a base de pseudotallo de plátano para el tratamiento de agua potable en la finca El Tamarindo, ubicada en la vereda Estados Unidos del municipio de Becerril. A través de este estudio se pudo determinar la capacidad de este material para mejorar la calidad del agua como un tratamiento primario mediante la reducción de contaminantes físicos-químicos, contribuyendo así a una alternativa de potabilización accesible y sostenible.

Este proyecto es relevante porque permitió desarrollar una alternativa de tratamiento de agua basada en una membrana de filtración elaborada con pseudotallo de plátano, de igual manera se logró determinar la eficacia de este material en la mejora de la calidad del agua, contribuyendo a la reducción de contaminantes físicos químicos y microbiológicos que afectan la salud de la comunidad.

Mediante este estudio se generó una alternativa que brinda una solución accesible y sostenible para potabilizar el agua en condiciones similares a las de la finca El Tamarindo. Al emplear materiales naturales y de bajo costo se facilita la implementación de tecnologías adaptadas a comunidades rurales con recursos limitados. Además, este trabajo proporciona información técnica sobre la efectividad del pseudotallo de plátano como material filtrante lo que puede sirve de base para futuras investigaciones en el área del tratamiento de agua.

Desde el ámbito social, este proyecto benefició directamente a los habitantes y trabajadores de la finca El Tamarindo, al proporcionar una propuesta que mejora la calidad del agua y disminuye riesgos asociados a enfermedades de origen hídrico. Indirectamente, otras comunidades rurales con problemáticas similares también podrían beneficiarse replicando la tecnología desarrollada en este estudio.

Desde el ámbito académico, este estudio contribuyó al fortalecimiento de las lineas de investigación relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico y el desarrollo de tecnologías sostenibles para saneamiento, apostando evidencia experimental sobre el uso del pseudotallo de plátano como medio filtrante.

Este proyecto se ubica dentro de las directrices dictadas por la Resolución 2115 del 2007 y el Decreto 1575 del 2007, regulaciones que rigen los sistemas de supervisión y control de la calidad del agua destinada al consumo humano en Colombia. Estas normativas definen los estándares que el agua potable debe satisfacer en términos de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, asegurando de esta manera la salvaguarda de la salud pública. En este contexto, el estudio aporta a la observancia de estas regulaciones al sugerir una opción tecnológica que aspira a mejorar la calidad del agua en áreas rurales, fomentando el acceso a agua segura y adecuada para el consumo humano.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de filtración a escala piloto, a partir de geomembranas elaboradas con *pseudotallo* de plátano, para optimizar la calidad del agua cruda utilizada en la finca El Tamarindo de la vereda Estados Unidos, municipio de Becerril.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agua cruda captada del río altos de manantial mediante el análisis de sus parámetros físico-químicos (pH, alcalinidad, turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto), así como parámetros microbiológicos (coliformes totales y Escherichia coli), mediante los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007.
- Implementar la geomembrana de filtración a escala piloto elaborada a partir de *Pseudotallo* de plátano en un sistema de tratamiento de agua adaptado a las condiciones de la finca El Tamarindo
- Evaluar la eficacia de la geomembrana a base de pseudotallo de plátano, comparando los valores de los parámetros físico-químicos obtenidos antes y después del proceso, conforme a los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007.

4 MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presentan los aportes teóricos más recientes, que soportan este proyecto en donde se evidencian los antecedentes de investigación, el marco teórico que fundamenta la investigación, el marco conceptual en donde se abordan los conceptos más importantes en esta investigación, el marco contextual para mostrar la localización de la investigación y el marco legal con la normativa ambiental vigente.

4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Bedoya et al. (2023) elaboraron una investigación titulada: bioadsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. En este estudio se analizó la eliminación de metales pesados tales como zinc, níquel, hierro, cobre y cromo presentes en aguas residuales no domésticas derivadas de la industria de galvanoplastia en Medellín, Colombia, a través de un sistema discontinuo con biomasa de cáscara y pseudotallo de banana, obtenidos a través de procedimientos físicos sencillos. El propósito de este estudio fue evaluar su eficacia como bioadsorbentes y cotejarlos Para ello, los materiales fueron caracterizados a través de la FTIR, el punto isoeléctrico Boehm y la difracción de rayos X, hallando escasas diferencias en la composición química, morfología y estructura entre los bioadsorbentes. Además, antes del tratamiento se establecieron las características fisicoquímicas del agua, hallando concentraciones iniciales que superaban los límites máximos permitidos de acuerdo con la Resolución 0631 de 2015. Las evaluaciones de bioadsorción se llevaron a cabo a temperatura ambiente, pH de 3.65, y con una agitación de 200 rpm durante 2 horas, modificando la cantidad de adsorbente de 1 a 5 mg. Los porcentajes de eliminación más altos alcanzados fueron del 42.69 % para Zn, del 83.10 % para Ni, del 95.17 % para Fe, del 81.90 % para Cu y del 99.82% para Cr, demostrando resultados similares al carbón activado comercial. Este estudio contribuyo a esta investigación de manera metodológica y práctica bajo un enfoque técnico, puesto que demostró la eficacia de desechos agroindustriales como el pseudotallo y la cáscara de banana para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas, constituyendo una opción económica y sustentable en procesos de tratamiento.

Pawar, Bagali y Gowrishankar (2023) realizaron una investigación que tiene como nombre "Column study using modified banana pseudo stem as adsorbent for removal of Pb (II)". Ellos argumentan que los adsorbentes ecológicos, como el pseudotallo de banano, desempeñan un papel fundamental en la eliminación de metales pesados de las aguas residuales. Las industrias químicas y de recursos hídricos clave han tenido dificultades para eliminar metales pesados con los métodos convencionales existentes. El proceso de eliminación de plomo representa actualmente un reto para los científicos e ingenieros ambientales en términos de costo, eliminación de efluentes y seguridad. Por lo tanto, este trabajo demuestra la bioadsorción de Pb (II) en polvo de pseudotallo de banano modificado (MBPS) como posible adsorbente para el tratamiento de diferentes efluentes. Se realizó una caracterización del polvo de pseudotallo de banano modificado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), lo que confirma la presencia del material. Los experimentos se realizaron utilizando un proceso de columna para la eliminación de plomo (II) de una solución acuosa a una concentración fija de 50 ppm, pH 6 y un tiempo de contacto de 120 min. El área superficial BET del MBPS fue de 7,27 m^2/g. Los resultados mostraron que los estudios de columnas explican un mejor desempeño para la eliminación de Pb (II) y se encontró que la eliminación máxima fue del 49% a una velocidad de flujo más baja (5 mL/min) de concentración inicial fija de 50 ppm. Este análisis contribuyó a esta investigación de forma metodológica y práctica, particularmente desde un enfoque técnico, puesto que evidencia la utilidad de materiales naturales modificados como el pseudotallo de plátano para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados a través de métodos de bioadsorción en columna.

Rahman et al., (2022) realizaron una investigación titulada "Pseudo-stem banana fiber as a potential low-cost adsorbent to remove methylene blue from synthetic wastewater". En este trabajo, se utilizó fibra de pseudotallo de banano (Musa acuminata) (PBF) como posible adsorbente natural de bajo costo para la absorción del colorante azul de metileno (MB) de aguas residuales sintéticas mediante un proceso de bioadsorción por lotes. Se exploraron diferentes factores de bioadsorción, como el tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial y la dosis de adsorbente, y se observó que el proceso de separación depende en gran medida del pH. Además, los datos de bioadsorción se ajustaron con diversas isotermas de bioadsorción, como

los modelos de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radhushkevich, para detectar el fenómeno de equilibrio de bioadsorción. La cinética de la reacción se inspeccionó utilizando modelos cinéticos de pseudoprimer y segundo orden. Los análisis de transferencia de masa y difusión intrapartícula indican el mecanismo de bioadsorción del sistema, descrito en este contexto. Asimismo, se realizaron espectroscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para obtener la morfología y las propiedades superficiales del adsorbente, respectivamente. Como resultado, la fibra de plátano preparada puede proponerse como un adsorbente barato y adecuado para separar los colorantes de las aguas residuales industriales. La contribución de este antecedente a la investigación fue metodológica y práctica, al evidenciar la factibilidad de emplear materiales naturales como adsorbentes eficaces para la eliminación de contaminantes en el agua, lo que puede ser utilizado en procesos de filtrado en sistemas de tratamiento de agua.

García (2018) desarrolló una investigación titulada "Tratamiento de agua contaminada con metales pesados utilizando como medios filtrantes biorresina intercambiadora de cationes de la cáscara y tallo de guineo y carbón activado de endocarpo de coco" con el objetivo de obtener medios filtrantes a partir de recursos naturales como la cáscara de guineo, el pseudotallo de guineo y el endocarpo de coco para tratar agua contaminada con metales pesados como Fe3+, Cr6+ y Ni2+. El estudio fue motivado por la urgencia de descubrir soluciones rentables y sostenibles para el manejo de aguas contaminadas en áreas con acceso restringido a tecnologías de purificación avanzadas. El procedimiento posterior implicó la creación de una biorresina que intercambiaba cationes a través de cáscaras de guineo, pseudotallos de guineo y endocarpos de coco. Estos últimos fueron procesados y sometidos a exámenes fisicoquímicos como la evaluación de densidad, pH y solubilidad en agua y disolventes orgánicos. Luego, se analizó la eficacia de la biorresina mediante el filtrado de agua contaminada con metales pesados bajo distintas condiciones de tiempo de contacto, temperatura y clase de material. Los hallazgos indicaron que la biorresina resultó eficaz en disminuir la cantidad de metales pesados, en particular el cromo hexavalente, logrando una eliminación que superó el 90%. Para su aplicación, las condiciones ideales eran una temperatura de 30°C y un periodo de contacto de 90 minutos. Este descubrimiento tiene un efecto significativo, dado que ofrece una opción económica y sustentable para el tratamiento

de aguas contaminadas. La contribución de este estudio fue esencial en términos teóricos y metodológicos para esta investigación, pues expandió el entendimiento acerca del empleo de materiales naturales reciclados para la eliminación de metales pesados y proporcionó un fundamento sólido para crear y perfeccionar técnicas de filtración empleando medios locales y naturales. Además, el trabajo resultó útil en términos prácticos, puesto que mostro cómo materiales reciclados y accesibles pueden emplearse eficazmente en comunidades con escasos recursos, lo cual se ajusta perfectamente a este proyecto. El motivo de elegir este antecedente radicó en su metodología técnica experimental, lo que ayudó a facilitar la implementación de los procedimientos y resultados logrados para optimizar las condiciones del sistema de filtración en este proyecto.

Ramírez y Enríquez (2015) realizaron una investigación titulada "Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del pseudotallo de plátano" con el objetivo de valorar la eficacia de la bioadsorción de iones de plomo (Pb2+) en lignina obtenida del licor residual producido en el proceso de fabricación de papel utilizando pseudotallo de plátano. El estudio fue impulsado por la urgencia de hallar alternativas económicas y sostenibles para la eliminación de metales pesados del agua, un asunto ambiental significativo en áreas con contaminación por plomo. El procedimiento empleado implicó la caracterización de la lignina a través de la espectroscopía de infrarrojo para detectar sitios activos apropiados para el proceso de bioadsorción, y la identificación de las propiedades de su superficie mediante isotermas de bioadsorción-desorción de nitrógeno (N2). Se evaluó la habilidad de la lignina para adsorberse mediante la elaboración de soluciones de Pb2+ de diversas concentraciones y la medición de la concentración final de Pb2+ mediante espectroscopía de absorción nuclear. Los hallazgos indicaron una eficacia de eliminación cercana al 55% en la bioadsorción de Pb2+ utilizando soluciones de diversas concentraciones. Adicionalmente, se estableció que la lignina obtenida tras el proceso de bioadsorción poseía una superficie de 840 m2/g y un volumen total de poros de 0.30 cm3/g, lo que señalaba su aptitud para la eliminación de metales pesados. La contribución de este precedente es principalmente metodológica, ya que el estudio expone un método de bioadsorción de metales pesados que puede ser utilizado de forma práctica para el tratamiento de aguas contaminadas. La importancia de este estudio para el presente proyecto residió en sus aportes metodológicos, al establecer un fundamento sobre la utilización de

materiales naturales y reciclados en la eliminación de contaminantes, aspecto crucial para la creación de sistemas de filtrado eficaces y asequibles en esta investigación.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Agua potable

Según Valencia et al. (2023) El agua potable es la que satisface los estándares de calidad que la califican como segura para el consumo humano, es decir, que no supone un peligro considerable para la salud al ser consumida o empleada para elaborar alimentos. La calidad del agua es esencial para asegurar la salud de la población y evitar enfermedades transmitidas a través del agua, tales como diarreas, cólera, fiebre tifoidea, entre otras.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en conjunto con los marcos normativos nacionales, dictan directrices y regulaciones que establecen los límites tolerables de contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua destinada para el consumo humano (Chávez, 2018). En Colombia, la principal referencia es la Resolución 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta norma establece los estándares de calidad del agua para consumo, las periodicidades de supervisión y las obligaciones de los proveedores del servicio.

Según Jurado y Yzarra (2021) la calidad del agua debe asegurarse desde el origen hasta el usuario final, lo que conlleva una administración completa del recurso hídrico, que incluye la salvaguarda de las fuentes de suministro, procedimientos apropiados de potabilización, conservación de las redes de distribución y un seguimiento continuo de los indicadores de calidad. La supervisión y control de la calidad del agua también implica la implicación directa de las instituciones sanitarias territoriales y las compañías que brindan el servicio público a domicilio.

4.2.1.1 Parámetros físico-químicos del agua potable

Se lleva a cabo la valoración de la calidad del agua para consumo humano a través del estudio de varios parámetros físico-químicos. Según Jurado y Yzarra (2021) estos parámetros facilitan la detección de compuestos o elementos que pueden perjudicar la salud de los usuarios o alterar las características organolépticas del agua (olor, color, sabor). Estos indicadores

permiten conocer las características físicas y químicas del agua. Algunos de los más relevantes incluyen:

- **Turbiedad**: Indica la presencia de partículas suspendidas. Un nivel alto puede interferir con los procesos de desinfección y ser indicativo de contaminación.
- **Color**: Aunque no siempre representa un riesgo para la salud, un color inusual puede señalar presencia de materiales orgánicos o metálicos.
- **pH**: Determina el grado de acidez o alcalinidad. Un pH muy bajo o muy alto puede afectar la eficacia de los procesos de tratamiento y la corrosividad del agua.
- **Conductividad eléctrica**: Relacionada con la cantidad de sales disueltas. Un valor muy alto puede implicar un exceso de minerales o contaminación con aguas residuales.
- **Cloro residual libre**: Es un indicador clave del proceso de desinfección. Debe estar presente en concentraciones adecuadas para garantizar la eliminación de microorganismos patógenos.
- **Nitratos y nitritos**: En concentraciones elevadas son peligrosos, especialmente para los lactantes, ya que pueden causar metahemoglobinemia ("síndrome del bebé azul").

4.2.1.2 Parámetros microbiológicos del agua potable

Según Conejeros et al. (2021) los parámetros microbiológicos del agua para consumo hacen referencia a la existencia o falta de microorganismos, principalmente bacterias, virus, hongos y protozoarios, que pueden perjudicar la salud de las personas si se consumen. Estos indicadores facilitan la valoración de la seguridad microbiana del agua para consumo humano y son esenciales en los sistemas de monitoreo de la calidad del agua.

Según la **Resolución 2115 de 2007**, los siguientes son los principales indicadores microbiológicos del agua para consumo humano en Colombia:

- **Coliformes totales:** Grupo de bacterias que incluye especies del ambiente y del tracto intestinal de animales. Su presencia en el agua indica deficiencias en los procesos de desinfección o contaminación reciente.
- **Escherichia coli (E. coli):** Es una bacteria específica del intestino de humanos y animales de sangre caliente. Su detección en agua potable indica contaminación fecal

reciente y representa un alto riesgo sanitario. En Colombia, el límite permisible es de 0 UFC/100 mL de E. coli en agua tratada.

- **Bacterias heterótrofas:** Aunque no todas son patógenas, su conteo puede indicar el crecimiento microbiano dentro del sistema de distribución o la presencia de materia orgánica no removida completamente.
- **Enterococos fecales y Clostridium perfringens:** Se consideran indicadores adicionales en algunas condiciones, por ejemplo, cuando se evalúan fuentes crudas o en investigaciones especiales.

4.2.1.3 Problemáticas actuales de acceso a agua potable en zonas rurales y vulnerables

A pesar de los progresos en la cobertura de servicios públicos en América Latina y el Caribe, aún existe una diferencia considerable entre áreas urbanas y rurales respecto al acceso a agua potable de alta calidad. Por ejemplo, en Colombia, aunque en áreas urbanas el servicio de agua potable alcanza el 90%, en zonas rurales numerosas comunidades aún dependen de fuentes superficiales sin tratar o de sistemas comunitarios con insuficiencias técnicas y operativas (Conejeros et al., 2021).

Las principales dificultades detectadas en las comunidades rurales están vinculadas con varios elementos que inciden en el acceso y la calidad del agua. Primero, según Conejeros et al. (2021) numerosas de estas comunidades no cuentan con la infraestructura apropiada, como redes de distribución, sistemas de captación o plantas de tratamiento, lo que obliga a los individuos a adquirir agua directamente de ríos, arroyos o pozos sin asegurar la calidad del agua. Adicionalmente, la polución de los recursos acuáticos es un problema común causado por la deforestación, la minería ilícita, el derramamiento de aguas residuales y la aplicación intensiva de agroquímicos. Esto no solo deteriora las fuentes de agua, sino que también eleva los gastos de abastecimiento de agua o impide su tratamiento eficaz.

Otro reto significativo es la ausencia de sostenibilidad en los sistemas comunitarios, dado que numerosos acueductos rurales son administrados por juntas de acción comunal sin la adecuada formación técnica ni los recursos financieros necesarios, lo que repercute en la continuidad y la calidad del servicio (Conejeros et al., 2021). Igualmente, la falta de supervisión sanitaria eficaz, causada por la ausencia de seguimiento regular y respaldo institucional en

numerosas áreas rurales, obstaculiza la identificación precoz de riesgos de salud y la implementación de acciones correctivas. Según Conejeros et al. (2021) el efecto del cambio climático, caracterizado por sequías extendidas, reducción de los flujos y fenómenos extremos, también ha modificado la disponibilidad de agua, impactando particularmente a las comunidades que se sustentan en fuentes superficiales de escasa capacidad. En última instancia, las circunstancias socioeconómicas y culturales, tales como la pobreza, la ausencia de educación en medio ambiente y la desconfianza hacia las instituciones, complican la labor de las instituciones.

4.2.2 Tratamiento de agua potable

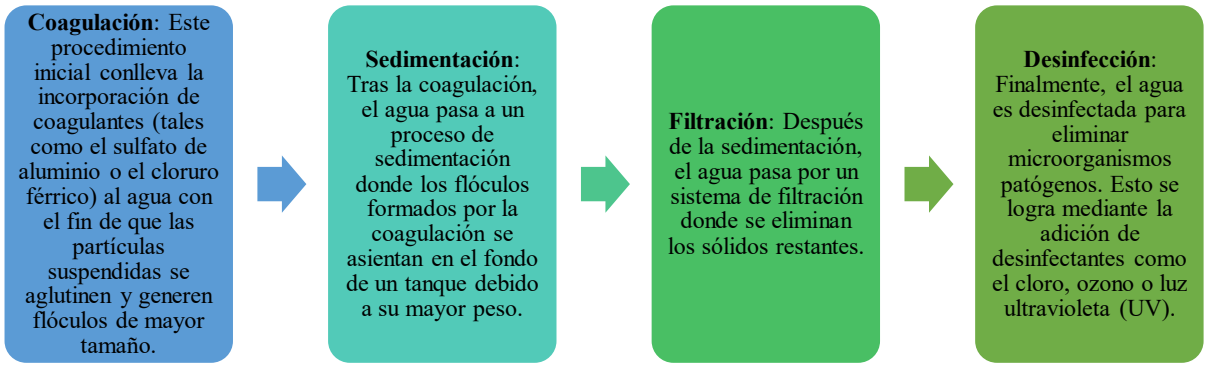
Según Lozano (2019) el proceso de purificación del agua potable es esencial para asegurar la salud pública, dado que posibilita la eliminación o disminución de los contaminantes en el agua, lo que la convierte en segura para el consumo humano. Con el paso del tiempo, se han creado varios procedimientos de tratamiento, que oscilan entre los tradicionales hasta las tecnologías más vanguardistas y sostenibles. A continuación, se tratan los métodos convencionales y las tecnologías alternativas para la purificación del agua, poniendo especial atención en la filtración.

4.2.2.1 Procesos Convencionales de Tratamiento de Agua

Los procesos convencionales de tratamiento de agua son utilizados a gran escala en plantas de tratamiento de agua potable. Según Salamanca (2016) estos procesos tienen como objetivo la eliminación de sólidos suspendidos, bacterias, virus y otros contaminantes que pueden afectar la calidad del agua.

Figura 1.

Procesos Convencionales de Tratamiento de Agua



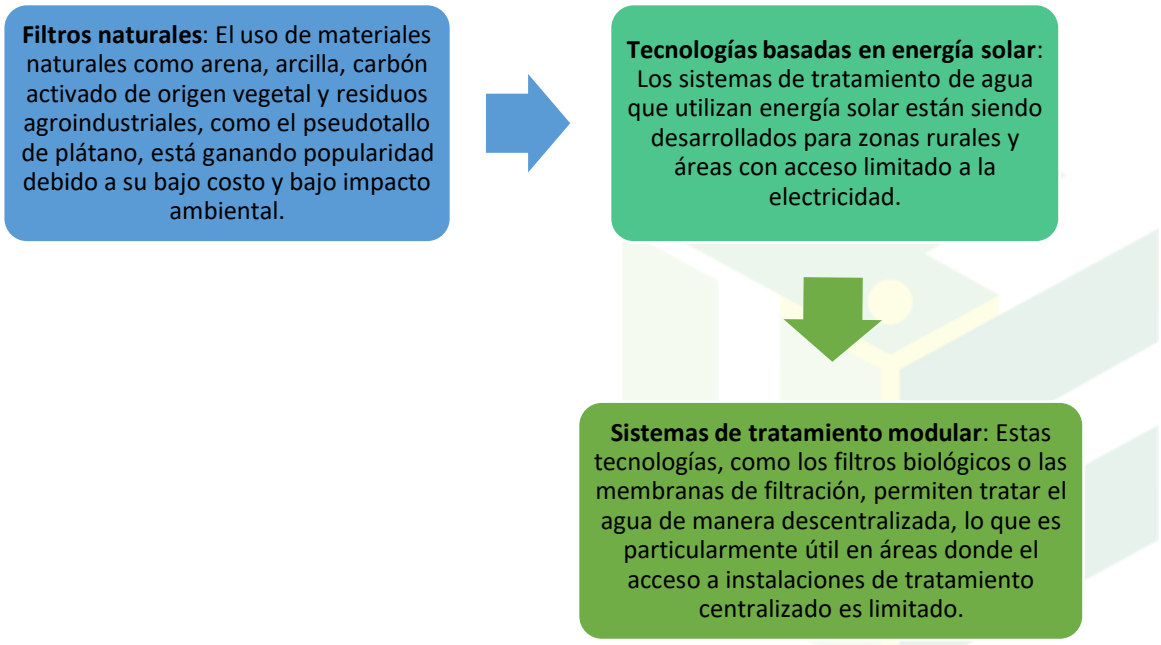
Nota. Información tomada de Salamanca (2016) y adaptada por autores, 2026

4.2.2.2 Tecnologías Alternativas y Sostenibles para el Tratamiento de Agua

Con el aumento de la inquietud por el efecto en el medio ambiente y la eficacia de los procesos de tratamiento, se están investigando tecnologías alternativas y sostenibles. Estas tecnologías tienen como objetivo optimizar el desempeño de la planta de tratamiento de agua y disminuir su impacto en el medio ambiente (Sarmiento et al.,2019). Incluyen algunas de estas:

Figura 2.

Tecnologías Alternativas y Sostenibles para el Tratamiento de Agua



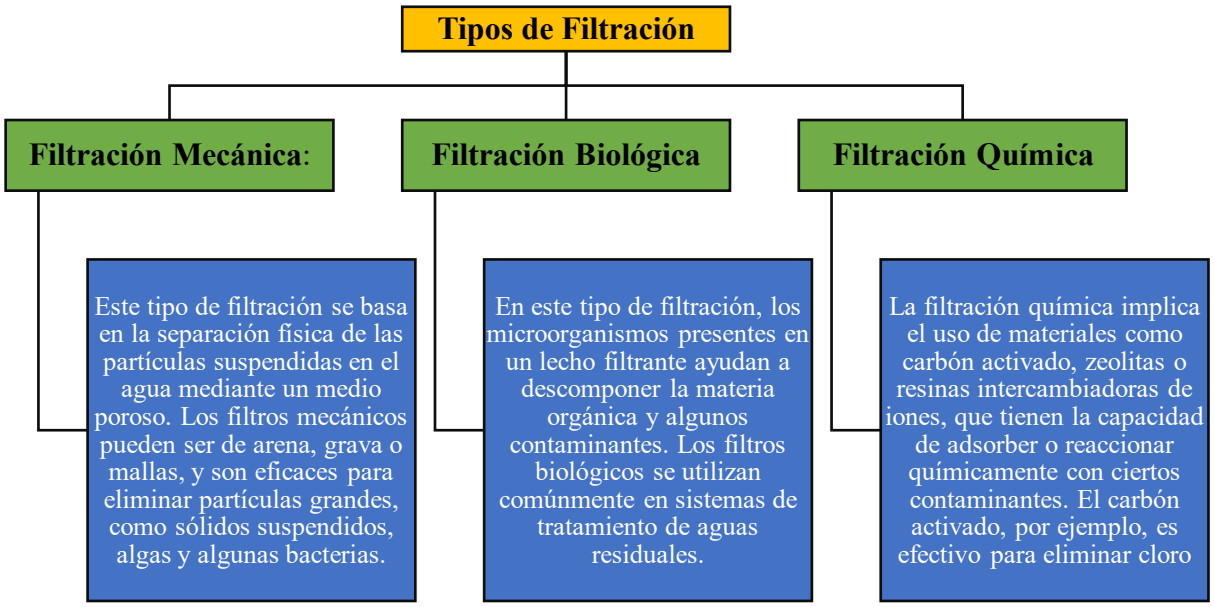
Nota. Información tomada de Sarmiento et al. (2019). Adaptada por autores, 2026

4.2.2.2.1 Filtración como Técnica de Tratamiento

La filtración es uno de los procedimientos más habituales y eficaces para el tratamiento del agua para consumo humano (Rodríguez, 2018). En esta etapa, el agua es sometida a un material de filtración para eliminar los contaminantes suspendidos. Hay varios tipos de filtración, los cuales se describen a continuación:

Figura 3.

Tipos de Filtración



Nota. Información tomada de Rodríguez (2018). Adaptada por autores, 2026

4.2.3 El pseudotallo de plátano como material de filtración

El pseudotallo de plátano, proveniente de la especie Musa spp., ha despertado interés como biomaterial gracias a su abundancia, biodegradabilidad y características físicas y químicas beneficiosas. Este residuo agrícola, usualmente descartado tras la recolección de plátanos, puede convertirse en un recurso valioso para múltiples usos, como la purificación del agua y la eliminación de contaminantes. A continuación, se explica su estructura, características y posible uso en aplicaciones medioambientales.

4.2.3.1 Composición Química y Propiedades Físico-Mecánicas del Pseudotallo

Según García (2018) la estructura fibrosa del pseudotallo de plátano se compone principalmente de varios tipos de celulosa, hemicelulosa y lignina. Según el tipo de plátano y las condiciones de crecimiento, su composición química puede variar, pero usualmente incluye:

- **Celulosa**: Es el principal componente estructural de las fibras vegetales. La celulosa confiere al pseudotallo propiedades mecánicas importantes, como la resistencia y la rigidez.
- **Hemicelulosa**: Aporta flexibilidad a la estructura fibrosa, lo que mejora su capacidad para formar matrices porosas, útiles para la bioadsorción de contaminantes.
- **Lignina**: Contribuye a la rigidez del material y es importante para la durabilidad y resistencia al desgaste. Su presencia en el pseudotallo también afecta la interacción con ciertas sustancias químicas.
- **Composición mineral**: El pseudotallo contiene minerales como potasio, calcio y magnesio, que pueden influir en la capacidad de bioadsorción de ciertos metales pesados.

En términos físico-mecánicos, el pseudotallo de plátano posee flexibilidad y ligereza, lo cual simplifica su manejo (García, 2018). Su capacidad para resistir la tracción y absorber agua también lo convierten en idóneo para procesos de filtrado.

4.2.3.2 Potencial del Pseudotallo como Material para Filtración

El pseudotallo de plátano posee múltiples características que lo hacen un material idóneo para el tratamiento de aguas residuales, particularmente en procedimientos de filtrado y bioadsorción de contaminantes.

4.2.3.2.1 Bioadsorción

El pseudotallo posee una magnífica habilidad para absorber agua, lo que lo hace un material valioso para procedimientos de filtrado. Según García (2018) en su estructura, la celulosa y la hemicelulosa poseen la habilidad de atraer y retener moléculas de agua, lo que promueve su uso en la bioadsorción de metales pesados y otros contaminantes disueltos en el agua. Adicionalmente, su conformación porosa le facilita la atracción y retención de compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el agua residual.

4.2.3.2.2 Porosidad

La porosidad es un rasgo crucial en los materiales empleados para la filtración, y el pseudotallo de plátano muestra una estructura fibrosa con elevada porosidad. García (2018) esta porosidad permite que el agua fluya a través de las fibras, al mismo tiempo que facilita la atrapa de contaminantes, como metales pesados y partículas suspendidas, en las cavidades y espacios microscópicos entre las fibras. La conformación fibrosa del pseudotallo favorece una filtración más efectiva, comparable a la de otros materiales naturales como la arena o el carbón activado.

4.2.3.2.3 Retención de Contaminantes

El pseudotallo de plátano posee una gran habilidad para retener contaminantes, lo que lo hace un candidato ideal para la eliminación de metales pesados (tales como plomo, zinc, cobre y cromo) y otras sustancias dañinas que se encuentran en el agua. García (2018) el pseudotallo tiene la capacidad de absorber contaminantes a nivel molecular gracias a su superficie activa, que contiene grupos hidroxilos y otros compuestos químicos. Este tipo de interacción resulta especialmente beneficiosa para eliminar metales pesados, dado que las fibras del pseudotallo tienen la capacidad de crear complejos con estos metales y atraparlos en sus cavidades.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Este marco conceptual tiene como objetivo presentar los términos más importantes y técnicos que se utilizaron a lo largo de esta investigación. En este sentido, se presentan dichos conceptos.

Agua potable: Agua que satisface los criterios de calidad físico-químicos y microbiológicos fijados por las autoridades de salud, asegurando así que es adecuada para el consumo humano sin poner en peligro la salud humana (García, 2018).

Biomaterial: Material de procedencia biológica, natural o proveniente de desechos orgánicos, que puede ser empleado en usos industriales, médicos o ambientales. Su aplicación fomenta la sostenibilidad y la recuperación de desechos (García, 2018).

Calidad del agua: Conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que establecen la idoneidad del agua para diversos aprovechamientos. En lo que respecta al agua potable, estos parámetros se rigen por regulaciones tanto nacionales como internacionales, como la Resolución 2115 de 2007 en Colombia (García, 2018).

Contaminación del agua: La presencia de elementos físicos, químicos o biológicos que modifican las características naturales del agua, lo que la hace insegura para el consumo humano o para el ecosistema (García, 2018).

Filtración: Procedimiento físico que implica la transmisión del agua por un medio poroso (como arena, carbón activado o membranas) con el objetivo de retener partículas sólidas, microorganismos o contaminantes químicos. Es posible categorizar en filtrado mecánico, biológico o químico (García, 2018).

Microfiltración: La microfiltración es un método de filtrado que emplea membranas con orificios reducidos, usualmente de 0.1 a 10 micrómetros de tamaño. Este procedimiento es efectivo para mantener sólidos en suspensión en el agua, tales como partículas de gran tamaño, sedimentos y ciertas bacterias (García, 2018).

Nanofiltración: Es un método de filtrado más sofisticado que emplea membranas con poros de 1 a 10 nanómetros de tamaño. Este procedimiento no solo conserva sólidos en suspensión, sino que también resulta efectivo para eliminar compuestos orgánicos, pesticidas y ciertos iones divalentes, como el calcio y el magnesio, que favorecen la dureza del agua (García, 2018).

Ósmosis inversa: es un procedimiento sumamente eficaz que emplea membranas semipermeables para erradicar casi todos los contaminantes del agua, este procedimiento obliga al agua a atravesar una membrana que solo permite el tránsito de moléculas de agua, impidiendo la mayoría de sales disueltas, microorganismos, metales pesados, sustancias químicas y otras impurezas (García, 2018).

Pseudotallo de plátano (Musa spp.): Componente estructural de la planta de plátano, formado por hojas enrolladas, que funciona como tallo simulado. Es abundante en fibras

naturales y se puede utilizar como biomaterial debido a su porosidad, habilidad para absorber y su contenido de celulosa y lignina (García, 2018).

Retención de contaminantes: Habilidad de un material para atrapar, absorber o adsorber elementos contaminantes como metales pesados, microorganismos, sustancias orgánicas, entre otros, que se encuentran en el agua (García, 2018).

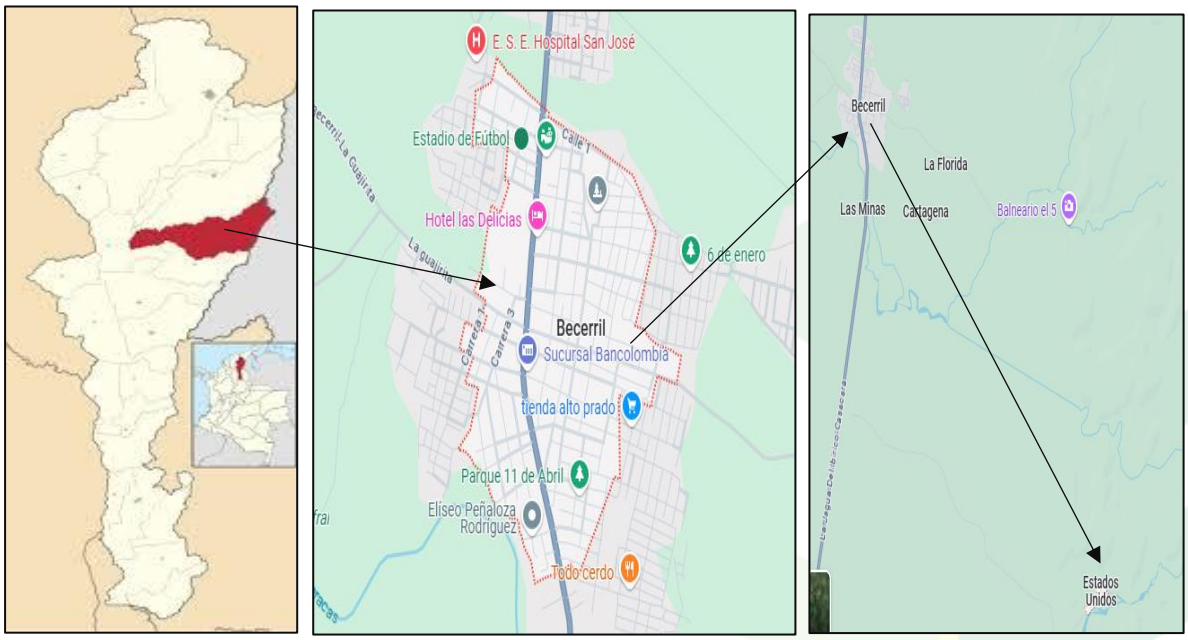
Tratamiento de agua potable: Procedimiento a través del cual se suprimen o disminuyen los contaminantes existentes en el agua cruda para volverla adecuada para el consumo humano. Comprende técnicas físicas, químicas y biológicas (García, 2018).

4.4 MARCO CONTEXTUAL.

La finca El Tamarindo se encuentra ubicada en la vereda Estados Unidos en el municipio de Becerril, quien está situado en la región caribe de Colombia, en la subregión norte del departamento del Cesar. Su territorio está envuelto en dos ecozonas: la ecozona Valle del Río Cesar y la ecozona Serranía del Perijá (Vides et al., 2015).

Figura 4.

Localización del área de estudio



Nota. Tomado de Google Maps, 2026

4.4.1.1 Geografía

Ubicado en la región Noreste del Departamento del Cesar, sus coordenadas extremas son: Latitud Norte, desde los 9°-53'-23'' hasta los 9°-38'-38''; Latitud Este - Oeste, entre los 72°56'-08'' y los 73°38'34'', de acuerdo con el Meridiano de Greenwich (Alcaldía Municipal de Becerril – Cesar, 2020).

4.4.1.2 Economía

El municipio de Becerril - Cesar está situado en la región económica central del departamento del Cesar. Esta zona presenta características parecidas en términos de ubicación geográfica, capacidad del subsuelo, grados de desarrollo socioeconómico, usos actuales y potenciales de los suelos. En algún momento, se intentaron y mantuvieron relaciones de asociación y actividades económicas (Alcaldía Municipal de Becerril – Cesar, 2020).

Según la Alcaldía Municipal de Becerril, (2020) el principal rasgo de la actividad agrícola de Becerril del campo es la presencia simultánea de una agricultura comercial que cumple principalmente con la demanda regional y un sector convencional de la economía campesina, productor de alimentos que se enfoca principalmente en el mercado local. En la agricultura comercial, el arroz cultivado y la palma africana sobresalen por su actividad dinámica. En cuanto al producto de tamaño reducido, destacan el maíz, el frijol, el sorgo, la yuca y el plátano.

Según la Alcaldía Municipal de Becerril, (2020) el rasgo esencial de la ganadería es la explotación extensiva, ya que la superficie de los pastos ha permanecido prácticamente invariable. Los principales desafíos que impacta en la actividad ganadera son el estado de orden público y, con el tiempo, la prevalencia de la fiebre aftosa en la población de ganado. La actividad minera se lleva a cabo mediante la extracción de carbón en las minas del Descanso y Calenturitas, situadas en las localidades de Becerril y la Jagua de Ibirico. La actividad turística se manifiesta en el acontecimiento folclórico del Festival de la Paletilla, así como en la conmemoración de las festividades patronales de la Candelaria, que cada año, por su particularidad, atrae a un gran número de turistas en busca de un ocio saludable.

4.5 MARCO LEGAL

En la presente tabla se encuentra la normatividad que soporta este proyecto en cuanto a los principios legales

Tabla 1.
Marco legal aplicable al proyecto

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Constitución Política de Colombia de 1991	**Artículo 79.** Menciona que todas las todas las personas tienen el derecho de disfrutar de un entorno saludable. La legislación asegurará que la comunidad participe en las decisiones que puedan impactarla.	Por medio del presente proyecto de investigación se buscó mejorar la calidad de agua de la Finca El Tamarindo y así contribuir a la comunidad para que tengan un ambiente más sano como así lo menciona el artículo.
	Artículo 81. Queda prohibida la fabricación, importación, posesión y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, así como la introducción al territorio nacional de residuos nucleares y desechos tóxicos.	A partir de este artículo se permitirá conocer que materiales, procedimientos no utilizar a la hora de realizar el proyecto.
Ley 142 de 1994	Se define el sistema de servicios públicos domiciliarios y se establecen otras regulaciones. Esta normativa indica que los indicadores del servicio público de acueducto son la calidad, la continuidad y la presión.	Con este artículo se buscará tener en cuenta los indicadores de calidad para el consumo de agua potable, por lo que en el proyecto se buscará cumplir con estos índices.
Decreto 2811 del 74	Se establece el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Salvaguarda del Entorno.	Este decreto es relevante en la investigación para la protección del recurso hídrico
Decreto 1594 del 84	Por lo que se regula parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, junto con el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974, respecto a la utilización del agua y los desechos líquidos.	Esta norma es importante en la investigación porque permite establecer si el agua tratada en el proyecto es acta para el consumo humano
Decreto 1575 de 2007 mayo 9	Por medio del cual se establece el Sistema de Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.	Este decreto aportará a la investigación como hacer el control pertinente para obtener el agua en las mejores condiciones para el consumo humano
Decreto 3930 de 2010	Establece las normas relacionadas con los usos del recurso hídrico, su organización, además de las conexiones con el agua, el suelo y los sistemas de drenaje.	Permitirá conocer el uso que se le dará al agua luego de ser tratada en el presente proyecto
Decreto 1076 de 2015	El propósito es regular el ordenamiento ambiental del territorio, además de establecer las políticas y normativas que guíen la recuperación, conservación, protección, organización, gestión, utilización y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.	Aporta al proyecto la regulación que se debe tener en cuenta para el tratamiento del agua potable
Decreto 1898 de 2016	El artículo 18 de la Ley 1753 de 2015 rige parcialmente en lo que respecta a los esquemas diferenciales para la provisión de los servicios de acueducto, alcantarillado y limpieza en áreas rurales.	Esta norma permite que se brinde un mejor servicio de agua potable a la comunidad al momento de desarrollar el presente proyecto

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Decreto 1272 de 2017	Se refiere a los sistemas flexibles para la provisión de los servicios de acueducto, alcantarillado y saneamiento en áreas de acceso complicado, zonas de gestión complicada y áreas de prestación que, debido a sus condiciones específicas, no pueden satisfacer los criterios de eficacia, cobertura y calidad fijados por la legislación.	El presente decreto tiene un aporte significativo a este proyecto a la hora de brindarle una mejor calidad de agua potable a la comunidad de la finca El Tamarindo
Resolución 2314 de 1986	Por lo que se regula la utilización de sustancias químicas diseñadas para el tratamiento de agua para uso humano.	Por medio de la resolución se podrá definir los productos químicos para utilizarlos en el proyecto
Resolución 2115 del 22 junio 2007	A través de la cual se indican propiedades, herramientas fundamentales y frecuencias del sistema de control y supervisión para la calidad del agua destinada al consumo humano.	Esta resolución es muy importante para este proyecto porque establece cuales son las características e instrumentos que se pueden utilizar para el desarrollo del proyecto.
Resolución 811 de 2008	Se establecen las directrices a partir de las cuales la autoridad de salud y las entidades prestadoras, de manera conjunta, determinarán en su zona de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y seguimiento de la calidad del agua destinada al consumo humano.	La norma permitirá establecer los puntos de nuestros para el tratamiento del agua potable, así como la vigilancia de las muestras para controlar sus características.

Nota. Adaptado por autores, 2026

5 MARCO METODOLÓGICO

5.1 LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo al Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 La línea de investigación es sostenibilidad y gestión Ambiental, la cual está adscrita en el programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Facultad de Ingenierías y Tecnológicas de la Universidad Popular del Cesar. El presente proyecto se enmarcó dentro de la sub-línea de gestión integral del recurso hídrico y el área temática es procesos de tratamiento de agua potable y tratamiento de aguas residuales.

5.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Este proyecto se abordó desde un enfoque cuantitativo con la finalidad de valorar la eficacia de un sistema de filtrado fundamentado en membranas elaboradas con pseudotallo de plátano para optimizar la calidad del agua destinada para el consumo humano. Se utilizaron medidas objetivas de los parámetros fisicoquímicos del agua, previa y posterior al tratamiento, con el objetivo de medir la disminución de contaminantes. Mediante este método, se logró establecer el grado de eficacia del sistema sugerido basándose en las variaciones detectadas en estos parámetros.

5.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En cuanto al alcance, este proyecto fue de alcance exploratorio, pues tuvo como objetivo analizar un asunto poco explorado: la utilización del pseudotallo de plátano como recurso para la fabricación de membranas filtrantes en el proceso de tratamiento de agua potable. Como un estudio de exploración, el propósito fue detectar y examinar la factibilidad de este material como una opción de filtrado para el agua, con el objetivo de sentar un fundamento inicial de conocimiento acerca de su eficacia. Este método facilitó la generación de datos útiles para futuros estudios y favoreció un entendimiento más profundo del potencial del pseudotallo de plátano en el tratamiento del agua.

5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio correspondió al recurso hídrico utilizado en la finca El Tamarindo, ubicada en la vereda Estados Unidos del municipio de Becerril, César. La muestra

estuvo constituida por varios volúmenes de agua recolectados en los puntos de captación o cauce superficial denominado Altos de Manantial, las cuales fueron sometidas a análisis antes y después de su tratamiento.

5.5 MUESTRA POBLACIONAL

La muestra estuvo conformada por los volúmenes de agua recolectados en puntos específicos de captación y uso dentro de la finca El Tamarindo. Estas muestras fueron sometidas a análisis fisicoquímicos y microbiológicos, así como al tratamiento experimental mediante el sistema de filtración con geomembranas elaboradas a partir de *pseudotallo* de plátano.

5.6 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se llevó a cabo de forma experimental, evaluando la calidad del agua antes y después de ser tratada con un sistema de filtración que utiliza pseudotallo de plátano como medio filtrante. Este enfoque permitió analizar la eficacia del tratamiento en condiciones reales, sin un grupo control paralelo. Las variables del estudio de presentan en la **Tabla 2** y en la **Tabla 3** se presentan cada una de las fases que llevadas a cabo en este experimento.

Tabla 2.

Variables del estudio

VARIABLES DEL ESTUDIO	
Variable independiente	• Implementación de la geomembrana filtrante elaborada a partir del pseudotallo de plátano en el sistema de tratamiento de agua. • Volumen de agua a tratar (V) o caudal (Q) utilizado para el diseño del prototipo. • Tiempo de contacto del pseudotallo con agua destilada en la caracterización (24 horas). • Concentración de reactivos en la elaboración de la geomembrana (por ejemplo, perclorato de magnesio y acetona).
Variables dependientes	• Calidad del agua (parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: turbidez, conductividad, pH, alcalinidad, DQO, DBO5, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos y disueltos, coliformes totales, E. coli). • Propiedades físicas y químicas del pseudotallo (tamaño de poro, capacidad de bioadsorción, estabilidad química, densidad, densidad a granel, pH y conductividad después del contacto). • Tasa o velocidad de filtración (caudal Q y velocidad v).

	• Cambios observados en las membranas (color, pH y conductividad tras exposición a soluciones ácidas o básicas). • Comparación de resultados con estándares de calidad del agua potable.
Variables controladas	• Protocolo estandarizado para la recolección de muestras (rotulado, enjuague del envase, evitar cámara de aire, almacenamiento en lugar fresco). • Temperatura de incubación para microbiológicos (44.5 ± 0.2 °C para E. coli). • Tiempo de estabilización o secado de membranas (8 horas al ambiente, 10 minutos en refrigeración a 0 °C). • Concentración y tipo de soluciones para pruebas de estabilidad química (HCl pH ≈ 4, NaOH pH ≈ 10). • Procedimiento de medición con instrumentos calibrados (pH-metro, conductímetro, turbidímetro, espectrofotómetro, microscopios). • Área y dimensiones estandarizadas de muestras para pruebas (ej. membrana de 5 cm de diámetro para medición de velocidad de filtración). • Condiciones ambientales de almacenamiento y manejo (no exponer las muestras al sol, conservación en conservadoras si es necesario).

Nota. Adaptado por autores, 2026

Tabla 3.

Fases del experimento

FASES DEL EXPERIMENTO	
Fase	**Descripción**
Preparación del medio filtrante	• Recolección, secado, trituración y tamizado del pseudotallo. • Caracterización del medio (densidad, densidad a granel, pH).
Diseño del sistema de filtración	• Planificación y cálculo del sistema de filtración, definiendo dimensiones, capas del medio filtrante, flujo de agua, y otros parámetros técnicos para asegurar un rendimiento óptimo.
Construcción del sistema de filtración	• Montaje físico del filtro conforme al diseño establecido, instalando contenedores, tuberías, válvulas y el medio filtrante preparado.
Filtración del agua cruda	• Aplicación de agua cruda caracterizada previamente. • Recolección de muestras antes y después del tratamiento. • Almacenamiento adecuado para análisis.
Durabilidad	• Evaluación y seguimiento de la vida útil del sistema, considerando desgaste, colmatación del filtro, y necesidad de mantenimiento o reemplazo del medio filtrante.

FASES DEL EXPERIMENTO	
Fase	**Descripción**
Análisis de laboratorio	• Evaluación de los parámetros físico-químicos y microbiológicos según la Resolución 2115 de 2007. • Realización de 3 réplicas por muestra.
Análisis de datos	• Comparación de valores pre y post-tratamiento.

Nota. Adaptado por autores, 2026

5.7 DESARROLLO METODOLÓGICO

En este capítulo se presentan las fases a desarrolladas que corresponden a los objetivos específicos establecidos, cada fase cuenta con sus actividades y su descripción de cómo se llevaron a cabo, para dar cumplimiento a esta investigación.

FASE 1. CARACTERIZAR EL AGUA CRUDA CAPTADA DEL RÍO ALTOS DE MANANTIAL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS (PH, ALCALINIDAD, TURBIEDAD, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV), DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) Y OXÍGENO DISUELTO), ASÍ COMO PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS (COLIFORMES TOTALES Y ESCHERICHIA COLI), MEDIANTE LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007.

En esta fase se presentan las actividades correspondientes al desarrollo y cumplimiento a objetivo 1, que permitió realizar la caracterización inicial del agua.

Actividad 1.1. Realizar muestreos de agua

Descripción: Se realizó la toma de muestras de agua mediante un protocolo estandarizado para asegurar su representatividad y evitar contaminación externa. Inicialmente se verificó el correcto rotulado del envase y posteriormente este fue enjuagado tres veces con el gua a muestrear, luego la muestra fue recolectada dejando un espacio mínimo en el recipiente para permitir variaciones por temperatura, asegurando después su cierre hermético. Finalmente, las mestras fueron conservadas en un lugar fresco y trasladadas al laboratorio para sus respectivos análisis.

Actividad 1.2. Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua cruda

Descripción: Las muestras de agua cruda recolectadas en el punto de captación fueron analizadas por los investigadores en el laboratorio de la Universidad Popular del Cesar, empleando los procedimientos e instrumentos establecidos para cada parámetro. Esta caracterización permitió determinar las condiciones iniciales del agua antes de su ingreso al sistema de filtración y establecer los valores de referencia para la posterior evaluación del agua filtrada, los métodos utilizados fueron:

Tabla 4.
Métodos de análisis fisicoquímico

Propiedades	Parámetro	Método de análisis
Físicas	Valores de turbidez	**Turbidimetría:** por medio del turbidímetro se midió la turbidez del agua.
	Conductividad	**Conductimetría:** mediante un conductímetro se midió la conductividad eléctrica del agua.
	Ph	**pHmetría:** se empleará un pHmetro para determinar el pH del agua, lo que permitirá conocer su acidez o alcalinidad en una escala de 0 a 14.
Químicas	Alcalinidad	**Titulación:** la alcalinidad del agua será medida por titulación con una solución valorada, considerando la concentración de los iones hidroxilo (OH–), carbonato (CO3–) y bicarbonato (HCO3–).
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	**Método colorimétrico:** se empleará un espectrofotómetro para medir la cantidad de oxígeno consumido por la materia orgánica en la muestra.
	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	**Método espirométrico:** se determinará la cantidad de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos en un período de 5 días.
	Oxígeno disuelto (OD)	**Método de Winkler:** se aplicará la técnica de titulación para determinar la concentración de oxígeno disuelto en la muestra.
	Sólidos suspendidos totales (SST)	**Filtración y secado: se** utilizarán filtros de fibra de vidrio para retener los sólidos, posteriormente se secarán en estufa y se determinará la concentración gravimétrica.
	Sólidos disueltos totales (SDT)	**Evaporación y secado:** se tomará una alícuota de la muestra, se evaporará y el residuo seco será pesado.

Propiedades	Parámetro	Método de análisis
Microbiológicas	Coliformes Totales	**Método del Número Más Probable (NMP) – Técnica en tubos múltiples:** Se inoculan diferentes volúmenes de muestra en tubos con caldo de lactosa o caldo lauril sulfato triptosa. La producción de gas y coloración indican presencia de coliformes. Para E. coli, se realiza confirmación en medio EC a 44.5°C.
	Escherichia coli	**Filtración por membrana:** La membrana se incuba sobre medio m-FC a 44.5 ± 0.2 °C durante 24 horas. Las colonias características de E. coli aparecen de color azul oscuro. También puede confirmarse mediante pruebas bioquímicas o enzimáticas específicas (p. ej., presencia de β-glucuronidasa).

Nota. Elaborado por autores, 2025

Actividad 1.3. Comparación de los resultados obtenidos con los estándares de calidad del agua potable

Descripción: Los valores obtenidos en los análisis de las muestras fueron comparados con los límites establecidos en la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta comparación permitió identificar las concentraciones de contaminantes y determinar los parámetros críticos que deben ser tratados en el proceso de filtración. Para la organización y análisis de los datos, se emplearán herramientas estadísticas y tablas comparativas.

FASE II. IMPLEMENTAR DE LA GEOMEMBRANA DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO ELABORADA A PARTIR DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA ADAPTADO A LAS CONDICIONES DE LA FINCA EL TAMARINDO

A continuación, se presentan las actividades que se llevaron a cabo para darle cumplimiento al segundo objetivo específico referente a la implementación de la membrana de filtración.

Actividad 2.1. Selección y preparación del pseudotallo de plátano

Descripción: Esta actividad comprendió la selección y acondicionamiento del pseudotallo de plátano utilizado como material base para la elaboración de la geomembrana filtrante implementada en el sistema piloto de tratamiento de agua. El material vegetal fue

recolectado directamente en la finca El Tamarindo, procurando conservar sus propiedades físicas y estructurales para favorecer posteriormente el proceso de conformación de la membrana. Para ello, se desarrolló el siguiente procedimiento:

1) Inicialmente, se realizó la selección cuidadosa de pseudotallos de plátano en condiciones adecuadas, verificando que estuvieran libres de daños físicos visibles, presencia de hongos, podredumbre o signos de descomposición.
2) Posteriormente, se efectuó una limpieza manual del material vegetal con el propósito de retirar residuos sólidos, partículas gruesas e impurezas visibles adheridas a la superficie del pseudotallo.
3) Luego, se procedió a separar y preparar las fibras vegetales provenientes del pseudotallo, procurando conservar la integridad estructural del material.
4) Después, las fibras fueron sometidas a un proceso de desinfección preventiva mediante inmersión en una solución de peróxido de hidrógeno al 3 % durante un periodo aproximado de 15 minutos, con el fin de disminuir la presencia de microorganismos que pudieran alterar el comportamiento del material durante la elaboración de la geomembrana.
5) Una vez finalizado el proceso de desinfección, las fibras se enjuagaron con agua limpia para eliminar residuos de la solución utilizada.
6) Posteriormente, el material fue dejado en reposo para permitir el escurrimiento del exceso de agua, alcanzando un estado de humedad ligera sin llegar a la saturación.
7) Durante esta etapa se evitó la aplicación de calor o temperaturas elevadas, con el propósito de conservar las propiedades naturales de las fibras y evitar alteraciones en su estructura interna.
8) Finalmente, las fibras preparadas fueron almacenadas temporalmente en condiciones adecuadas hasta su utilización en el proceso de elaboración de la geomembrana filtrante.

Actividad 2.2: Obtención de la geomembrana filtrante a partir del pseudotallo de plátano

Descripción: En esta actividad se elaboró la geomembrana filtrante utilizando las fibras vegetales extraídas y preparadas del pseudotallo de plátano obtenido en la actividad anterior. El proceso tuvo como finalidad obtener una membrana homogénea, resistente y con suficiente

porosidad para permitir el paso controlado del agua y la retención de partículas suspendidas presentes en el recurso hídrico, empleando materiales naturales y de bajo costo. Para ello, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1) Inicialmente, se preparó el agente estabilizador utilizando almidón de yuca en una proporción equivalente al 8 % respecto a la masa de fibras secas empleadas.

2) Posteriormente, se utilizaron 4 gramos de almidón de yuca disueltos en 100 mL de agua limpia dentro de un recipiente resistente al calor.

3) La mezcla fue realizada inicialmente en frío hasta alcanzar homogeneidad y evitar la formación de grumos.

4) Luego, la suspensión fue sometida a calentamiento controlado entre 60 °C y 70 °C bajo agitación constante, permitiendo la gelatinización del almidón y la formación de un gel viscoso con capacidad adhesiva.

5) Una vez obtenido el gel estabilizador, este se dejó enfriar hasta alcanzar una temperatura tibia antes de ser incorporado a las fibras vegetales.

6) Posteriormente, el gel de almidón fue agregado gradualmente sobre las fibras provenientes del pseudotallo de plátano previamente preparadas, realizando mezcla manual hasta lograr una distribución uniforme del material.

7) Durante esta etapa, se verificó que la textura final presentara cohesión suficiente sin llegar a una saturación excesiva, permitiendo conservar espacios intersticiales entre fibras que posteriormente actuarían como poros de filtración.

8) Después, la mezcla obtenida fue depositada dentro de un molde rectangular de 70 cm × 60 cm con un espesor aproximado de 8 mm.

9) El material fue distribuido en capas sucesivas con orientación cruzada horizontal y vertical, buscando mejorar la resistencia mecánica de la geomembrana y favorecer una distribución homogénea de los espacios porosos internos.

10) Posteriormente, se aplicó compactación controlada mediante presión uniforme utilizando una superficie plana, permitiendo consolidar la estructura sin eliminar completamente la porosidad necesaria para el proceso de filtración.

11) Una vez moldeada la geomembrana, el material permaneció sobre una base rígida durante el proceso de secado y estabilización estructural.

12) El secado se realizó a temperatura ambiente en un espacio ventilado y sin exposición directa al sol durante un periodo aproximado entre 24 y 48 horas.

13) Durante esta etapa ocurrió la evaporación progresiva del agua y el endurecimiento del almidón, permitiendo la consolidación de la red fibrosa y la formación definitiva de la estructura porosa de la geomembrana.

14) Finalmente, se realizó una verificación funcional preliminar mediante el vertido controlado de agua sobre la superficie de la membrana instalada en un soporte perforado, observando el comportamiento hidráulico del material y la velocidad de paso del agua a través de los poros interconectados formados entre fibras. Esta evaluación permitió comprobar que la geomembrana presentaba un flujo lento y continuo, adecuado para su implementación dentro del sistema piloto de filtración..

Actividad 2.3. Caracterización del medio filtrante

Descripción: Esta actividad consistió en evaluar las propiedades físicas y químicas del pseudotallo de plátano previamente preparado, con el fin de determinar su idoneidad como medio filtrante para el tratamiento de agua potable. Para ello, se realizaron análisis específicos orientados a identificar características como el tamaño de poro, la capacidad de bioadsorción, la estabilidad química y el comportamiento frente a soluciones acuosas, además de otras propiedades físicas fundamentales. Los resultados obtenidos permitieron respaldar científicamente el uso del pseudotallo de plátano en la elaboración de la geomembrana filtrante.

Tabla 5.

Procedimiento para la caracterización del medio filtrante

Parámetro	Procedimiento	Instrumentos/Materiales
Tamaño de poro	**Procedimiento con Microscopio Óptico:** • Cortar una sección delgada de la geomembrana (aprox. 1 cm²). • Colocar la muestra entre porta y cubreobjetos. Si es necesario, fijar con resina transparente. • Encender el microscopio óptico y calibrar usando una retícula micrométrica (calibrador). • Enfocar en la zona porosa. • Usar la escala de la retícula o software como Imagen para medir al menos 10 poros. • Cálculo del promedio: $D_{prom} = \frac{d1 + d2 + \cdots + dn}{n}$ Donde: D_{prom}: Diámetro promedio del poro (µm) di: Diámetro individual de cada poro medido n: Total de poros medidos **Procedimiento con Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)** 1) Cortar un fragmento seco de la geomembrana (aprox. 0.5 cm²). 2) Asegurarse de que la muestra esté completamente seca. Fijar sobre el soporte del SEM. 3) Cubrir con una capa metálica delgada (oro o carbono) mediante pulverización catódica para hacerla conductiva. 4) Colocar la muestra en la cámara del SEM. Obtener imágenes ampliadas de las superficies porosas. 5) Usar el software del SEM o ImageJ para medir entre 10 y 20 poros. 6) Cálculo del promedio: $D_{prom} = \frac{d1 + d2 + \cdots + dn}{n}$	Microscopio Óptico o Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), porta y cubreobjetos

Parámetro	Procedimiento	Instrumentos/Materiales
pH y conductividad	1. Colocar muestras de pseudotallo en contacto con agua destilada por un tiempo de 24 horas). 2. Medir el pH y la conductividad del agua después del contacto. 3. Comparar los valores con el agua destilada inicial para identificar cambios.	pH-metro, conductímetro, vasos de precipitados, agua destilada
Densidad	1. Pesar una muestra seca y determinar su volumen mediante desplazamiento de líquido o geometría conocida. 2. Calcular la densidad dividiendo la masa entre el volumen medido $\rho = \frac{m}{V}$	Balanza analítica, recipiente con líquido para desplazamiento, regla o calibrador
Densidad a granel	1. Llenar un cilindro medidor con pseudotallo triturado sin compactar. 2. Medir el volumen ocupado y pesar el contenido. 3. Calcular la densidad a granel como la masa dividida entre el volumen ocupado. $\rho b = \frac{m}{V}$	Probeta o cilindro medidor, balanza analítica
Capacidad de filtración (tasa de flujo)	Se coloca una columna con agua y se mide el volumen (V) de agua filtrada por la membrana durante un tiempo (t). Se calcula la tasa de flujo (Q) usando: $Q = V / t$ Donde: Q = tasa de filtración (L/h) V = volumen filtrado (litros) t = tiempo (horas)	Soporte vertical, embudo, geomembrana, cronómetro, recipiente medidor, agua.

Parámetro	Procedimiento	Instrumentos/Materiales
Estabilidad química	Se colocarán fragmentos de la geomembrana en soluciones diluidas de HCl (pH ≈ 4) y NaOH (pH ≈ 10) durante 48 h. Se evaluarán cambios en color, pH del medio y conductividad	Soluciones de HCl y NaOH, recipientes plásticos, pH-metro, conductímetro, guantes.
Velocidad de filtración	1. Preparar una muestra de la geomembrana con un área conocida y controlada, como por ejemplo un círculo con un diámetro estándar de laboratorio, que puede ser de 5 cm. Con este tamaño se calcula el área expuesta usando la fórmula del área del círculo $a=\pi r^2 a$ = donde r es el radio en metro. 2. Una vez preparada la muestra, se monta en un dispositivo experimental que permita el paso del agua a través de ella de forma controlada. Se hace pasar un volumen medido de agua V (en litros o mililitros) por la muestra y se registra el tiempo t (en segundos) que tarda ese volumen en filtrarse completamente. 3. Se calcula el caudal utilizando la formula: $Q = V / t$ 4. Finalmente, la velocidad de filtración (v) se obtiene dividiendo el caudal (Q) entre el área (A), con la fórmula: $v = AQ$ Este valor representa la velocidad con la que el agua atraviesa la membrana y será utilizado para dimensionar el área necesaria cuando se diseñe el sistema piloto a mayor escala.	Muestra de geomembrana de pseudotallo de plátano con área conocida, embudo o soporte para sujetar la membrana, probeta o cilindro medidor, cronómetro, recipiente para recolectar el agua filtrada, agua destilada, regla o calibrador para medir el diámetro de la muestra, calculadora.

Nota. Elaborado por autores, 2026

Actividad 2.4. Diseño e implementación del prototipo del sistema de filtración a escala piloto con geomembrana filtrante

Descripción: Para diseñar el sistema de filtración a escala piloto, se comienza por determinar el caudal objetivo de agua a tratar, que corresponde a un volumen diario V (en m^3/día). Este volumen se convierte a caudal mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{V}{86400}$$

Donde:

Q = caudal de agua a tratar (m^3/s)

V = volumen diario de agua (m^3/día)

Con el caudal calculado, se determina el área mínima de filtración requerida (A) para la geomembrana, usando la fórmula:

$$A = \frac{Q}{v}$$

Donde:

A = área mínima de filtración requerida (m^2)

Q = caudal de agua a tratar (m^3/s)

v = velocidad de filtración del material (m/s), obtenida experimentalmente en la actividad de caracterización **2.3**

Esta área mínima se utiliza como referencia para diseñar la superficie activa de la geomembrana. Se recomienda considerar un factor de seguridad (Fs)para aumentar el área y evitar obstrucciones o reducción del flujo, por lo que el área útil final será:

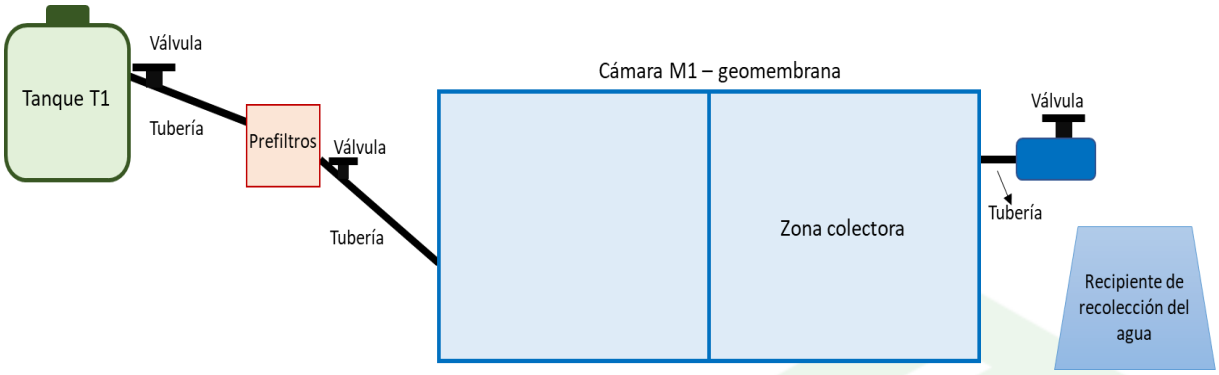
$$A_{útil} = fs \times A$$

Luego se selecciona el tipo de soporte estructural adecuado para sostener la geomembrana (por ejemplo, marco de PVC o acero inoxidable), tomando en cuenta la resistencia a humedad y durabilidad.

El sistema hidráulico fue diseñado con los siguientes elementos: un recipiente de alimentación, operado por gravedad o mediante bomba; un pre-filtro destinado a retener sólidos de mayor tamaño; una cámara de contacto donde se ubicó la geomembrana filtrante; y una zona de recolección para el agua filtrada. Asimismo, se incorporaron válvulas para el control del flujo y puntos de muestreo antes y después de la membrana, permitiendo monitorear su desempeño durante el proceso de filtración. La geomembrana filtrante fue fijada cuidadosamente para evitar filtraciones laterales, utilizando abrazaderas y sellos adecuados que, además, facilitaron su extracción y reemplazo durante las labores de mantenimiento. Posteriormente, se elaboró un plano técnico que incluyó las dimensiones, materiales, conexiones hidráulicas y demás detalles necesarios para la construcción y operación del sistema piloto. Finalmente, el diseño fue implementado conforme a las especificaciones establecidas. A continuación, se presenta un esquema teórico del sistema de filtración diseñado.

Figura 5.

Plano esquemático



Nota. Elaborado por autores, 2026

Actividad 2.5. Filtración del agua cruda y evaluación de la durabilidad de la geomembrana

Descripción: En esta actividad se realizó la filtración diaria del agua cruda utilizando la geomembrana elaborada a partir del pseudotallo de plátano, con el propósito de evaluar su eficacia y durabilidad durante un periodo determinado, correspondiente a un mes o hasta que la membrana perdió funcionalidad. Cada día se recolectó una muestra del agua filtrada para analizar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permitieran medir la calidad del

agua y el rendimiento del sistema. Además, se registró el caudal diario con el fin de verificar la estabilidad del flujo a través de la membrana. De igual manera, se efectuó una inspección visual diaria de la geomembrana para identificar posibles signos de deterioro o bloqueo que pudieran afectar su desempeño. Los datos obtenidos permitieron determinar la vida útil práctica del material y su capacidad para mantener una filtración eficiente en condiciones reales.

Actividad 2.6. Cálculo de la durabilidad de la geomembrana

Descripción: Esta actividad consistió en determinar de forma práctica y reproducible la frecuencia de cambio de la geomembrana elaborada a partir del pseudotallo de plátano. Como criterio principal, se utilizó la reducción del caudal de filtración en un 40 % respecto al caudal inicial, es decir, cuando el caudal alcanzó el 60 % de su valor original. A partir de los registros obtenidos durante varios ciclos de operación, se calculó un tiempo promedio de vida útil de la geomembrana y se estableció una programación preventiva de recambio, con el fin de garantizar la eficacia y continuidad del sistema de filtración. Para ello, se siguió el procedimiento establecido en la siguiente tabla.:

Tabla 6.

Paso a paso para el cálculo de la durabilidad de la geomembrana

Paso	Descripción
Paso 1: Medición del caudal inicial (Q_0)	1. Método simple: coloca el punto de salida del agua filtrada y recoge el agua durante **60 segundos** en la probeta. 2. Lee el volumen recogido V0V_0V0 en litros (L). 3. Calcula el caudal inicial en L/min: $$Q_0 = \frac{V_0}{1\ min}$$
Paso 2: Calcular el umbral de cambio (Q_crit)	Fórmula: $$\text{Qcrit} = 0{,}60 \times Q_0$$ Qcrit es el caudal mínimo aceptable (60 % de Q_0). Cuando el caudal medido Q_t sea igual o menor a Qcrit, se debe cambiar la membrana.

Paso	Descripción
	Q_t es el caudal del día t (medición diaria para comparar con Qcrit).
Paso 3: Medición diaria del caudal	Cada día, a la misma hora, recoge el volumen durante 60 s y calcula utilizando la formula del paso 1.
Paso 4: Comparación y decisión de recambio	Comprueba si $Q_t \leq$ Qcrit • Si sí → recambiar la geomembrana ese mismo día. • Si no → continuar monitoreando al día siguiente. Registra el día del recambio; la diferencia en días entre instalación y recambio es el **T_ciclo**.
Paso 5: Determinar la vida útil de la membrana	En este paso se registrará el día en que $Q_t \leq$ Qcrit, siendo ese el día de cambio de la membrana de filtración. Es decir, la vida útil de la membrana

Nota. Elaborado por autores, 2025

Los datos tomados diariamente para determinar la vida útil de la membrana se anotarán en la siguiente tabla

Tabla 7.

Tabla de registro

Tabla de registro					
Fecha	Día desde instalación	Volumen recogido (60 s) V (L)	Caudal Q (L/min)	Q_crit (L/min)	¿Q ≤ Q_crit? (Sí/No)
	0				
	1				
	$n_{día}$				

Nota. Elaborado por autores, 2025

FASE III. EVALUAR LA EFICACIA DE LA GEOMEMBRANA A BASE DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO, COMPARANDO LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS OBTENIDOS ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO, CONFORME A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007 Y EL DECRETO 1575 DE 2007.

En esta fase se presentaron las actividades desarrolladas para dar cumplimiento a lo establecido en el último objetivo específico, orientadas a determinar la eficacia de la membrana de filtración elaborada a partir del pseudotallo de plátano. Estas actividades permitieron evaluar el desempeño del sistema mediante el análisis de diferentes parámetros relacionados con la calidad del agua filtrada y el funcionamiento de la geomembrana.

Actividad 3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada

Descripción: Se realizaron tres réplicas del proceso de filtración, recolectando una muestra de agua filtrada para cada réplica. Posteriormente, cada una de las muestras fue sometida al análisis de los mismos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados durante la caracterización inicial del agua cruda. De esta manera, los parámetros de turbidez, pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), coliformes totales y Escherichia coli fueron determinados tres veces, una por cada réplica experimental.

Actividad 3.2. Comparación de los resultados con la caracterización inicial

Descripción: Se compararon los resultados obtenidos en la caracterización inicial del agua cruda con los valores registrados en las tres réplicas del proceso de filtración. Para cada réplica se analizaron los mismos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados inicialmente, con el propósito de identificar las variaciones producidas después del tratamiento y establecer el comportamiento del sistema de filtración elaborado a partir del pseudotallo de plátano. Asimismo, se calcularon los valores promedio de las tres réplicas para facilitar la interpretación general de los resultados y evaluar la consistencia del proceso experimental.

Tabla 8.
Comparación de resultados

Parámetro	Agua cruda – Caracterización inicial	Valor Agua Filtrada			
		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio agua filtrada
Turbidez (NTU)					
Conductividad (µS/cm)					
Ph					
Alcalinidad (mg/L CaCO3)					
DQO (mg/L)					
DBO5 (mg/L)					
Oxígeno disuelto (mg/L)					
Sólidos suspendidos totales (mg/L)					
Sólidos disueltos totales (mg/L)					
Coliformes Totales					
Escherichia coli					

Nota. Los resultados de cada réplica corresponden a muestras independientes obtenidas durante el proceso experimental de filtración. El promedio corresponde a los valores obtenidos en las tres réplicas y se utilizará como referencia para la interpretación general del comportamiento del sistema. elaborado por autores, 2025

Posteriormente, se determinó el porcentaje de remoción de los parámetros que permiten establecer una reducción cuantitativa entre las condiciones iniciales y finales del proceso. Para ello, se aplicó la siguiente expresión:

$$\text{Remoción (\%)} = [(\text{Valor inicial} - \text{Valor final}) / \text{Valor inicial}] \times 100$$

Este cálculo se realizó para turbidez, DQO, sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT), utilizando como valor inicial el resultado obtenido en la caracterización del agua cruda y como valor final el promedio de las tres réplicas del agua filtrada. Los

porcentajes obtenidos permitieron establecer el nivel de reducción alcanzado por el sistema de filtración para cada uno de estos parámetros.

Actividad 3.3. Comparación de los resultados con la normatividad vigente

Descripción: Se contrastaron los valores obtenidos del agua filtrada con los estándares de calidad para agua potable establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007. Asimismo, se analizó el cumplimiento de cada parámetro evaluado y se determinó si el agua tratada era apta para el consumo humano o si requería ajustes adicionales en el proceso de filtración.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación, relacionados con la caracterización del agua cruda, la elaboración y evaluación de la geomembrana filtrante elaborada a partir de *pseudotallo* de plátano, y el desempeño del sistema de filtración implementado a escala piloto. Asimismo, se realiza el análisis e interpretación de los datos obtenidos mediante los diferentes ensayos fisicoquímicos y microbiológicos desarrollados, permitiendo determinar la eficacia del sistema en la reducción de contaminantes presentes en el agua. Los resultados fueron comparados con los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007, además de contrastarse con antecedentes e investigaciones relacionadas con el uso de biomateriales en procesos de tratamiento de agua. A continuación, se presenta dichos resultados por cada actividad de acuerdo a los objetivos de esta investigación.

6.1 CARACTERIZAR EL AGUA CRUDA CAPTADA DEL RÍO ALTOS DE MANANTIAL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE SUS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS (PH, ALCALINIDAD, TURBIEDAD, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST), SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV), DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) Y OXÍGENO DISUELTO), ASÍ COMO PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS (COLIFORMES TOTALES Y ESCHERICHIA COLI), MEDIANTE LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007.

En esta fase se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización inicial del agua cruda captada del río Altos de Manantial (ver **Figura 6**), utilizada en la finca El Tamarindo para el consumo humano y las actividades domésticas. Para ello, se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos con el propósito de identificar las condiciones de calidad del recurso hídrico antes de ser sometido al sistema de filtración con geomembrana elaborada a partir de pseudotallo de plátano. Los resultados permitieron determinar parámetros como pH, alcalinidad, turbiedad, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes totales y Escherichia coli, los cuales fueron comparados con los criterios

establecidos en la Resolución 2115 de 2007. Esta información permitió identificar los principales contaminantes presentes en el agua y establecer una línea base para evaluar posteriormente la eficacia del sistema de tratamiento implementado.

Figura 6.

Fuente de agua cruda en la finca El Tamarindo



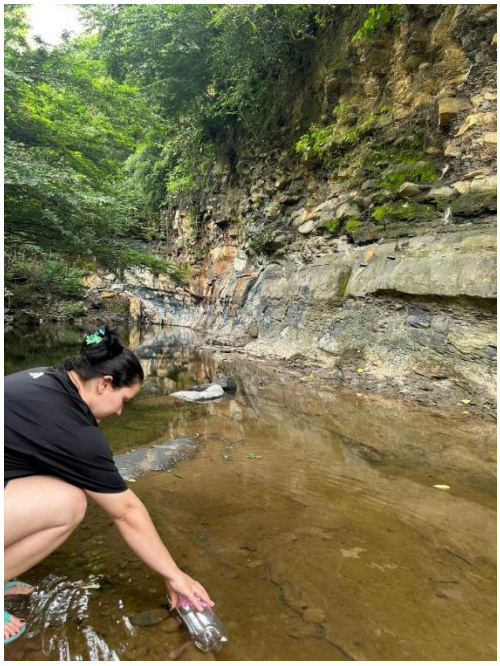
Nota. Tomada por autores, 2025

6.1.1 Muestreos de agua realizados

La toma de muestras de agua se realizó en la finca El Tamarindo, ubicada en la vereda Estados Unidos del municipio de Becerril, Cesar (ver **Figura 7**). El muestreo se llevó a cabo en un afluente hídrico utilizado por los habitantes de la finca como fuente principal para el consumo humano y las actividades domésticas diarias. Durante la visita de campo se evidenció que el agua es captada directamente del río sin recibir ningún tipo de tratamiento previo, desinfección o proceso de potabilización antes de ser consumida por las personas que habitan en el sector (ver **Figura 8**).

Figura 7.

Toma de muestra inicial



Nota. Tomada por autores, 2025

Figura 8.

Captación del agua para el consumo humano



Nota. Tomada por autores, 2025

Asimismo, se observó que alrededor de la fuente hídrica se desarrollan actividades domésticas que generan vertimientos de aguas de lavado y residuos provenientes del uso cotidiano del agua (ver **Figura 9**), los cuales llegan directamente al cauce. A pesar de estas condiciones, los habitantes utilizan el agua para preparar alimentos, lavar utensilios y consumo

directo, en algunos casos sin realizar procesos básicos como hervir el agua antes de ingerirla, lo que representa un posible riesgo para la salud debido a la presencia potencial de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos.

Figura 9.

Vertimiento de agua de lavado al rio



Nota. Tomada por autores, 2025

Para garantizar la representatividad de las muestras recolectadas, se aplicó un protocolo estandarizado de muestreo. Inicialmente se verificó el correcto rotulado de los recipientes y posteriormente estos fueron enjuagados tres veces con el agua a muestrear. Luego, las muestras fueron recolectadas dejando un pequeño espacio dentro del envase para permitir variaciones de volumen asociadas a cambios de temperatura, asegurando posteriormente el cierre hermético de los recipientes. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en un lugar fresco y trasladadas al laboratorio de la Universidad Popular del Cesar para la realización de los análisis correspondientes.

6.1.2 Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua cruda

Las muestras de agua recolectadas en el río Altos de Manantial fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Popular del Cesar con el propósito de determinar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas iniciales del recurso hídrico utilizado por los habitantes de la finca El Tamarindo. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio orientados a evaluar parámetros relacionados con la calidad física, química y microbiológica del agua, permitiendo

identificar la presencia de materia orgánica, sólidos suspendidos, sustancias disueltas y microorganismos indicadores de contaminación. Los análisis fueron desarrollados mediante métodos gravimétricos, colorimétricos, titulométricos, electrométricos y microbiológicos, siguiendo procedimientos estandarizados empleados en estudios de calidad de agua.

Figura 10.

Análisis de la muestra de agua en el laboratorio de la UPC



Nota. Tomada por autores, 2025

Previo al análisis e interpretación de los resultados obtenidos, en la **Tabla 9** se presentan los valores registrados para cada uno de los parámetros evaluados durante la caracterización del agua cruda captada del río Altos de Manantial.

Tabla 9.

Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua cruda antes del tratamiento

Parámetro	Unidad	Resultado obtenido
Turbidez	NTU	43.6
pH	Unidades de pH	4.79
Conductividad eléctrica	mS/cm	0.487
Alcalinidad	mg/L $CaCO_3$	620
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	130
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L	0
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	10.33
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	340

Parámetro	Unidad	Resultado obtenido
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	580
Coliformes Totales	NMP/100 mL	1986.3
Escherichia coli	NMP/100 mL	401.1

Nota. Elaborado por autores, 2025.

Los resultados obtenidos evidenciaron una elevada presencia de sólidos suspendidos y partículas en el agua, reflejada en los valores de turbidez y SST. Según Romero Rojas (2010), la turbidez en cuerpos de agua superficiales suele estar asociada a sedimentos, materia orgánica y residuos arrastrados por escorrentía, factores que afectan las características físicas del agua y favorecen la proliferación de microorganismos. La presencia de sólidos disueltos también indicó una importante cantidad de sales y compuestos minerales disueltos en el recurso hídrico, situación común en aguas naturales expuestas a interacción constante con suelos y materiales rocosos.

El valor de pH obtenido mostró condiciones ácidas en el agua analizada. De acuerdo con Metcalf y Eddy (2014), las variaciones de pH en fuentes superficiales pueden relacionarse con procesos de descomposición de materia orgánica, presencia de dióxido de carbono disuelto y características geológicas propias del terreno. La alcalinidad registrada indicó una considerable capacidad amortiguadora del agua, asociada principalmente a bicarbonatos y carbonatos presentes de forma natural.

En relación con la contaminación orgánica, la DQO registrada evidenció la presencia de materia orgánica susceptible de oxidación química dentro del cuerpo de agua. Tchobanoglous et al. (2014) señalan que este parámetro permite estimar la carga contaminante presente en el agua y evaluar indirectamente el aporte de residuos orgánicos provenientes de actividades domésticas o naturales. El oxígeno disuelto presentó concentraciones relativamente altas, lo cual puede estar asociado a la dinámica natural del afluente y a procesos de aireación presentes en el cauce.

Los análisis microbiológicos mostraron la presencia de coliformes totales y Escherichia coli en concentraciones elevadas, indicando contaminación microbiológica en el agua captada del río Altos de Manantial. Según Tortora, Funke y Case (2016), la detección de Escherichia

coli en agua constituye un indicador de contaminación fecal reciente, asociada generalmente a descargas domésticas, presencia de animales o actividades humanas desarrolladas cerca de la fuente hídrica. Estos resultados evidencian que el agua utilizada por los habitantes de la finca presenta condiciones que pueden representar riesgos para la salud si no se implementan procesos adecuados de tratamiento antes de su consumo.

6.1.3 Comparación de los resultados obtenidos con los estándares de calidad del agua potable

Con el propósito de identificar el estado de calidad del agua captada del río Altos de Manantial, los resultados obtenidos durante los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fueron comparados con los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007 para agua destinada al consumo humano. Esta comparación permitió reconocer los parámetros que presentan alteraciones significativas y que requieren tratamiento previo antes de su consumo, considerando las condiciones ambientales y las actividades desarrolladas alrededor de la fuente hídrica utilizada por los habitantes de la finca El Tamarindo.

Previo al análisis comparativo, en la **Tabla 10** se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización del agua cruda y los valores máximos permisibles establecidos por la normatividad colombiana vigente.

Tabla 10.

Comparación de los resultados obtenidos con los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007

Parámetro	Unidad	Resultado obtenido	Valor máximo permisible
Turbidez	NTU	43.6	2
pH	Unidades de pH	4.79	6.5 – 9.0
Conductividad eléctrica	µS/cm	487	1000
Alcalinidad	mg/L $CaCO_3$	620	50 – 200
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	340	150
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	580	No reporta
Oxígeno disuelto	mg/L	10.33	No reporta
DQO	mg/L	130	No reporta

Parámetro	Unidad	Resultado obtenido	Valor máximo permisible
DBO_5	mg/L	0	No reporta
Coliformes Totales	NMP/100 mL	1986.3	0 UFC/100 cm^3
Escherichia coli	NMP/100 mL	401.1	0 UFC/100 cm^3

Nota. Valores máximos permisibles establecidos según la Resolución 2115 de 2007. Elaborado por autores, 2026.

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el agua captada del río Altos de Manantial presenta alteraciones importantes tanto en sus características fisicoquímicas como microbiológicas, situación que refleja un deterioro en la calidad del recurso hídrico utilizado por los habitantes de la finca El Tamarindo para consumo humano y actividades domésticas. Durante el trabajo de campo se observó que el agua es utilizada directamente desde el afluente sin recibir procesos de tratamiento, desinfección o potabilización, incrementando la exposición de la comunidad a posibles riesgos sanitarios asociados a la presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos.

Uno de los parámetros que presentó mayor alteración fue la turbidez, registrando un valor de 43.6 NTU, ampliamente superior al límite establecido en la normatividad colombiana. Este comportamiento evidencia la presencia significativa de sólidos suspendidos, sedimentos y materia orgánica dentro del agua. Romero (2010) afirma que la turbidez elevada en aguas superficiales suele estar relacionada con el arrastre de partículas provenientes de procesos erosivos, escorrentía superficial y actividades antrópicas desarrolladas alrededor de las fuentes hídricas. Durante la visita realizada a la finca se evidenció que cerca del río se desarrollan actividades de lavado doméstico y disposición de aguas residuales provenientes de utensilios, ropa y otras labores cotidianas, cuyos vertimientos llegan directamente al cauce sin ningún tipo de manejo previo.

La presencia de estos aportes domésticos influye directamente en el aumento de sólidos suspendidos y materia orgánica dentro del agua, favoreciendo además el crecimiento de microorganismos patógenos. Salamanca (2016) menciona que las aguas superficiales expuestas a vertimientos domésticos suelen presentar incrementos importantes en turbidez, carga orgánica y contaminación microbiológica, afectando no solamente las características físicas del

agua sino también la salud de las poblaciones que dependen de estas fuentes para abastecimiento.

El valor de sólidos suspendidos totales obtenido en el análisis confirmó esta situación, alcanzando una concentración de 340 mg/L. La elevada presencia de sólidos suspendidos puede generar múltiples implicaciones sobre la calidad del agua, ya que estas partículas sirven como medio de transporte para microorganismos, compuestos orgánicos y otros contaminantes presentes en el ambiente. Además, altos contenidos de sólidos pueden afectar futuros procesos de tratamiento al favorecer fenómenos de colmatación y disminución en la eficacia de sistemas de filtración.

El pH registrado presentó un comportamiento ácido, con un valor promedio de 4.79. Según Metcalf y Eddy (2014), las aguas con características ácidas pueden generar alteraciones químicas importantes, favoreciendo procesos de corrosión y cambios en la solubilidad de diversos compuestos presentes en el agua. Esta condición también puede relacionarse con procesos de descomposición de materia orgánica vegetales presentes en el entorno natural del río, así como con la acumulación de residuos orgánicos provenientes de actividades humanas cercanas al afluente.

Durante el recorrido realizado en la zona se evidenció la presencia de abundante vegetación, acumulación de hojas, sedimentos y materiales orgánicos alrededor del cuerpo de agua. Asimismo, se observó que existen cultivos cercanos a la fuente hídrica, situación que puede contribuir al arrastre de compuestos orgánicos y partículas del suelo hacia el río, especialmente durante épocas de precipitación. Conejeros et al. (2021) señalan que las actividades agrícolas desarrolladas cerca de fuentes superficiales representan uno de los principales factores de deterioro de la calidad del agua en comunidades rurales, debido al aporte constante de sedimentos, residuos orgánicos y sustancias provenientes del manejo del suelo.

La alcalinidad presentó un valor considerablemente alto, alcanzando 620 mg/L $CaCO_3$. Este resultado puede asociarse a la presencia de minerales disueltos provenientes de las formaciones rocosas observadas en el área de muestreo. García (2018) menciona que las características geológicas del entorno influyen directamente sobre la composición química del

agua, particularmente en cuerpos superficiales que mantienen contacto permanente con materiales minerales y sedimentos del terreno.

La conductividad eléctrica obtenida reflejó la presencia de sustancias disueltas en el agua, posiblemente asociadas tanto a minerales naturales como a residuos provenientes de las actividades desarrolladas alrededor del río. Aunque el valor registrado no superó el límite establecido en la normatividad, sí evidencia la presencia de compuestos disueltos que modifican las características naturales del agua y que pueden influir posteriormente en procesos de tratamiento y filtración.

Respecto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el valor registrado indicó presencia de materia orgánica oxidable dentro del agua. Tchobanoglous et al. (2014) explican que este parámetro permite evaluar indirectamente el nivel de contaminación orgánica presente en un cuerpo hídrico y constituye un indicador importante del impacto generado por residuos naturales y antrópicos. La presencia de materia orgánica en el río puede relacionarse tanto con procesos naturales de descomposición vegetal como con aportes domésticos generados por las actividades humanas observadas durante el muestreo.

Los análisis microbiológicos evidenciaron una situación crítica en términos sanitarios. Los valores de coliformes totales y Escherichia coli encontrados en el agua demostraron contaminación fecal dentro de la fuente hídrica utilizada por los habitantes de la finca. Tortora, Funke y Case (2016) indican que la presencia de Escherichia coli en agua representa un indicador directo de contaminación fecal reciente y de posible presencia de otros microorganismos patógenos capaces de generar enfermedades gastrointestinales e infecciones intestinales.

La situación observada durante el trabajo de campo resulta preocupante debido a que el agua es consumida directamente por los habitantes sin procesos previos de hervido o desinfección. Salamanca (2016) sostiene que el consumo de agua microbiológicamente contaminada constituye uno de los principales factores asociados a enfermedades transmitidas por el agua, especialmente en comunidades rurales donde el acceso a sistemas adecuados de tratamiento es limitado. Entre las principales afectaciones asociadas al consumo de agua

contaminada se encuentran diarreas, vómito, fiebre, infecciones intestinales y cuadros severos de deshidratación, particularmente en niños y adultos mayores.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar la necesidad de implementar alternativas de tratamiento que permitan reducir la carga contaminante presente en el agua utilizada en la finca El Tamarindo. Las condiciones identificadas durante el análisis reflejan problemáticas frecuentes en comunidades rurales donde las fuentes superficiales son utilizadas directamente para abastecimiento humano sin infraestructura adecuada para su tratamiento. En este contexto, el uso de geomembranas elaboradas a partir de pseudotallo de plátano representa una alternativa de interés debido a las propiedades adsorbentes y de retención de contaminantes reportadas en diferentes investigaciones.

Estudios desarrollados por Bedoya et al. (2023) demostraron que residuos agroindustriales derivados del pseudotallo de banano presentan capacidad para remover contaminantes presentes en el agua mediante procesos de bioadsorción. De igual manera, Rahman et al. (2022) encontraron que las fibras de pseudotallo poseen propiedades adecuadas para la retención de sustancias contaminantes gracias a su estructura porosa y composición fibrosa. García (2018) también reportó resultados favorables en el uso de materiales naturales derivados del plátano para la disminución de contaminantes presentes en aguas afectadas por residuos orgánicos y metales pesados.

Las condiciones identificadas en el río Altos de Manantial permiten justificar la necesidad de implementar sistemas alternativos de filtración orientados a mejorar la calidad del agua utilizada por la comunidad, especialmente mediante tecnologías sostenibles y de bajo costo que puedan adaptarse a las condiciones rurales presentes en la finca El Tamarindo.

6.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE FILTRACIÓN A ESCALA PILOTO ELABORADA A PARTIR DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA ADAPTADO A LAS CONDICIONES DE LA FINCA EL TAMARINDO

En esta fase se desarrollaron las actividades relacionadas con la implementación de la geomembrana filtrante elaborada a partir de pseudotallo de plátano y su incorporación en un sistema de tratamiento de agua a escala piloto adaptado a las condiciones de la finca El

Tamarindo. Para ello, se realizó la selección y preparación del material vegetal, la elaboración de la geomembrana, la caracterización de sus propiedades físicas y químicas, así como el diseño e instalación del prototipo de filtración. Las actividades ejecutadas permitieron evaluar el comportamiento del material filtrante y determinar su viabilidad como alternativa para el tratamiento de agua en zonas rurales donde no se cuenta con sistemas convencionales de potabilización.

6.2.1 Selección y preparación del pseudotallo de plátano

El desarrollo de esta actividad permitió obtener el material vegetal necesario para la elaboración de la geomembrana filtrante, evidenciando que el pseudotallo de plátano posee características físicas favorables para su aprovechamiento como medio filtrante natural. Durante la etapa de selección se observó que los pseudotallos recolectados presentaban una estructura interna altamente fibrosa y porosa, conformada por cavidades longitudinales y tejidos con capacidad de retención de humedad, propiedades que pueden favorecer posteriormente el paso controlado del agua y la retención de partículas suspendidas. En las siguientes figuras se presenta el lugar donde se realizó la recolección del pseudotallo de plátano y el procedimiento para obtener la membrana:

Figura 11.

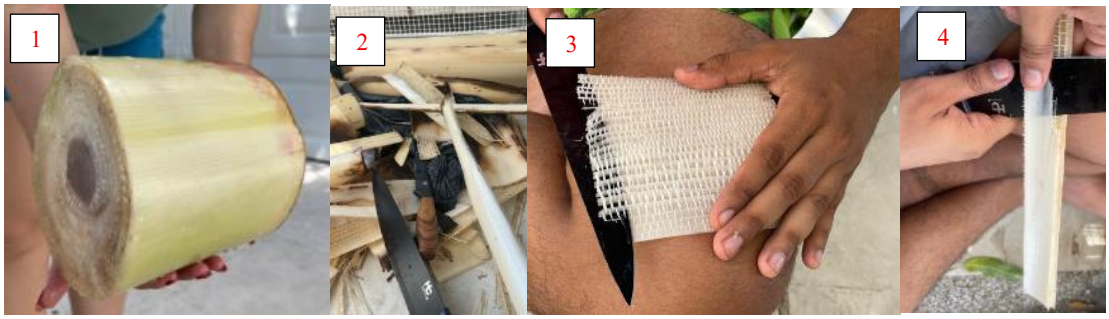
Lugar donde se realizó la recolección del pseudotallo de plátano



Nota. Tomadas por los autores, 2026

Figura 12.

Selección del pseudotallo de plátano y obtención de la muestra a utilizar



Nota. [1]Selección del pseudotallo en buen estado, [2]retiro de la corteza externa y eliminación de partes deterioradas, [3]corte y separación del pseudotallo, [4]picado o desfibrado del pseudotallo. Tomadas por los autores, 2026

En el proceso de acondicionamiento se identificó que las capas externas del pseudotallo contenían mayor acumulación de suciedad, material orgánico adherido y zonas con inicio de deterioro, razón por la cual fue necesario retirar manualmente dichas partes para conservar únicamente las secciones internas con mejores condiciones estructurales. Las imágenes obtenidas durante la actividad permitieron evidenciar la diferencia entre las capas externas y los tejidos internos, observándose una estructura más limpia, uniforme y resistente en la parte central del pseudotallo.

Figura 13.

Limpieza y desinfección con peróxido de hidrógeno



Nota. Tomadas por los autores, 2026

Figura 14.

Escurrimiento y secado parcial de las fibras



Nota. Tomadas por los autores, 2026

La limpieza y desinfección realizada con peróxido de hidrógeno permitió disminuir residuos visibles y mejorar el aspecto físico del material antes de su utilización. Posteriormente, al realizar los cortes longitudinales y la separación manual de fibras, se evidenció que el pseudotallo presentaba una red natural de microespacios interconectados que podrían favorecer el mecanismo de filtración física. Estas cavidades permiten que el agua circule lentamente a través del material, facilitando la retención de sólidos suspendidos y partículas de mayor tamaño presentes en el agua cruda.

Durante la manipulación del material también se observó que las fibras internas presentaban flexibilidad y resistencia mecánica, lo cual favoreció su manejo durante las etapas posteriores de conformación de la membrana. La disposición fibrosa observada en las muestras permitió considerar que el material podría mantener estabilidad estructural aun después de entrar en contacto con el agua, aspecto importante para evitar deformaciones o rupturas durante el funcionamiento del sistema piloto.

Las evidencias fotográficas se pueden observar que el *pseudotallo* fue sometido a diferentes pruebas manuales de corte, separación y compactación, permitiendo verificar la facilidad de adaptación del material a distintas formas y espesores. Además, se observó que las

fibras conservaron una distribución relativamente homogénea después del proceso de limpieza y acondicionamiento, lo cual resulta importante para mantener uniformidad en la futura distribución de poros dentro de la geomembrana.

Autores como Abdul Khalil et al. (2006) señalan que las fibras naturales provenientes del pseudotallo de plátano poseen alto contenido de celulosa, baja densidad y buena resistencia mecánica, características que favorecen su utilización en materiales compuestos y sistemas de filtración alternativos. De igual manera, Velásquez (2019) menciona que la estructura fibrosa del pseudotallo permite generar matrices porosas capaces de retener material particulado presente en medios acuosos, convirtiéndose en una alternativa viable para tecnologías sostenibles de bajo costo.

Otro aspecto observado durante la actividad fue la disponibilidad del material vegetal en la zona de estudio. En la finca El Tamarindo y sus alrededores existe presencia constante de cultivos de plátano, lo que facilita el acceso al pseudotallo sin necesidad de recurrir a materiales industriales de alto costo. Esto representa una ventaja significativa para comunidades rurales que presentan dificultades de acceso a sistemas convencionales de tratamiento de agua potable.

Asimismo, el aprovechamiento del pseudotallo de plátano contribuye al uso sostenible de residuos agrícolas que normalmente son descartados después de la cosecha. Según FAO (2021), gran parte de los residuos derivados del cultivo de plátano y banano son desaprovechados pese a poseer propiedades aprovechables para aplicaciones ambientales y agroindustriales. En este caso, el uso del pseudotallo como medio filtrante representa una alternativa orientada hacia el aprovechamiento de biomasa residual y el desarrollo de tecnologías de tratamiento accesibles para zonas rurales.

6.2.2 Obtención de la geomembrana filtrante a partir del pseudotallo de plátano

La obtención de la geomembrana filtrante permitió transformar el pseudotallo de plátano en un material con características físicas adecuadas para su aplicación dentro del sistema piloto de tratamiento de agua. Durante el desarrollo de esta actividad se observó que la combinación entre las fibras vegetales y el almidón de yuca generó una estructura compacta, flexible y con estabilidad suficiente para soportar el paso del agua sin desintegrarse fácilmente.

Figura 15.

Preparación del agente estabilizador



Nota. Tomadas por los autores, 2026

En la preparación del agente estabilizador se evidenció que el almidón de yuca presentó un comportamiento adhesivo favorable después del proceso de gelatinización. Al ser sometido a calentamiento entre 60 °C y 70 °C, el almidón formó un gel viscoso que permitió unir las fibras del pseudotallo sin necesidad de utilizar compuestos sintéticos o sustancias químicas agresivas. Este comportamiento facilitó la cohesión del material y permitió mantener la estructura porosa necesaria para el proceso de filtración.

Figura 16.

Mezcla del almidón con las fibras



Nota. Tomadas por los autores, 2026

Durante la mezcla manual de las fibras con el gel estabilizador se observó que el recubrimiento fue uniforme y que el material conservó espacios intersticiales entre fibras, condición importante para permitir el flujo del agua. La compactación controlada aplicada durante el moldeado evitó el colapso total de los poros internos, favoreciendo la formación de canales de paso que posteriormente actuarán como rutas de filtración física.

Durante el proceso se observó que el *pseudotallo*, después del acondicionamiento y la incorporación del almidón, adquirió una apariencia más homogénea y una mayor consistencia estructural. Además, se logró conformar una membrana con dimensiones estables y espesor uniforme, aspecto importante para garantizar un comportamiento hidráulico más controlado durante las pruebas experimentales.

El secado realizado a temperatura ambiente permitió que el material endureciera progresivamente sin presentar deformaciones significativas ni agrietamientos visibles. Durante esta etapa se observó que el almidón actuó como una matriz de unión entre fibras, consolidando la estructura tridimensional del material. La ausencia de exposición directa al sol favoreció un secado más lento y uniforme, evitando tensiones internas que pudieran afectar la resistencia mecánica de la geomembrana.

La geomembrana obtenida presentó una superficie con múltiples microespacios visibles entre fibras, lo cual indicó la formación de una red porosa funcional. Estas características son relevantes porque la filtración física depende directamente del tamaño y distribución de los poros presentes en el material. Un sistema con poros interconectados puede favorecer la retención de partículas suspendidas y disminuir parcialmente la carga contaminante presente en el agua cruda.

Otro aspecto observado fue la resistencia mecánica alcanzada por la membrana después del secado. A pesar de tratarse de un material elaborado con componentes naturales, la estructura mostró capacidad para mantenerse íntegra durante la manipulación, doblado y ajuste sobre el soporte experimental. Esto representó una ventaja importante para su instalación y posible mantenimiento dentro del sistema piloto.

Figura 17.

Geomembrana después del secado



Nota. Tomadas por los autores, 2026

Diversos estudios han reportado el potencial de las fibras vegetales y los biopolímeros naturales en la fabricación de materiales filtrantes sostenibles. Según Siqueira et al. (2010), las fibras lignocelulósicas poseen propiedades estructurales que permiten su aplicación en materiales compuestos debido a su resistencia, flexibilidad y capacidad de formar redes fibrosas. De igual forma, Avérous y Boquillon (2004) señalan que el almidón puede actuar como matriz biodegradable en la fabricación de biocompuestos, aportando cohesión y estabilidad estructural sin afectar significativamente la porosidad del material.

La utilización de materiales naturales como el pseudotallo de plátano y el almidón de yuca también representa una alternativa ambientalmente favorable frente al uso de membranas sintéticas convencionales. Muchas membranas industriales requieren polímeros derivados del petróleo y procesos químicos complejos, mientras que la geomembrana elaborada en esta investigación empleó materias primas biodegradables y de fácil acceso en contextos rurales.

Desde el punto de vista económico, el proceso desarrollado mostró viabilidad para comunidades con recursos limitados, debido a que los materiales empleados pueden obtenerse localmente y no requieren equipos industriales sofisticados para su fabricación. Esto podría

facilitar la implementación de tecnologías de filtración de bajo costo en zonas rurales donde el acceso a agua potable continúa siendo limitado.

6.2.3 Caracterización del medio filtrante

La caracterización del medio filtrante permitió evaluar cuantitativamente las propiedades físicas e hidráulicas de la geomembrana elaborada a partir del pseudotallo de plátano. Los análisis realizados permitieron determinar parámetros fundamentales relacionados con la porosidad, comportamiento estructural y capacidad de filtración del material, evidenciando condiciones favorables para su utilización en sistemas de tratamiento de agua a pequeña escala.

En la determinación del tamaño de poro promedio se realizaron mediciones microscópicas sobre diferentes espacios intersticiales presentes en la membrana. Los valores obtenidos fueron 10, 12, 11, 13, 12, 11, 10, 14, 12 y 11 µm. Para calcular el diámetro promedio de poro se utilizó la siguiente ecuación:

$$Dprom = nd1 + d2 + d3 + \cdots + dn$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$Dprom = 1010 + 12 + 11 + 13 + 12 + 11 + 10 + 14 + 12 + 11 = 11.6\ \mu m$$

El tamaño de poro promedio obtenido fue de 11.6 µm. Durante el análisis se observó que la membrana presentó una estructura fina y relativamente homogénea, condición favorable para la retención de sólidos suspendidos y partículas responsables de la turbidez del agua. Este comportamiento resulta importante debido a que la eficacia de los sistemas de filtración física depende en gran medida del tamaño y distribución de los poros presentes en el material filtrante.

Posteriormente se realizó la determinación de la densidad real del material. Para ello se empleó una muestra seca de masa conocida y se calculó el volumen ocupado mediante desplazamiento de líquido.

$$\rho = \frac{155g}{20cm^3} = 0.75\ g/cm^3$$

La densidad obtenida fue de 0.75 g/cm³. Este resultado indicó que el material posee una estructura liviana, característica favorable para sistemas de filtración de baja presión, ya que permite el paso del agua sin generar resistencias hidráulicas excesivas. Además, la baja densidad está relacionada con la presencia de espacios internos y cavidades naturales propias del pseudotallo de plátano.

En cuanto a la densidad a granel, se evaluó el comportamiento del material triturado sin compactación. Para ello se utilizó la misma relación masa-volumen:

$$\rho = \frac{12g}{50cm^3} = 0.24 \ g/cm^3$$

La densidad a granel calculada fue de 0.24 g/cm³. Este valor reflejó una alta porosidad del material, favoreciendo la circulación del agua entre las fibras y aumentando el tiempo de contacto hidráulico dentro de la membrana. Durante la caracterización se observó que la disposición irregular de las fibras generó múltiples espacios vacíos, condición que puede contribuir a mejorar la retención física de partículas suspendidas.

Para el cálculo del caudal del sistema se consideró un volumen de tratamiento de 1 m³/día.

$$Q = 1 \ m3/dia = 0.0417 \ m3/h = 1.16 \times 10 - 5 \ m3/s$$

El caudal obtenido correspondió a un flujo bajo, compatible con sistemas de filtración lenta. Durante la evaluación hidráulica se observó que este tipo de flujo favorece una mejor interacción entre el agua y la superficie de la membrana, aumentando las posibilidades de retención de sólidos y disminución de turbidez.

La determinación del área de la membrana se realizó utilizando las dimensiones establecidas para el sistema piloto:

$$A = 0.70 \ m \times 0.60 \ m = 0.42 \ m^2$$

El área calculada fue de 0.42 m². Este valor permitió distribuir adecuadamente el flujo de agua sobre toda la superficie de la geomembrana, evitando sobrecargas localizadas y mejorando la eficacia del proceso de filtración.

Para calcular la tasa de filtración se utilizó la relación entre el volumen filtrado y el tiempo requerido:

$$Q = \frac{1\ L}{0.5\ h} = 2\ L/h$$

La tasa de filtración obtenida fue de 2 L/h. Durante el ensayo se observó que el agua atravesó la membrana de manera lenta y continua, comportamiento esperado en sistemas filtrantes naturales. Una filtración lenta favorece la retención de partículas y evita el deterioro prematuro de la estructura fibrosa.

Finalmente, se calculó la velocidad de filtración utilizando el área efectiva de paso y el caudal obtenido experimentalmente. Primero se calculó el área de la muestra circular:

$$A = \pi r2 = 3.1416 \times (0.025\ m)2 = 0.00196\ m2$$

Luego se calculó el caudal:

$$Q = \frac{0.5\ L}{60\ s} = 0.0083\ L/s$$

Finalmente, la velocidad de filtración fue determinada mediante:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0083}{0.00196} = 4.23\ L/m2 \cdot s$$

La velocidad obtenida indicó que el agua atravesó la membrana de manera controlada y uniforme. Durante el análisis se evidenció que la compactación aplicada durante la elaboración de la geomembrana permitió conservar los espacios porosos internos sin generar obstrucción total del flujo. Este comportamiento es importante porque velocidades excesivamente altas disminuyen la eficacia de retención, mientras que velocidades demasiado bajas pueden producir colmatación temprana.

Autores como Hubbe y Bowden (2009) señalan que los materiales lignocelulósicos poseen propiedades de bioadsorción y retención física asociadas a su estructura fibrosa y alta área superficial. Asimismo, Abdul Khalil et al. (2012) destacan que las fibras derivadas del

plátano presentan características estructurales favorables para aplicaciones ambientales relacionadas con separación y filtración de contaminantes presentes en agua.

6.2.4 Diseño e implementación del prototipo del sistema de filtración a escala piloto con geomembrana filtrante

La implementación del sistema piloto de filtración permitió desarrollar una estructura funcional destinada al tratamiento de agua mediante el uso de una geomembrana elaborada a partir de pseudotallo de plátano, empleando un sistema hidráulico operado por gravedad. Durante esta fase se realizaron cálculos hidráulicos, dimensionamiento estructural, selección de materiales, ensamblaje de componentes y pruebas preliminares de funcionamiento, con el propósito de garantizar un flujo estable y una adecuada interacción entre el agua y el medio filtrante. Inicialmente se definieron las dimensiones de la geomembrana filtrante, estableciendo un largo de 25.5 cm y un ancho de 18.5 cm. A partir de estas dimensiones se calculó el área efectiva de filtración mediante la ecuación:

$$A = largo \times ancho$$

Al sustituir los valores experimentales se obtuvo:

$$A = 25.5\ cm \times 18.5\ cm = 471.75\ cm^2$$

Posteriormente, el valor fue convertido al Sistema Internacional:

$$A = 471.75\ cm^2 \times \frac{1\ m^2}{10000\ cm^2} = 0.047175\ m^2$$

Durante las pruebas preliminares se observó que esta superficie permitió distribuir el flujo de agua de manera homogénea sobre la membrana, evitando acumulaciones localizadas y favoreciendo una filtración uniforme. Asimismo, el espesor de la geomembrana fue definido en 4 mm, equivalente a 0.004 m, considerando que espesores inferiores generaban fragilidad estructural y posibles rupturas, mientras que espesores superiores disminuían significativamente la permeabilidad del sistema. Durante la manipulación experimental se evidenció que el espesor seleccionado proporcionó estabilidad mecánica adecuada y permitió el paso controlado del agua sin deformaciones importantes en la estructura fibrosa.

Figura 18.

Pruebas preliminares



Nota. Tomadas por loa autores, 2026d

Posteriormente se determinó experimentalmente el caudal del sistema utilizando la relación entre el volumen recolectado y el tiempo de operación:

$$Q = \frac{2.8\ L}{10\ min} = 0.28\ L/min$$

El valor fue convertido posteriormente al Sistema Internacional para facilitar los cálculos hidráulicos:

$$Q = 0.28\ L/min = 4.7 \times 10^{-6} m3/s$$

Durante el funcionamiento experimental se observó un flujo lento, continuo y estable, comportamiento esperado en sistemas de filtración por gravedad. A partir del caudal y del área efectiva de la membrana se calculó la velocidad de filtración:

$$v = \frac{4.7 \times 10^{-6}}{0.047175} = 9.97 \times 10^{-5} m/s$$

La velocidad obtenida indicó un paso controlado del agua a través de la geomembrana, favoreciendo el tiempo de contacto necesario para la retención de partículas suspendidas y

disminución de la turbidez. Durante las pruebas también se observó que el flujo no generó deformaciones significativas en la membrana ni desprendimiento del material fibroso.

El sistema fue diseñado para operar únicamente mediante gravedad, por lo que se calculó la presión hidráulica disponible:

$$P = 1000 \times 9.81 \times 1 = 9810\ Pa$$

Durante las pruebas operativas se observó que esta presión permitió mantener un flujo constante sin necesidad de utilizar bombas eléctricas, facilitando el funcionamiento del sistema mediante energía gravitacional. También se determinó la altura mínima requerida para garantizar el paso del agua a través de la membrana, considerando una presión mínima aproximada de 3000 Pa:

$$h = \frac{3000}{1000 \times 9.81} = 0.30\ m$$

Aunque el valor mínimo requerido fue de 0.30 m, durante el diseño se optó por trabajar con una altura aproximada de 1 metro para compensar pérdidas de carga y asegurar estabilidad hidráulica durante toda la operación del sistema.

Posteriormente se realizó el diseño hidráulico de las tuberías, seleccionándose tubería PVC de ½ pulgada con un diámetro interno de 0.0127 m. El área interna de la tubería fue calculada mediante la ecuación:

$$A = \frac{3.1416 \times (0.0127)^2}{4} = 1.27 \times 10^{-4}\ m^2$$

Durante las pruebas se observó un flujo laminar y estable, sin presencia de turbulencias importantes ni pérdidas excesivas de presión. Con el propósito de prevenir problemas asociados a colmatación progresiva de la geomembrana, se aplicó un factor de seguridad de 1.5 sobre el área efectiva de filtración:

$$A_{util} = 1.5 \times 0.047175 = 0.0707\ m^2$$

Este incremento permitió garantizar un margen operativo adecuado frente a posibles disminuciones del caudal ocasionadas por acumulación de sólidos durante el funcionamiento continuo del sistema.

Para la construcción del prototipo se emplearon diversos materiales hidráulicos y estructurales, entre ellos un tanque plástico de alimentación con capacidad aproximada entre 30 y 50 litros, un recipiente plástico de 20 litros para almacenamiento del agua tratada, tubería PVC de ½ pulgada, codos, uniones, válvula de control, pegante PVC, arena lavada, grava, malla plástica, caja acrílica, marco de soporte, empaques de goma, silicona sellante, tornillos inoxidables y una estructura de soporte elaborada en madera. Durante la selección de materiales se priorizó el uso de elementos resistentes a la humedad, de fácil acceso comercial y con bajo costo de implementación. Se observó que los materiales utilizados permitieron ensamblar un sistema estable, funcional y adaptable a condiciones piloto.

Figura 19.

Construcción del sistema



Nota. Tomadas por loa autores, 2026

La construcción del sistema inició con el ensamblaje de la estructura de soporte elaborada en madera, diseñada para sostener el tanque de alimentación a una altura aproximada de 1 metro sobre el nivel del suelo. Durante esta etapa se realizaron mediciones, cortes y perforaciones para garantizar estabilidad estructural y adecuada distribución del peso del tanque lleno. Posteriormente se instaló el tanque de alimentación en la parte superior de la estructura y se realizó una perforación inferior para conectar la tubería PVC encargada de

conducir el agua hacia el sistema de filtración. Durante este proceso se observó la necesidad de reforzar algunas uniones utilizando pegante PVC y silicona para evitar fugas hidráulicas.

Figura 20.

Construcción del prefiltro



Nota. Tomadas por loa autores, 2026

Después se construyó el prefiltro utilizando capas sucesivas de grava y arena lavada. En la base del recipiente se colocó una malla plástica con el propósito de evitar el arrastre del material filtrante. Sobre la malla se instaló una capa de grava de aproximadamente 8 cm destinada a retener partículas gruesas, seguida por una capa de arena lavada de 8 cm orientada a la retención de partículas finas. Durante las pruebas preliminares se observó que este prefiltro redujo significativamente la cantidad de sólidos que llegaban directamente a la geomembrana, disminuyendo el riesgo de obstrucción temprana.

Posteriormente se procedió a la construcción de la cámara de filtración utilizando láminas de acrílico ensambladas mediante silicona sellante. Las dimensiones de la cámara fueron establecidas en 30 cm de largo, 23 cm de ancho y 15 cm de altura. El volumen interno fue calculado mediante:

$$V = 0.30 \times 0.23 \times 0.15 = 0.01035\ m3 = 10.35\ L$$

Figura 21.

Construcción de la cámara de filtración e instalación de la membrana



Nota. Tomadas por loa autores, 2026

Durante el ensamblaje se observó que la cámara permitió distribuir uniformemente el agua sobre la superficie de la geomembrana y facilitó la observación visual del comportamiento hidráulico interno del sistema. La geomembrana fue instalada entre la cámara superior y la zona colectora utilizando un marco de soporte y tornillos inoxidables. Además, se colocaron empaques de goma y silicona sellante para evitar fugas laterales. Durante las pruebas operativas se observó que el sellado permitió que el agua atravesara únicamente la superficie activa de la membrana, evitando caminos preferenciales o pérdidas laterales.

Finalmente, se instaló la salida hidráulica conectada al tanque de almacenamiento final mediante tubería PVC de ½ pulgada. Una vez ensamblados todos los componentes se realizaron pruebas hidráulicas de funcionamiento. Durante estas pruebas se observó flujo continuo por gravedad, adecuada distribución del agua, ausencia de fugas importantes, estabilidad estructural de la geomembrana y retención inicial de sólidos suspendidos. También se evidenció que el sistema mantuvo un funcionamiento estable durante el tiempo de operación experimental, permitiendo validar técnicamente la viabilidad del prototipo como alternativa de filtración utilizando materiales naturales derivados del pseudotallo de plátano.

Figura 22.

Sistema de filtración construido



Nota. Tomadas por loa autores, 2026

6.2.5 Filtración del agua cruda y evaluación de la durabilidad de la geomembrana

La actividad de filtración del agua cruda y evaluación de la durabilidad de la geomembrana permitió analizar el comportamiento funcional del sistema piloto construido a partir de pseudotallo de plátano bajo condiciones reales de operación. El proceso consistió en hacer pasar el agua cruda recolectada desde la fuente hídrica a través del sistema de filtración operado por gravedad, utilizando la geomembrana natural instalada en la cámara de filtración como principal medio de retención de sólidos y contaminantes presentes en el agua. Inicialmente, el agua fue vertida manualmente en el tanque de alimentación ubicado en la parte superior de la estructura de madera, permitiendo que el flujo descendiera de manera continua a través de la tubería de PVC hasta ingresar a la cámara de filtración. Durante el funcionamiento del sistema se observó que el agua atravesó progresivamente la geomembrana y posteriormente

fue conducida hacia el tanque de almacenamiento final mediante la tubería de salida instalada en la parte inferior de la cámara, esto se presenta en la siguiente figura:

Figura 23.

Filtración del agua cruda



Nota. Tomadas por loa autores, 2026

Durante las pruebas realizadas se evidenció que la geomembrana mantuvo estabilidad estructural durante el proceso de filtración, sin presentar desprendimientos significativos de material ni rupturas visibles en su superficie. Asimismo, se observó que el agua filtrada presentó una disminución visual de turbidez respecto al agua cruda inicialmente introducida en el sistema, indicando retención de partículas suspendidas sobre la superficie y estructura interna del material fibroso. El paso del agua a través de la membrana ocurrió de manera lenta y controlada, comportamiento esperado debido a la naturaleza lignocelulósica del pseudotallo de plátano y al espesor seleccionado para la geomembrana. También se observó acumulación de

sólidos retenidos sobre algunas zonas de la membrana, especialmente en los puntos de mayor contacto con el flujo hidráulico, lo que evidenció la capacidad del material para actuar como barrera física frente a contaminantes particulados presentes en el agua cruda.

Para la evaluación del sistema se realizó una toma de muestra del agua filtrada, utilizada para los análisis correspondientes de calidad del agua y verificación preliminar del funcionamiento del prototipo. Durante la operación se observó que el sistema trabajó de manera estable mediante gravedad, manteniendo un flujo continuo sin interrupciones importantes ni pérdidas significativas de presión. También se evidenció que las uniones selladas con silicona y empaques evitaron fugas laterales en la cámara de filtración, permitiendo que el agua atravesara directamente la superficie activa de la membrana. La estructura de soporte elaborada en madera mostró resistencia adecuada para sostener el peso de los tanques y de la columna de agua durante la operación experimental.

En relación con el comportamiento físico de la geomembrana, se observó que el material conservó cohesión estructural después del proceso de filtración, manteniendo la forma y el espesor previamente establecidos durante su elaboración. No se evidenciaron fracturas, colapsos estructurales ni deformaciones severas ocasionadas por la presión hidráulica ejercida por la columna de agua.

Durante la operación también se observó que el sistema presentó una velocidad de filtración lenta, aspecto favorable para procesos de remoción física debido a que incrementa el tiempo de contacto entre el agua y el medio filtrante. La filtración lenta permitió que el agua atravesara gradualmente la estructura fibrosa del pseudotallo, favoreciendo la retención de sólidos finos y disminuyendo visualmente la carga de impurezas presentes en el agua cruda. Asimismo, se evidenció que la geomembrana actuó como una barrera física estable dentro de la cámara de filtración, sin desplazamientos ni desprendimientos durante el funcionamiento del sistema.

6.2.6 Cálculo de la durabilidad de la geomembrana

Para determinar la durabilidad de la geomembrana elaborada a partir del pseudotallo de plátano, se realizó un seguimiento experimental del comportamiento hidráulico del sistema de filtración mediante mediciones periódicas del caudal de salida. El objetivo principal fue establecer el momento en el que la membrana comenzaba a perder eficacia debido al proceso de colmatación ocasionado por la acumulación progresiva de sólidos retenidos sobre la superficie y dentro de la estructura fibrosa del material. Como criterio técnico de reemplazo se estableció que la geomembrana debía cambiarse cuando el caudal de filtración disminuyera al 60 % del caudal inicial, equivalente a una reducción del 40 % respecto a las condiciones originales de operación.

Inicialmente se realizó la medición del caudal base del sistema, recolectando el volumen de agua filtrada durante un tiempo de 60 segundos. Durante esta prueba se obtuvo un volumen inicial de 0.28 L en un minuto, por lo que el caudal inicial se calculó mediante la expresión:

$$Q_0 = \frac{0.28\ L}{1\ min} = 0.28\ L/min$$

A partir de este valor se determinó el caudal crítico permitido para el funcionamiento adecuado de la membrana utilizando el criterio del 60 % del caudal inicial:

$$Qcrit = 0.60 \times 0.28 = 0.168\ L/min$$

Este resultado indicó que la geomembrana debía ser reemplazada cuando el caudal de filtración alcanzara un valor igual o inferior a 0.168 L/min, debido a la disminución significativa del flujo ocasionada por obstrucción parcial de los poros del material filtrante.

Con el fin de simular el comportamiento operativo del sistema, se realizaron registros sucesivos del volumen recolectado durante intervalos de 60 segundos, obteniendo los resultados presentados en la siguiente tabla.

Tabla 11.

Registro de monitoreo de caudal y vida útil de la geomembrana

Fecha	Día desde instalación	Volumen recogido en 60 s (L)	Caudal Q (L/min)	Qcrit (L/min)	¿Q ≤ Qcrit?
01/03/2026	0	0.28	0.28	0.168	No
02/03/2026	1	0.27	0.27	0.168	No
03/03/2026	2	0.27	0.27	0.168	No
04/03/2026	3	0.26	0.26	0.168	No
05/03/2026	4	0.26	0.26	0.168	No
06/03/2026	5	0.25	0.25	0.168	No
07/03/2026	6	0.25	0.25	0.168	No
08/03/2026	7	0.24	0.24	0.168	No
09/03/2026	8	0.23	0.23	0.168	No
10/03/2026	9	0.23	0.23	0.168	No
11/03/2026	10	0.22	0.22	0.168	No
12/03/2026	11	0.21	0.21	0.168	No
13/03/2026	12	0.21	0.21	0.168	No
14/03/2026	13	0.20	0.20	0.168	No
15/03/2026	14	0.19	0.19	0.168	No
16/03/2026	15	0.19	0.19	0.168	No
17/03/2026	16	0.18	0.18	0.168	No
18/03/2026	17	0.18	0.18	0.168	No
19/03/2026	18	0.17	0.17	0.168	No
20/03/2026	19	0.17	0.17	0.168	No
21/03/2026	20	0.16	0.16	0.168	Sí

Nota. Elaborado por autores, 2026.

Los resultados evidenciaron una disminución gradual del caudal de filtración a medida que avanzaban los ciclos de operación del sistema. Este comportamiento se relaciona directamente con el fenómeno de colmatación de la geomembrana, ocasionado por la retención progresiva de partículas suspendidas y sólidos presentes en el agua cruda. Durante los primeros días de funcionamiento el flujo permaneció relativamente estable; sin embargo, posteriormente se observó una reducción más marcada del caudal debido a la acumulación de material retenido sobre la superficie filtrante y dentro de los espacios porosos de la membrana elaborada con pseudotallo de plátano.

A medida que transcurrieron los días de operación, el agua continuó atravesando la geomembrana de manera constante, aunque con menor velocidad de paso. Este

comportamiento evidenció que la membrana mantenía capacidad de filtración, pero que la acumulación progresiva de sedimentos comenzaba a disminuir parcialmente su permeabilidad hidráulica. La reducción del flujo ocurrió de manera gradual y no repentina, lo que permitió mantener el funcionamiento del sistema sin interrupciones importantes durante el periodo evaluado.

El día 20 de operación se registró un caudal de 0.16 L/min, valor inferior al caudal crítico establecido de 0.168 L/min, indicando que la membrana había alcanzado el límite funcional definido para el sistema. En consecuencia, se determinó que la vida útil práctica de la geomembrana bajo las condiciones experimentales evaluadas fue de aproximadamente 20 días continuos de operación. Este resultado permitió establecer un tiempo de recambio preventivo para garantizar que el sistema continúe operando con una eficacia hidráulica adecuada.

Durante el monitoreo también se observó que la geomembrana presentó cambios físicos asociados al uso continuo, tales como compactación superficial, acumulación de sedimentos y reducción parcial de la permeabilidad. En algunas zonas de la superficie se evidenció mayor acumulación de partículas debido al contacto directo con el flujo de agua, generando pequeñas áreas de obstrucción parcial. No obstante, el material mantuvo estabilidad estructural sin evidenciar rupturas, deformaciones severas ni desprendimientos importantes, lo que demuestra que el pseudotallo de plátano posee resistencia suficiente para aplicaciones de filtración a escala piloto.

Asimismo, durante el funcionamiento del sistema se observó que el flujo hidráulico permaneció estable y continuo a pesar de la disminución gradual del caudal. Esto indica que la geomembrana conservó capacidad funcional durante gran parte del periodo de operación, permitiendo el paso controlado del agua y la retención progresiva de contaminantes físicos presentes en la muestra de agua cruda. El comportamiento observado evidencia que el material lignocelulósico derivado del pseudotallo de plátano puede actuar como un medio filtrante natural eficiente bajo condiciones de baja presión y flujo lento.

Los resultados obtenidos permiten considerar que la geomembrana elaborada con pseudotallo de plátano presenta potencial para ser utilizada en sistemas alternativos de

tratamiento de agua a pequeña escala, especialmente en zonas rurales donde el acceso a tecnologías convencionales de potabilización es limitado. Además, la duración alcanzada por la membrana resulta favorable considerando que se trata de un biomaterial biodegradable y de bajo costo obtenido a partir de residuos agrícolas disponibles en la región.

6.3 EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA GEOMEMBRANA A BASE DE PSEUDOTALLO DE PLÁTANO, COMPARANDO LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS OBTENIDOS ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO, CONFORME A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007 Y EL DECRETO 1575 DE 2007.

En esta fase se presentan los resultados obtenidos después de la implementación del sistema de filtración elaborado con geomembrana a base de pseudotallo de plátano, con el propósito de evaluar la reducción de los contaminantes presentes en el agua cruda captada en la finca El Tamarindo. Para ello, se compararon los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados antes y después del proceso de filtración, permitiendo identificar el nivel de eficacia alcanzado por el sistema piloto. Asimismo, los resultados fueron contrastados con los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007, con el fin de determinar el comportamiento del agua tratada frente a los estándares de calidad exigidos para consumo humano.

6.3.1 Análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada

Se realizaron tres réplicas del proceso de filtración mediante el sistema piloto, utilizando la membrana elaborada a partir de pseudotallo de plátano. Para cada réplica se recolectó una muestra del agua efluente del sistema, la cual fue sometida al análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos en la metodología. Los ensayos fueron realizados mediante metodologías estandarizadas, con el propósito de determinar las características del agua después de su paso por el sistema de filtración y observar la variabilidad de los resultados entre las diferentes réplicas experimentales. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los análisis realizados al agua tratada.

Tabla 12.

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua tratada

Parámetro analizado	Método – Técnica	Resultado REPLICA 1	Resultado REPLICA 2	Resultado REPLICA 3
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) mg O2/L	SM 5210 B, SM 4500-O H - Incubación 5 días	< 2.00	< 2.00	< 2.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg O2/L	SM 5220 C - Volumetría	< 20	< 20	< 20
Alcalinidad total mg CaCO3/L	SM 2320 B 24th Edition, 2023 - Volumetría	78.7	103,33	101,67
Conductividad (25 °C) µS/cm	SM 2510 B - Electrométrico	124.7	179,6	177,4
Turbidez NTU	SM 2130 B, 24th Edition, 2023 - Nefelométrico	0.5	0,76	1,72
pH	SM 4500-H+B - Electrométrico	7.08	8,19	8,18
Sólidos disueltos totales mg/L	SM 2540 C - Gravimétrico	123	128	129
Sólidos suspendidos totales mg/L	SM 2540 D - Gravimétrico	69.6	< 5	< 5
Temperatura °C	SM 2550 B - Electrométrico	23.9	24,0	23,5
Coliformes totales UFC/100 mL	ISO 9308-1:2014 - Filtración por membrana	DNPSC	68	< 1
Escherichia coli UFC/100 mL	ISO 9308-1:2014 - Filtración por membrana	< 1	< 1	< 1

Nota. Los resultados corresponden a las tres réplicas experimentales realizadas durante el proceso de filtración. Los valores fueron reportados por el laboratorio de acuerdo con los métodos analíticos empleados. Las expresiones "<" y "DNPSC" se conservan de acuerdo con el reporte original del laboratorio. Fuente: elaboración propia, 2025.

Los resultados de las tres réplicas muestran diferencias en el comportamiento de los parámetros evaluados después del proceso de filtración. La comparación entre las muestras permite identificar cuáles variables presentaron resultados similares y cuáles tuvieron mayor variación, aspecto necesario para valorar la consistencia de las pruebas realizadas.

La turbidez presentó valores de 0,50, 0,76 y 1,72 NTU en las réplicas 1, 2 y 3, respectivamente. Se observa un incremento progresivo entre las pruebas, siendo la tercera réplica la que presentó el valor más alto. La diferencia entre 0,50 y 1,72 NTU indica que la respuesta del sistema frente a este parámetro no fue completamente uniforme. A pesar de esta variación, los tres resultados se mantuvieron en un rango relativamente bajo, por lo que el comportamiento observado permite considerar que la turbidez del agua filtrada presentó condiciones favorables durante las pruebas, aunque con una mayor variación en la tercera réplica.

La conductividad registró 124,7, 179,6 y 177,4 µS/cm. La primera réplica presentó el menor valor, mientras que las réplicas 2 y 3 fueron muy cercanas entre sí, con una diferencia de apenas 2,2 µS/cm. Esta proximidad entre los dos últimos resultados muestra una respuesta más consistente en esas pruebas. La variación encontrada entre la primera y las otras dos réplicas indica que la concentración global de sustancias con capacidad de conducir corriente eléctrica no se mantuvo exactamente igual entre las muestras.

La alcalinidad presentó valores de 78,7, 103,33 y 101,67 mg $CaCO_3$/L. Las réplicas 2 y 3 tuvieron resultados similares, con una diferencia de 1,66 mg $CaCO_3$/L, mientras que la primera presentó el valor más bajo. Este comportamiento muestra una mayor cercanía entre las dos últimas pruebas y una diferencia más marcada respecto a la primera. Los datos indican, por tanto, que la alcalinidad presentó cierta variabilidad entre las réplicas, aunque las muestras 2 y 3 mostraron un comportamiento bastante parecido.

En el caso del pH, los valores fueron 7,08, 8,19 y 8,18. La segunda y tercera réplica prácticamente coincidieron, mientras que la primera presentó un valor inferior. Esta diferencia muestra que el comportamiento del pH fue menos uniforme en la primera prueba, pero se mantuvo muy cercano entre las dos últimas. Los tres valores se encuentran dentro de un intervalo que va desde condiciones cercanas a la neutralidad hasta condiciones ligeramente alcalinas, sin cambios extremos entre las muestras.

Los sólidos disueltos totales (SDT) presentaron 123, 128 y 129 mg/L. La diferencia entre las tres réplicas fue reducida, especialmente entre la segunda y tercera, que solo se

diferenciaron en 1 mg/L. Este resultado muestra un comportamiento bastante homogéneo del parámetro durante las pruebas y una baja variación entre las muestras analizadas.

Los sólidos suspendidos totales (SST) presentaron una diferencia más marcada. En la primera réplica se obtuvo un valor de 69,6 mg/L, mientras que en las réplicas 2 y 3 los resultados fueron inferiores a 5 mg/L. La primera muestra se comportó de manera diferente respecto a las otras dos, que presentaron resultados por debajo del límite reportado. Debido a que los valores de las réplicas 2 y 3 no corresponden a una concentración exacta, sino a resultados expresados como menores que 5 mg/L, no es posible establecer una diferencia numérica exacta entre estas dos muestras.

La DBO_5 presentó valores inferiores a 2,00 mg O_2/L en las tres réplicas, al igual que la DQO, cuyos resultados fueron inferiores a 20 mg O_2/L en todas las muestras. La coincidencia de estos resultados muestra un comportamiento uniforme entre las tres pruebas. Sin embargo, al estar expresados mediante el signo "<", los datos no permiten determinar el valor exacto obtenido en cada réplica ni establecer diferencias cuantitativas entre ellas.

La temperatura mostró valores de 23,9, 24,0 y 23,5 °C. La variación máxima entre las muestras fue de 0,5 °C, por lo que este fue uno de los parámetros con menor diferencia entre las tres réplicas. Los resultados indican condiciones térmicas similares durante las determinaciones realizadas.

En los coliformes totales se presentó la mayor diferencia entre las réplicas. La primera fue reportada como DNPSC, la segunda registró 68 UFC/100 mL y la tercera presentó un resultado inferior a 1 UFC/100 mL. La variación entre estos resultados muestra que el comportamiento microbiológico no fue uniforme en las tres pruebas. Además, debido a que DNPSC es la expresión utilizada en el reporte del laboratorio y no se cuenta aquí con su equivalencia numérica, no es adecuado asignarle un valor de cero ni establecer una comparación cuantitativa con los otros resultados.

Para Escherichia coli, las tres réplicas presentaron valores inferiores a 1 UFC/100 mL. La coincidencia de los resultados muestra un comportamiento uniforme para este parámetro en

las muestras analizadas. Al tratarse de resultados expresados como menores que 1, no corresponde reemplazarlos por cero ni calcular diferencias exactas entre las réplicas.

Por lo anterior, se puede afirmar que las tres réplicas presentan un comportamiento más uniforme en DBO_5, DQO, SDT, temperatura y E. coli, mientras que turbidez, alcalinidad, conductividad, pH y especialmente SST y coliformes totales muestran mayores diferencias entre las pruebas. Esta variabilidad debe ser considerada en la valoración del funcionamiento del sistema, ya que indica que no todos los parámetros respondieron de la misma forma en las tres réplicas. Los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento del agua después de la filtración y establecer la base experimental para la siguiente actividad, en la cual se realizará la comparación con los valores correspondientes a la caracterización inicial del agua cruda.

6.3.2 Comparación de los resultados con la caracterización inicial

Con el fin de evaluar la eficacia del sistema de filtración elaborado a partir del pseudotallo de plátano, se realizó la comparación entre los resultados obtenidos durante la caracterización del agua cruda y los registrados en las tres réplicas del agua filtrada. Para valorar el comportamiento del sistema se consideraron las variaciones observadas en cada parámetro y, cuando fue posible, se utilizó el promedio de las tres réplicas como referencia del comportamiento general del agua después del tratamiento. La comparación permite establecer los cambios asociados al proceso de filtración y determinar cuáles variables presentaron una respuesta más uniforme entre las réplicas y cuáles mostraron mayor variación.

Tabla 13.

Comparación de resultados antes y después del proceso de filtración

Parámetro	Agua cruda – Caracterización inicial	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio agua filtrada
Turbidez (NTU)	43,6	0,50	0,76	1,72	0,99
Conductividad (µS/cm)	487	124,7	179,6	177,4	160,57
pH	4,79	7,08	8,19	8,18	7,82
Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	620	78,7	103,33	101,67	94,57
DQO (mg/L)	130	<20	<20	<20	<20
DBO_5 (mg/L)	0	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	340	69,6	<5	<5	-

Parámetro	Agua cruda – Caracterización inicial	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio agua filtrada
Sólidos disueltos totales (mg/L)	580	123	128	129	126,67
Coliformes totales	1986,3	DNPSC	68	<1	-
Escherichia coli	401,1	<1	<1	<1	<1

Nota. Los valores corresponden a los resultados obtenidos en los análisis realizados al agua cruda y al agua tratada mediante el sistema piloto de filtración. Elaborado por autores, 2026.

La filtración produjo una modificación clara en las características del agua evaluada. El cambio más marcado se presentó en la turbidez, que pasó de 43,6 NTU en el agua cruda a 0,50, 0,76 y 1,72 NTU en las tres réplicas, con un promedio de 0,99 NTU. La reducción se mantuvo en las tres pruebas, aunque la tercera presentó un valor mayor que las dos anteriores. Este comportamiento se relaciona con la estructura fibrosa de la membrana, ya que el pseudotallo está constituido por fibras vegetales que, al disponerse formando espacios entre ellas, generan una barrera física para las partículas presentes en el agua. La reducción de turbidez también coincide con lo ocurrido con los sólidos suspendidos totales, que disminuyeron de 340 mg/L a 69,6 mg/L en la primera réplica y a valores inferiores a 5 mg/L en las réplicas 2 y 3. La coincidencia entre ambos parámetros indica que una parte importante del material particulado fue retenida durante el proceso.

Este comportamiento tiene relación con lo reportado por García (2018), quien utilizó cáscara y pseudotallo de guineo como parte de medios filtrantes para el tratamiento de agua contaminada. Aunque su investigación estuvo dirigida a la remoción de metales pesados y no a la turbidez o los sólidos suspendidos, sus resultados respaldan la utilización de materiales derivados del banano dentro de sistemas de filtración. En el presente estudio, la disminución de turbidez y SST constituye una respuesta directamente relacionada con la función física del medio filtrante. La diferencia entre las réplicas, especialmente en SST, indica que la retención no ocurrió exactamente con la misma intensidad en cada prueba, por lo que el resultado debe considerarse favorable, pero no completamente uniforme.

Los sólidos disueltos totales presentaron un comportamiento diferente. La concentración disminuyó de 580 mg/L en el agua cruda a 123, 128 y 129 mg/L, con un promedio de 126,67 mg/L. La diferencia entre las réplicas fue pequeña, lo que muestra una respuesta bastante estable del sistema para esta variable. La conductividad siguió una tendencia

semejante: pasó de 487 µS/cm a 124,7, 179,6 y 177,4 µS/cm, con un promedio de 160,57 µS/cm. La disminución simultánea de SDT y conductividad indica que después de la filtración hubo una reducción de la cantidad global de material disuelto asociado a la capacidad conductora del agua.

Este resultado puede relacionarse con las propiedades del material vegetal. El pseudotallo contiene componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyos grupos funcionales pueden interactuar con determinadas sustancias presentes en soluciones acuosas. Esta característica ha sido estudiada en los antecedentes de la investigación. Bedoya et al. (2023) encontraron que residuos de banano, incluyendo el pseudotallo, presentaron capacidad de bioadsorción frente a diferentes metales pesados. Ramírez y Enríquez (2015) también utilizaron lignina obtenida del pseudotallo de plátano y reportaron una eliminación cercana al 55 % de Pb^{2+}. Estos antecedentes permiten relacionar el comportamiento observado con la capacidad de interacción superficial de componentes derivados del pseudotallo. Sin embargo, en este estudio no se identificaron los iones responsables de la conductividad ni los componentes específicos de los sólidos disueltos; por ello, no puede afirmarse que la disminución haya sido causada exclusivamente por adsorción.

El pH presentó un cambio importante, pasando de 4,79 en el agua cruda a 7,08, 8,19 y 8,18 en las tres réplicas. El promedio fue de 7,82. Las réplicas 2 y 3 prácticamente coincidieron, mientras que la primera presentó un valor menor. El cambio desde una condición ácida hacia valores cercanos a la neutralidad y ligeramente alcalinos estuvo acompañado por una reducción de la alcalinidad, de 620 mg $CaCO_3$/L a 78,7, 103,33 y 101,67 mg $CaCO_3$/L. La coincidencia entre las réplicas 2 y 3 en ambos parámetros muestra que la modificación de las condiciones ácido-base fue relativamente similar en esas dos pruebas.

No obstante, el comportamiento conjunto de pH y alcalinidad no permite atribuir el cambio a un único mecanismo. El contacto del agua con la membrana y con los demás materiales del sistema pudo modificar las condiciones químicas de la muestra, pero los resultados obtenidos no permiten establecer qué componente produjo el cambio. Esto adquiere relevancia porque la membrana no estaba constituida únicamente por fibra de pseudotallo, sino

que durante su elaboración se incorporó almidón de yuca como agente estabilizador. Por ello, sería incorrecto atribuir exclusivamente al pseudotallo la modificación del pH y la alcalinidad.

La DQO mostró una reducción desde 130 mg/L hasta valores inferiores a 20 mg/L en las tres réplicas. La coincidencia del resultado entre las muestras indica un comportamiento uniforme después de la filtración. Aunque el cambio frente al valor inicial es amplio, el resultado final se encuentra expresado como <20, por lo que no es posible determinar la concentración exacta ni calcular una remoción porcentual exacta. La disminución observada puede estar relacionada con la retención de material presente en el agua y con posibles interacciones entre sustancias disueltas y el material filtrante. Esta posibilidad tiene respaldo en los trabajos de Rahman et al. (2022), quienes encontraron que la fibra de pseudotallo de banano podía utilizarse como adsorbente de azul de metileno y que su comportamiento estaba relacionado con condiciones como el pH, la concentración y el tiempo de contacto. Sin embargo, como en este estudio no se determinó qué compuestos contribuyeron a la DQO, no es posible establecer que su reducción haya ocurrido específicamente por bioadsorción.

La DBO_5 presentó valores inferiores a 2,00 mg O_2/L en las tres réplicas. Este resultado fue igual en todas las muestras filtradas, por lo que no se observa variación entre ellas. Sin embargo, la comparación con el valor inicial de 0 mg/L no permite hablar de una reducción ni calcular porcentaje de remoción. El comportamiento de esta variable debe mantenerse separado del observado en DQO, ya que ambos resultados no tuvieron la misma condición inicial ni permiten realizar el mismo tipo de cálculo.

La respuesta de los coliformes totales fue menos homogénea. En el agua cruda se registraron 1986,3 NMP/100 mL, mientras que las tres réplicas fueron reportadas como DNPSC, 68 UFC/100 mL y <1 UFC/100 mL. La diferencia entre las muestras es considerable y muestra que la reducción microbiológica no presentó el mismo comportamiento en cada réplica. La tercera muestra tuvo el menor resultado, mientras que la segunda todavía presentó una concentración cuantificable. La primera, al estar expresada como DNPSC, no puede transformarse en cero ni compararse numéricamente de la misma manera.

En cambio, Escherichia coli presentó un resultado más consistente: las tres réplicas fueron inferiores a 1 UFC/100 mL, frente a 401,1 NMP/100 mL en el agua cruda. La

coincidencia de los resultados indica que la presencia de este indicador fue reducida hasta ubicarse por debajo del límite reportado por el laboratorio en las tres pruebas. La estructura porosa del material puede haber favorecido la retención de microorganismos asociados a partículas o atrapados durante el paso del agua; sin embargo, los datos obtenidos no permiten determinar si este fue el mecanismo responsable ni establecer que la membrana, por sí sola, haya producido la reducción observada.

Los antecedentes sobre el pseudotallo respaldan la utilización del material como alternativa para procesos de tratamiento, aunque muestran principalmente su comportamiento frente a contaminantes específicos. Pawar, Bagali y Gowrishankar (2023) reportaron una eliminación máxima de 49 % de Pb(II) utilizando pseudotallo de banano modificado en un sistema de columna, mientras que Bedoya et al. (2023) encontraron porcentajes de eliminación de hasta 99,82 % para Cr y 95,17 % para Fe utilizando residuos de banano como bioadsorbentes. Estos resultados no deben compararse directamente con los porcentajes obtenidos en esta investigación porque los contaminantes, las condiciones de operación y los materiales utilizados fueron diferentes. Su aporte para esta discusión está en demostrar que el pseudotallo y sus derivados poseen características que pueden favorecer la retención o interacción con determinados contaminantes.

La investigación de Ramírez y Enríquez (2015) resulta especialmente relacionada con el material utilizado, debido a que trabajaron con lignina obtenida del procesamiento del pseudotallo de plátano. El estudio reportó una eliminación cercana al 55 % de Pb^{2+} y caracterizó propiedades superficiales de la lignina relacionadas con la bioadsorción. Esto permite considerar que algunos componentes estructurales presentes en el pseudotallo pueden participar en procesos de interacción con sustancias presentes en el agua. En la presente investigación, esa posibilidad ayuda a interpretar las reducciones observadas en DQO, conductividad y sólidos disueltos, pero no permite confirmar que dichos cambios hayan ocurrido por el mismo mecanismo, ya que no se realizó una caracterización química de los contaminantes retenidos.

La comparación entre las variables muestra además que los cambios no ocurrieron de forma aislada. La disminución de turbidez estuvo acompañada por una reducción de SST, lo

que es coherente con una mayor retención de material particulado. La conductividad y los SDT también disminuyeron simultáneamente, aunque esta relación no permite identificar sustancias específicas. El cambio de pH estuvo acompañado por una disminución de la alcalinidad, mientras que la DQO presentó valores inferiores a 20 mg/L en las tres réplicas. Esta respuesta conjunta muestra que el proceso modificó tanto características asociadas a partículas suspendidas como variables relacionadas con sustancias presentes en la fase disuelta.

Los resultados también muestran que la reproducibilidad del sistema fue diferente según el parámetro. SDT, DQO, DBO_5 y E. coli presentaron resultados muy similares entre las tres réplicas. Turbidez, conductividad, alcalinidad y pH tuvieron diferencias moderadas, mientras que SST y coliformes totales presentaron las mayores variaciones. Esta diferencia es relevante porque una sola réplica habría ocultado parte del comportamiento observado; las tres pruebas muestran que la respuesta del sistema no fue completamente constante para todas las variables.

En relación con el propósito de mejorar la calidad del agua cruda mediante el sistema piloto, los resultados muestran una reducción de varios de los parámetros evaluados después de la filtración, especialmente turbidez, SST, SDT, conductividad y DQO, además de los cambios registrados en los indicadores microbiológicos. Los antecedentes consultados respaldan el potencial del pseudotallo y de algunos de sus componentes como materiales de tratamiento, principalmente por sus propiedades de retención e interacción superficial. Sin embargo, los datos de esta investigación no permiten atribuir todos los cambios exclusivamente a la bioadsorción ni establecer que el pseudotallo haya sido el único responsable de las reducciones, debido a que el tratamiento corresponde al funcionamiento del sistema piloto completo. La evidencia obtenida sí muestra que, bajo las condiciones evaluadas, el uso de este material estuvo asociado con una modificación favorable de varias características del agua y constituye un resultado coherente con el propósito experimental planteado.

Una vez comparados los resultados del agua cruda con los obtenidos después del proceso de filtración, se calculó el porcentaje de remoción para los parámetros que presentaron una reducción cuantificable. Para este cálculo se tomó como concentración inicial el valor

registrado durante la caracterización del agua cruda y como concentración final el promedio de las tres réplicas del agua filtrada. La expresión utilizada fue:

$$Remoción\ (\%) = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100$$

Donde $C_i$corresponde al valor inicial y $C_f$al valor final promedio.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 14.
Porcentaje de remoción

Parámetro	Agua cruda C_i	Promedio C_f	Remoción
Turbidez (NTU)	43,60	0,99	**97,72 %**
DQO (mg/L)	130	<20	**>84,62 %**
SST (mg/L)	340	<26,53	**>92,20 %**
SDT (mg/L)	580	126,67	**78,16 %**

Nota. Elaboración propia, 2026

La turbidez presentó una reducción de 43,60 NTU en el agua cruda a 0,99 NTU como promedio de las tres réplicas del agua filtrada, correspondiente a una remoción del 97,72 %. La disminución obtenida muestra una alta retención del material que se encontraba suspendido en el agua antes del tratamiento. Este comportamiento se relaciona con el paso del agua por las capas de grava, arena y la membrana de pseudotallo de plátano, donde las partículas presentes en el agua pueden quedar retenidas. El resultado es consistente con lo reportado por García (2018), quien empleó materiales provenientes del pseudotallo de guineo como parte de un medio filtrante para el tratamiento de agua. Aunque las condiciones de su estudio fueron diferentes, este antecedente respalda la utilización de residuos del banano en procesos de tratamiento.

Los sólidos suspendidos totales (SST) pasaron de 340 mg/L en el agua cruda a un promedio inferior a 26,53 mg/L en el agua filtrada, obteniéndose una remoción superior al 92,20 %. La reducción de este parámetro coincide con la disminución registrada en la turbidez, lo que muestra que el sistema tuvo mayor efecto sobre el material que se encontraba en suspensión. La presencia del prefiltrado y de la membrana dentro del mismo montaje impide determinar cuánto de esta reducción corresponde específicamente al pseudotallo de plátano. Por tanto, el porcentaje calculado representa el comportamiento del sistema de filtración en conjunto.

En los sólidos disueltos totales (SDT) se presentó una reducción de 580 mg/L a 126,67 mg/L, correspondiente a una remoción del 78,16 %. En este caso, la disminución fue menor que la obtenida para turbidez y SST, lo que indica que el tratamiento tuvo una mayor incidencia sobre el material suspendido que sobre la fracción disuelta. El comportamiento observado puede relacionarse con las características superficiales de los materiales vegetales utilizados. Bedoya et al. (2023) encontraron capacidad de bioadsorción en residuos de banano frente a diferentes metales pesados, mientras que Ramírez y Enríquez (2015) trabajaron con lignina obtenida del pseudotallo de plátano para la remoción de Pb(II). Estos antecedentes permiten considerar que pueden existir interacciones entre componentes del material vegetal y sustancias presentes en el agua. Sin embargo, en este estudio no se determinaron los compuestos específicos que fueron retirados de la fracción disuelta, por lo que no es posible atribuir la disminución de los SDT exclusivamente a un proceso de adsorción.

La DQO disminuyó de 130 mg/L en el agua cruda a valores inferiores a 20 mg/L en las tres réplicas. Al utilizar el promedio de estos resultados, la concentración final se mantiene como <20 mg/L, por lo que la remoción obtenida corresponde a un valor superior al 84,62 %. La reducción indica una menor concentración de sustancias que contribuyen a la demanda química de oxígeno después del tratamiento. El resultado presenta relación con lo encontrado por Rahman et al. (2022), quienes estudiaron la fibra de pseudotallo de banano como material adsorbente y observaron su capacidad para interactuar con azul de metileno en soluciones acuosas. También se relaciona con Bedoya et al. (2023), cuyos resultados mostraron capacidad de remoción de diferentes contaminantes mediante residuos de banano. Estos estudios respaldan el posible comportamiento adsorbente del material, pero no permiten establecer que

la disminución de la DQO obtenida en esta investigación se deba exclusivamente a dicho mecanismo.

Al considerar los promedios de las tres réplicas, la mayor remoción correspondió a la turbidez, con 97,72 %, seguida de los SST, con una remoción superior al 92,20 %, la DQO, con una remoción superior al 84,62 %, y los SDT, con 78,16 %. Los resultados muestran una respuesta más marcada del sistema frente a los sólidos suspendidos y la turbidez que frente a los componentes disueltos. Esto permite establecer que el proceso de filtración produjo una reducción de los parámetros seleccionados y que la membrana elaborada con pseudotallo de plátano puede formar parte de un sistema destinado al mejoramiento de la calidad del agua cruda. Los resultados, sin embargo, corresponden al funcionamiento del montaje completo y no permiten separar el efecto de cada componente del sistema.

6.3.3 Comparación de los resultados con la normatividad vigente

Con el propósito de evaluar la calidad del agua obtenida después del proceso de filtración mediante la geomembrana elaborada con pseudotallo de plátano, se realizó la comparación de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en laboratorio con los valores máximos permitidos establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007, normativas colombianas que regulan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua destinada al consumo humano. Esta comparación permitió determinar el nivel de cumplimiento de cada parámetro analizado y establecer preliminarmente la viabilidad del agua tratada para consumo humano bajo las condiciones evaluadas en el sistema piloto.

Tabla 15.

Comparación de resultados del agua filtrada con la normatividad vigente

Parámetro	Resultado considerado para la comparación	Valor máximo permitido	Cumple
Turbidez (NTU)	0,99	2 NTU	Sí
pH	7,82	6.5 – 9.0	Sí
Conductividad (µS/cm)	160,57	1000 µS/cm	Sí
Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	94,57	200 mg/L	Sí
DQO (mg/L)	<20	N.R.	—

Parámetro	Resultado considerado para la comparación	Valor máximo permitido	Cumple
DBO_5 (mg/L)	<2,00	N.R.	—
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<26,53	N.R.	—
Sólidos disueltos totales (mg/L)	126,67	N.R.	—
Coliformes Totales	68	0 UFC/100 mL	Sí
Escherichia coli	<1	0 UFC/100 mL	Sí
Temperatura (°C)	23,9	N.R.	—

Nota. N.R.: No regulado específicamente en la Resolución 2115 de 2007 para agua destinada al consumo humano. Para la comparación de coliformes totales se tomó el mayor resultado obtenido entre las tres réplicas (68 UFC/100 mL). Elaborado por los autores, 2026.

Los resultados obtenidos evidenciaron que La comparación de los resultados obtenidos en las tres réplicas con los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007 muestra un comportamiento favorable de los parámetros fisicoquímicos regulados. La turbidez, el pH, la conductividad y la alcalinidad cumplieron con los valores de referencia establecidos para agua destinada al consumo humano. El cumplimiento de estos parámetros indica que, después del proceso de filtración, las características evaluadas se encontraron dentro de los rangos considerados aceptables por la normativa. Esta condición adquiere relevancia frente a la caracterización inicial, en la que el agua cruda presentaba valores que no se encontraban dentro de los criterios establecidos para algunas de estas variables.

En el caso de la turbidez, el promedio de las tres réplicas fue de 0,99 NTU, valor inferior al máximo permitido de 2 NTU. Por tanto, se presentó cumplimiento de este parámetro, debido a que el agua filtrada alcanzó una turbidez menor que la establecida por la norma. El resultado es coherente con la reducción de material suspendido registrada durante el tratamiento y confirma que, desde el punto de vista de este indicador, el agua obtenida después de la filtración presentó una condición compatible con el criterio normativo.

El pH también cumplió con la Resolución 2115 de 2007. El promedio de las tres réplicas fue de 7,82 unidades, ubicado dentro del intervalo establecido entre 6,5 y 9,0. El cumplimiento resulta especialmente relevante al compararlo con la condición inicial del agua, cuyo valor de pH fue de 4,79. Después del tratamiento, el agua pasó a presentar un valor dentro del rango normativo, por lo que la condición de acidez registrada inicialmente dejó de

presentarse en las muestras filtradas. De esta manera, el resultado final se ajustó al criterio establecido para este parámetro.

La conductividad eléctrica presentó un promedio de 160,57 µS/cm y cumplió con el valor máximo de 1000 µS/cm establecido en la comparación. El resultado indica que la conductividad del agua filtrada se mantuvo considerablemente por debajo del límite de referencia. Esta condición se relaciona con la reducción de los sólidos disueltos registrada después del tratamiento, aunque la comparación normativa se establece directamente sobre la conductividad. El resultado obtenido permite señalar que el agua filtrada presentó una condición favorable respecto al criterio utilizado para esta variable.

Para la alcalinidad, el promedio de las tres réplicas fue de 94,57 mg/L $CaCO_3$, frente a un valor máximo de 200 mg/L considerado en la tabla. Por encontrarse por debajo de este valor, el parámetro cumplió con el criterio establecido. La reducción observada frente a la condición inicial permitió que el resultado final se ubicara dentro del valor de referencia utilizado para la evaluación. Por tanto, la alcalinidad del agua filtrada no presentó una concentración superior al límite considerado en la comparación.

El comportamiento microbiológico presentó resultados diferentes entre los dos indicadores evaluados. Para Escherichia coli, las tres réplicas presentaron resultados inferiores a 1 UFC/100 mL. Las tres muestras cumplieron con el criterio establecido para la comparación, debido a que los resultados permanecieron por debajo del límite reportado. La repetición del mismo resultado en las tres réplicas muestra una respuesta constante del sistema para este indicador microbiológico y permite establecer que ninguna de las muestras presentó un valor cuantificable igual o superior al límite utilizado en la evaluación.

En los coliformes totales, los resultados fueron DNPSC, 68 UFC/100 mL y <1 UFC/100 mL. Para realizar la comparación normativa se tomó el mayor resultado obtenido, correspondiente a 68 UFC/100 mL. Al contrastarlo con el valor máximo permitido de 0 UFC/100 mL, el parámetro no cumplió, debido a que el valor registrado fue superior al límite establecido. Aunque en otra de las réplicas el resultado fue inferior a 1 UFC/100 mL, la presencia de un resultado cuantificable de 68 UFC/100 mL hace que el criterio no sea alcanzado

cuando se utiliza el mayor valor obtenido para la comparación. En consecuencia, los resultados de las réplicas muestran que la condición microbiológica para este indicador no fue uniforme.

Los parámetros DQO, DBO_5, SST y SDT presentaron los resultados obtenidos después de la filtración, pero no fueron clasificados como cumplimiento o incumplimiento debido a que no cuentan con un valor máximo específico de comparación dentro de la Resolución 2115 de 2007 para el criterio utilizado en esta actividad. Por esta razón, su presencia en la tabla permite conservar la información obtenida durante la caracterización del agua filtrada, sin asignarles una condición normativa que la resolución no establece. La temperatura recibió el mismo tratamiento al no contar con un límite específico dentro de los criterios considerados.

7 CONCLUSIONES

- La caracterización del agua cruda permitió establecer que la fuente utilizada para el abastecimiento de la finca El Tamarindo presentaba condiciones que requerían tratamiento antes de considerar su uso para consumo humano. Los valores iniciales de turbidez, pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y contaminación microbiológica mostraron que la calidad del agua no cumplía con varios de los criterios utilizados posteriormente para su comparación normativa. El pH ácido y la presencia de coliformes totales y Escherichia coli fueron particularmente relevantes dentro de la condición inicial. Por tanto, el primer objetivo específico se cumplió, ya que se obtuvo una caracterización que permitió establecer las condiciones de partida y contar con una referencia para valorar los cambios producidos por el sistema de filtración.
- La elaboración de la membrana a partir de pseudotallo de plátano y almidón de yuca permitió obtener un material que pudo incorporarse al sistema piloto y utilizarse durante las pruebas de filtración. La disposición de las fibras permitió conformar una estructura con espacios intersticiales para el paso del agua, mientras que el sistema construido funcionó mediante gravedad. La experiencia experimental mostró que el material pudo ser utilizado como parte del proceso de tratamiento bajo las condiciones establecidas en la investigación. En consecuencia, el objetivo relacionado con la elaboración e implementación del sistema se cumplió, aunque los resultados corresponden a una aplicación a escala piloto y no permiten generalizar su comportamiento a otras condiciones de operación.
- La caracterización del material filtrante permitió establecer características físicas relacionadas con su funcionamiento dentro del sistema, entre ellas un diámetro promedio de poro de 11,6 µm, además de los valores de densidad y densidad a granel determinados experimentalmente. Estas características fueron compatibles con el paso controlado del agua y con la retención de material suspendido observada durante las pruebas. El análisis del comportamiento del caudal también mostró que la membrana pudo mantenerse en funcionamiento durante el periodo evaluado. Por ello, el objetivo asociado a la caracterización del material se cumplió, dado que se obtuvieron propiedades que permitieron relacionar su estructura con el desempeño observado durante la filtración.

- La evaluación del agua después del tratamiento mostró una reducción de los parámetros seleccionados respecto a la condición inicial. Al considerar el promedio de las tres réplicas, la turbidez presentó una remoción del 97,72 %, los SST una remoción superior al 92,20 %, la DQO superior al 84,62 % y los SDT del 78,16 %. El pH también pasó de una condición inicialmente ácida a un valor promedio ubicado dentro del intervalo utilizado en la comparación normativa. Estos resultados indican que el sistema produjo cambios favorables en las características físicas y químicas del agua. Sin embargo, las remociones corresponden al funcionamiento del sistema completo, compuesto por el prefiltrado y la membrana, por lo que no es posible atribuirlas exclusivamente al pseudotallo de plátano. El objetivo relacionado con la evaluación del comportamiento del sistema frente a la calidad del agua se cumplió, puesto que las tres réplicas permitieron comprobar la respuesta del tratamiento y comparar su comportamiento con la condición inicial.
- La respuesta microbiológica fue diferente para los dos indicadores evaluados. En Escherichia coli, las tres réplicas presentaron resultados inferiores a 1 UFC/100 mL y fueron consideradas en condición de cumplimiento para la comparación realizada. Los coliformes totales, en cambio, presentaron resultados diferentes entre las réplicas y, al utilizar el mayor valor registrado, correspondiente a 68 UFC/100 mL, no cumplieron con el criterio de 0 UFC/100 mL. Por esta razón, el objetivo relacionado con la obtención de una mejora microbiológica se cumplió de forma parcial: se obtuvo una respuesta favorable para E. coli, pero no se alcanzó el mismo comportamiento para los coliformes totales. Esta diferencia impide considerar que la filtración haya garantizado por sí sola el cumplimiento microbiológico completo del agua.
- La comparación con la normatividad mostró cumplimiento para los parámetros fisicoquímicos regulados evaluados: turbidez, pH, conductividad y alcalinidad. Escherichia coli también cumplió bajo el criterio adoptado para los resultados inferiores a 1 UFC/100 mL en las tres réplicas. Los coliformes totales no cumplieron al considerar el mayor resultado registrado. La DQO, DBO_5, SST y SDT no fueron utilizados para establecer cumplimiento debido a que no cuentan con un valor máximo específico dentro de la norma considerada para esta evaluación. En consecuencia, el objetivo de contrastar la calidad del agua filtrada con la normatividad se cumplió, pero la comparación no respalda un

cumplimiento integral de todos los parámetros evaluados. La presencia de coliformes totales constituye la principal condición que limita esta valoración.

- El seguimiento del caudal mostró una disminución progresiva desde el valor inicial de 0,28 L/min hasta alcanzar 0,16 L/min en el día 20. Al aplicar el criterio definido para el reemplazo de la membrana, correspondiente al 60 % del caudal inicial, el límite fue alcanzado en ese momento. Por tanto, bajo las condiciones experimentales evaluadas, se estableció el día 20 como momento en que se alcanzó el criterio de reemplazo. Este resultado permite caracterizar el comportamiento de la membrana durante el periodo estudiado, pero no debe interpretarse como una vida útil general del material, debido a que corresponde a las condiciones específicas de esta evaluación.
- Esta investigación permitió comprobar que una membrana elaborada con pseudotallo de plátano pudo integrarse a un sistema piloto de filtración y producir mejoras en varias de las características del agua cruda utilizada en la finca El Tamarindo. La respuesta obtenida fue especialmente favorable en los parámetros físicos evaluados y también se observaron cambios en variables químicas y microbiológicas. No obstante, el incumplimiento registrado para coliformes totales impide considerar el agua resultante como plenamente conforme con todos los criterios de calidad para consumo humano evaluados en el estudio. El aporte principal de la investigación se encuentra, por tanto, en la comprobación experimental del comportamiento del pseudotallo de plátano como componente de un sistema de filtración a escala piloto y en la reducción observada de varios indicadores de calidad del agua, sin extender estos resultados más allá de las condiciones en las que fueron obtenidos.

8 RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación permiten evidenciar la importancia de continuar fortaleciendo estudios relacionados con el aprovechamiento de residuos agroindustriales en sistemas alternativos de tratamiento de agua. El pseudotallo de plátano demostró poseer propiedades físicas y estructurales favorables para procesos de filtración, por lo que sería importante que futuras investigaciones profundicen en la optimización de este biomaterial mediante tratamientos físicos, químicos o biológicos que permitan mejorar su capacidad de retención de contaminantes y aumentar su durabilidad operativa dentro de sistemas de filtración a mayor escala.

Por lo tanto, se recomienda desarrollar investigaciones complementarias bajo condiciones de operación continua y durante periodos más prolongados, con el propósito de evaluar el comportamiento hidráulico y estructural de la geomembrana frente a diferentes condiciones ambientales y variaciones en la calidad del agua. Aunque en el presente estudio se logró establecer una vida útil aproximada de 20 días para la membrana filtrante, la implementación de pruebas a largo plazo permitiría obtener información más precisa sobre los procesos de colmatación, desgaste del material y posibles pérdidas de eficacia del sistema con el paso del tiempo.

También resulta importante considerar la incorporación de procesos complementarios de tratamiento, especialmente métodos de desinfección como cloración, radiación ultravioleta o ebullición, en aquellos casos donde el sistema sea implementado de manera permanente para consumo humano. Aunque los resultados microbiológicos obtenidos fueron favorables, la integración de etapas adicionales permitiría fortalecer aún más las condiciones de seguridad sanitaria del agua tratada y garantizar mayor confiabilidad en escenarios reales de aplicación rural.

Otro aspecto relevante consiste en ampliar el análisis de contaminantes evaluados dentro del sistema de filtración. Durante el desarrollo del proyecto se identificó que la fuente hídrica utilizada por la comunidad se encuentra expuesta a actividades domésticas y agrícolas que podrían aportar diferentes sustancias contaminantes al agua. Por esta razón, futuros

estudios podrían incluir análisis relacionados con pesticidas, fertilizantes, metales pesados y otros compuestos asociados a actividades agropecuarias presentes en la zona rural de la finca El Tamarindo.

Desde el punto de vista metodológico, sería conveniente realizar nuevas pruebas utilizando diferentes proporciones de fibras vegetales y agentes estabilizantes durante la elaboración de la geomembrana. Modificaciones en el espesor, grado de compactación y orientación de las fibras podrían influir directamente en la velocidad de filtración, resistencia mecánica y eficacia de retención de contaminantes. Este tipo de variaciones experimentales permitiría optimizar el diseño del material filtrante y mejorar el rendimiento general del sistema piloto.

Asimismo, se considera importante que instituciones académicas y centros de investigación continúen apoyando proyectos enfocados en tecnologías sostenibles para el tratamiento de agua en comunidades rurales. Este tipo de investigaciones no solo contribuyen al fortalecimiento del conocimiento científico y técnico, sino que también permiten desarrollar soluciones accesibles y adaptadas a contextos con limitaciones económicas y baja cobertura de servicios públicos. El aprovechamiento de residuos agrícolas como el pseudotallo de plátano representa además una alternativa ambientalmente sostenible que favorece la economía circular y el uso eficiente de recursos disponibles localmente.

En relación con la comunidad de la finca El Tamarindo, sería importante promover estrategias de educación ambiental orientadas al manejo adecuado de las fuentes hídricas y a la prevención de actividades que deterioren la calidad del agua. Durante el desarrollo de la investigación se evidenció la presencia de vertimientos domésticos y actividades de lavado realizadas directamente cerca de la fuente superficial utilizada para consumo humano, situación que incrementa el riesgo de contaminación microbiológica y química del recurso hídrico. Por ello, el fortalecimiento de prácticas comunitarias relacionadas con la protección del agua podría contribuir significativamente a mejorar las condiciones sanitarias de la población.

Adicionalmente, se recomienda desarrollar estudios específicos orientados a evaluar la eficacia del prefiltro incorporado en el sistema piloto de tratamiento, con el propósito de determinar el porcentaje de remoción de contaminantes que se alcanza durante esta etapa, antes

de que el agua entre en contacto con la geomembrana elaborada a partir de pseudotallo de plátano. Para ello, sería conveniente realizar análisis comparativos de la calidad del agua a la entrada y salida del prefiltro, considerando parámetros como turbidez, sólidos suspendidos y otros indicadores fisicoquímicos y microbiológicos pertinentes. Esta evaluación permitiría cuantificar el aporte individual del prefiltro al proceso de tratamiento, establecer qué proporción de los contaminantes es retenida previamente y diferenciar su eficacia de remoción respecto a la obtenida posteriormente mediante la geomembrana filtrante. De esta manera, se lograría una comprensión más precisa del funcionamiento de cada etapa, facilitando la identificación de oportunidades de mejora y la optimización del rendimiento general del sistema piloto.

También sería conveniente implementar programas de mantenimiento preventivo en sistemas de filtración similares al desarrollado en este proyecto, incluyendo monitoreo constante del caudal, limpieza periódica de componentes hidráulicos y reemplazo programado de la geomembrana cuando el sistema presente disminuciones significativas en su rendimiento. Estas acciones permitirían conservar la eficacia hidráulica del sistema y evitar pérdidas importantes en la capacidad de tratamiento ocasionadas por fenómenos de colmatación del material filtrante.

Desde el ámbito investigativo, la aplicación de técnicas analíticas más especializadas podría complementar el estudio realizado en este trabajo. El uso de herramientas como microscopía electrónica de barrido, análisis de bioadsorción superficial o estudios avanzados de permeabilidad permitiría caracterizar con mayor precisión la estructura interna de la geomembrana y comprender mejor los mecanismos involucrados en la retención de contaminantes. Esto facilitaría el desarrollo de biomateriales con propiedades optimizadas para futuras aplicaciones en tratamiento de agua.

Finalmente, se espera que esta investigación pueda servir como referencia para otros estudiantes y grupos de investigación interesados en el desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas al tratamiento alternativo de agua. Los resultados obtenidos evidencian que el pseudotallo de plátano posee potencial como material filtrante en sistemas de bajo costo y fácil implementación, especialmente en comunidades rurales donde el acceso a tecnologías

convencionales de potabilización es limitado. Continuar fortaleciendo este tipo de investigaciones permitirá generar soluciones ambientalmente sostenibles y socialmente aplicables a diferentes contextos rurales del país.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Municipal de Becerril - Cesar. (2020). *Nuestro municipio*. https://www.becerril-cesar.gov.co/municipio/nuestro-municipio

Amaya, R. J. G., Bayona, M. A. A., Velázquez, L. F. V., Torrado, A. A. M., & Uscátegui, P. N. A. (2024). Cuantificación del glifosato en fuentes de abastecimiento subterráneas y de agua potable que suministran al municipio de Aguachica, Cesar. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3649

Bedoya-Betancur, S. A., Arriola-Villaseñor, E., Valencia-Gonzalez, J. D., Ortiz-Muñoz, D. A., Barrera-Zapata, R., Hernández-Maldonado, J. A., & Ardila-Arias, A. N. (2023). bioadsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. *Revista Ion, 36(2),* 15-32. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2023000200015&script=sci_arttext

Bulla, N. (2023). *Estimación del riesgo de enfermedad por exposición a salmonella SPP resistente a ciprofloxacina y ampicilina Por ingestión de lechuga irrigada con agua proveniente del río Bogotá en el distrito de Riego La Ramada* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/b17a8ec3-9f2f-4095-951a-18c169c7ae8c

Chávez, J. A. V. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, *35*, 304-308. https://www.scielosp.org/article/rpmesp/2018.v35n2/304-308/es/

Conejeros Molina, A., Hueichaqueo Pichunman, C., Martinez-Jimenez, B. L., & PlaceresRemior, A. (2021). Monitoreo de calidad del agua en sistema de agua potable rural. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 42(3),* 60-70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282021000300060&script=sci_arttext&tlng=pt

Conejeros Molina, A., Hueichaqueo Pichunman, C., Martinez-Jimenez, B. L., & PlaceresRemior, A. (2021). Monitoreo de calidad del agua en sistema de agua potable rural. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, *42*(3), 60-70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282021000300060&script=sci_arttext&tlng=pt

El Pilón. (2022, marzo 22). *El agua del Cesar y sus complejidades*. El Pilón. https://elpilon.com.co/el-agua-del-cesar-y-sus-complejidades/

García Barrera, A. V. (2018). *Tratamiento de agua contaminada con metales pesados utilizando como medios filtrantes biorresina intercambiadora de cationes de la cáscara y tallo de guineo y carbón activado de endocarpo de coco* [Tesis de especialización, Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE]. https://www.itca.edu.sv/wp-content/uploads/2018/10

Granda, M. (2019). *Bioadsorción de hidrocarburos de agua contaminada utilizando el pseudotallo del plátano Dominico Harton y su aprovechamiento integral como sustrato para cultivo de Pleurotus SP.* [Proyecto de investigación Presentado para optar por el grado académico de: Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo]. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/10801

Jurado, C. D., & Yzarra, L. H. (2021). La calidad del agua potable y su influencia en la salud humana. *GnosisWisdom*, *1*(3), 11-20. https://www.journal.gnosiswisdom.pe/index.php/revista/article/view/19

Lozano, J. J. A. (2019). Recomendaciones para diseño y optimización de plantas de tratamiento de agua potable, considerando aspectos de funcionalidad y durabilidad. *Prospectiva*, *17*(2). http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/1732

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2015). *Brock biology of microorganisms* (14.ª ed.). Pearson Education. https://www.academia.edu/42224816/Biología_de_los_Microorganismos_Brock_14_Edición

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5.ª ed.). McGraw-Hill Education. https://books.google.com.co/books/about/Wastewater_Engineering_Treatment_and_Res.html?id=6KVKMAEACAAJ&redir_esc=y

OMS. (2021). *Water sanitation and health*. World Health Organization. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-heal

Pawar, S., Bagali, S., & Gowrishankar, B. S. (2023). Column study using modified banana pseudo stem as adsorbent for removal of Pb (II). *Heliyon, 9(5).* https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)02676-2

Rahman, M. W., Nipa, S. T., Rima, S. Z., Hasan, M. M., Saha, R., Halim, M. A., ... & Deb, A. (2022). Pseudo-stem banana fiber as a potential low-cost adsorbent to remove methylene blue from synthetic wastewater. *Applied water science, 12(10*), 242. https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-022-01769-2

Ramírez Franco, José Herney, & Enríquez Enríquez, Maryeni Karina. (2015). Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del seudotallo de plátano. *Acta Agronómica, 64(3),* 209-213. https://doi.org/10.15446/acag.v64n3.43488

Rodríguez, E. D. V. (2018). *Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante MBR combinado con oxidación avanzada y con filtración por membranas* (Doctoral dissertation, Universitat d'Alacant/Universidad de Alicante). https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=150514

Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo arquitectura-CUC, 17*, 29-48. https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/1527

Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo arquitectura-CUC*, *17*, 29-48. https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/1527

Sarmiento, E. G., Perez, J. R., & Ortiz-Ospino, L. (2019). Análisis de las tecnologías en sistemas de abastecimiento de agua potable. *Investigación y desarrollo en TIC*, *10*(2), 32-44. https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identic/article/view/4009

Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science* (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Spellman, F. R. (2017). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (3.ª ed.). CRC Press. https://books.google.com.co/books?id=Ja28hvTxVpwC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4.ª ed.). McGraw-Hill. https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR2017-01468/v22_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf

Valencia, J. A., León, I. A. B., & Gómez, L. A. J. (2023). *Teoría y práctica de la purificación del agua potable. Tomo 2* (Vol. 2). Ecoe Ediciones. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8wziEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=tratamiento+de+Agua+potable+&ots=Ik_ifup_EG&sig=MUwLZuz6gqlCqBAfabeu_eq9Xw0

Vides-Navarro, F., Montes-Calderón, Á., Fernández-Cuello, G., & Rojas-Martínez, E. (2015). Caracterización espeleológica e inventario biológico de la Caverna del Diablo en el municipio de Becerril, Departamento del Cesar, Colombia. *Respuestas*, *20*(2), 93-104. https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/356

Viessman, W., & Hammer, M. J. (2005). *Water supply and pollution control* (7.ª ed.). Pearson Prentice Hall. https://books.google.com.co/books/about/Water_Supply_and_Pollution_Control.html?id=QTorAAAAIAAJ&redir_esc=y

10 ANEXOS

Anexo 1. *Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológico después de la filtración (Replica 1)*

Laboratorio Ambiental y de Alimentos
Nancy Flórez García
Confiabilidad a toda prueba

COD: RO-104 Ver:16 del 18 de febrero del 2026.

INFORME DE ENSAYOS
N° 128068

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

EMPRESA : SANTIAGO JAVIER PERTUZ MARTÍNEZ
DIRECCIÓN : CALLE 24 #5-64
CONTACTO : SANTIAGO JAVIER PERTUZ MARTÍNEZ
CARGO : ESTUDIANTE
NIT : 1003317764
CIUDAD : VALLEDUPAR
TELÉFONO : 3046420997

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

NOMBRE : AGUA POTABLE
LUGAR DE MUESTREO : UNIVERSIDAD
PUNTO DE MUESTREO : LABORATORIO (BOTELLA)
TIPO DE MUESTRA : SIMPLE
PLAN DE MUESTREO : N.S
PROC DE MUESTREO : N.S
CÓDIGO : 2603161731
LOTE : N.A.
REGISTRO INVIMA : N.A.
HORA MUESTRA : 12:05
MUESTREO : 2026/03/24
RECEPCIÓN : 2026/03/24
INICIO ENSAYOS : 2026/03/24
FINAL ENSAYOS : 2026/04/01
INFORME : 2026/04/01

Fisicoquímico

ANÁLISIS	MÉTODO - TÉCNICA	LCM	FECHA ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO	INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO	CUMPLIMIENTO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) mg O2/L (NA)	SM 5210 B, SM 4500-O H - Incubación 5 días	2,00	2026/03/25	N.R	<2,00	-	NO APLICA
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg O2/L	SM 5220 C - Volumetría	20	2026/03/30	N.R	<20	-	NO APLICA
Determinación de Alcalinidad Total mg CaCO3/L a pH 4,49	SM 2320 B 24th Edition, 2023. - Volumetría	0,5	2026/03/24	200	78,7	0,157	CUMPLE
Determinación de Conductividad (25ºC) µS/cm	SM 2510 B - Electrométrico	-	2026/03/28	1000	124,7	2,49	CUMPLE
Determinación de Turbidez NTU	SM 2130 B. 24th Edition, 2023. - Nefelométrico	0,5	2026/03/24	2	0,500	0,008	CUMPLE
pH U pH	SM 4500-H+ B - Electrométrico	-	2026/03/24	6,5-9,0	7,08	-	CUMPLE
Sólidos Disueltos Totales mg/L	SM 2540 C - Gravimétrico	5	2026/03/28	N.R	123	2,46	NO APLICA
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	SM 2540 D - Gravimétrico	5	2026/03/25	N.R	69,6	1,43	NO APLICA
Temperatura ºC	SM 2550 B - Electrométrico	-	2026/03/24	N.R	23,9	-	NO APLICA

Microbiológico

ANÁLISIS	MÉTODO - TÉCNICA	LCM	FECHA ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO	INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO	CUMPLIMIENTO
Determinación y recuento de Coliformes totales UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/03/24	0	DNPSC	-	NO CUMPLE
Determinación y recuento de Escherichia coli UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/03/24	0	<1	-	CUMPLE

Especificación: RESOLUCION 2115/07 CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO (MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL, DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL)

NOTA :

La muestra a la que se refieren los resultados que figuran en este informe de ensayos, excepto la fecha de recepción, fecha de inicio de ensayo, fecha final de ensayos y fecha de informe han sido proporcionados por el cliente o un tercero de conformidad con las directrices del cliente. En consecuencia, los datos que figuran en el informe no constituyen una garantía de la representatividad de la muestra y por tanto se refieren única y exclusivamente a dicha muestra. El Laboratorio no es responsable del origen o la fuente de dónde ha sido extraída la muestra.

Anexo 2. *Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológico después de la filtración (Replica 2)*

TURBIEDAD		
Repeticiones		
1	2	3
		
pH		
Repeticiones		
1	2	3
		
Conductividad		
Repeticiones		
1	2	
		
Alcalinidad		
Repeticiones (Volumen gastado)		
1,6 ML	2,1 ML	2,5 ML

Solidos disueltos totales, SST, Escherichia coli y coliformes totales

Fisicoquímico							
ANÁLISIS	**MÉTODO - TÉCNICA**	**LCM**	**FECHA ANÁLISIS**	**ESPECIFICACIÓN**	**RESULTADO**	**INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO**	**CUMPLIMIENTO**
Sólidos Disueltos Totales mg/L	SM 2540 C - Gravimétrico	5	2026/08/29	N.R	128	2,56	NO APLICA
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	SM 2540 D - Gravimétrico	5	2026/08/29	N.R	<5	-	NO APLICA
Microbiológico							
ANÁLISIS	**MÉTODO - TÉCNICA**	**LCM**	**FECHA ANÁLISIS**	**ESPECIFICACIÓN**	**RESULTADO**	**INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO**	**CUMPLIMIENTO**
Determinación y recuento de Coliformes totales UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/08/25	0	68	7,14	NO CUMPLE
Determinación y recuento de Escherichia coli UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/08/25	0	<1	-	CUMPLE

Especificación: RESOLUCIÓN 2115/07 CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO (MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL)

Anexo 3. *Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológico después de la filtración (Replica 3)*

TURBIEDAD		
Repeticiones		
1	2	3
		
pH		
Repeticiones		
1	2	3
		
Conductividad		
Repeticiones		
1	2	
		
Alcalinidad		
Repeticiones (Volumen gastado)		
1,9 ML	2,0 ML	2,2 ML

Solidos disueltos totales, SST, Escherichia coli y coliformes totales

Fisicoquímico							
ANÁLISIS	**MÉTODO - TÉCNICA**	**LCM**	**FECHA ANÁLISIS**	**ESPECIFICACIÓN**	**RESULTADO**	**INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO**	**CUMPLIMIENTO**
Sólidos Disueltos Totales mg/L	SM 2540 C - Gravimétrico	5	2026/08/29	N.R	129	2,58	NO APLICA
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	SM 2540 D - Gravimétrico	5	2026/08/29	N.R	<5	-	NO APLICA
Microbiológico							
ANÁLISIS	**MÉTODO - TÉCNICA**	**LCM**	**FECHA ANÁLISIS**	**ESPECIFICACIÓN**	**RESULTADO**	**INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO**	**CUMPLIMIENTO**
Determinación y recuento de Coliformes totales UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/08/25	0	<1	-	CUMPLE
Determinación y recuento de Escherichia coli UFC/100mL	ISO 9308-1: 2014. - Filtracion por Membrana	1	2026/08/25	0	<1	-	CUMPLE

Especificación: RESOLUCIÓN 2115/07 CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO (MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL)