

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE UN HUMEDAL
ARTIFICIAL USANDO *Gyneryum Saggitatum* Y *Heliconia Sp* EN AGUAS
RESIDUALES DOMESTICAS EN EL PREDIO MAKUMA DE LA VEREDA
CALABAZO, MAGDALENA**



AUTORES:

JARLIS CAMPUZANO GÁMEZ

ONEIDER SMITH VILORIA MENDOZA

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2023

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE UN HUMEDAL
ARTIFICIAL USANDO *Gyneryum Saggitatum* Y *Heliconia Sp* EN AGUAS
RESIDUALES DOMESTICAS EN EL PREDIO MAKUMA DE LA VEREDA
CALABAZO, MAGDALENA**

AUTORES:

JARLIS CAMPUZANO GÁMEZ
ONEIDER SMITH VILORIA MENDOZA

DIRECTOR

KARINA PAOLA TORRES CERVERA
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

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

VALLEDUPAR – CESAR

2023

DEDICATORIA

En el telar de sueños y logros, donde los hilos del esfuerzo y la pasión se entrelazan, quisiera plasmar mi más sincero reconocimiento hacia mis faros de inspiración: mis padres, Rocío del Carmen Mendoza y Álvaro Viloría Guzmán. A mis hermanas, Vanessa Viloría y Elida Viloría, cuya complicidad y risas han tejido el telón de fondo de mi travesía, pintando cada recuerdo con colores vibrantes. En especial, mi corazón encuentra su eco en la presencia etérea de Isabel Mendoza Montaña, un espíritu que perdura en cada logro, en cada latido, en cada suspiro de este logro alcanzado.

Oneider Smith Viloría Mendoza

Dedico esta tesis a dos pilares inquebrantables en mi vida: mi amada madre Yenis Gámez Rodríguez y mi querido padre Víctor Campuzano Marulanda. Su amor incondicional y apoyo constante han sido mi fuente de fortaleza y guía en este emocionante viaje académico. Mamá, tu inspiración y ejemplo de tenacidad me impulsaron a alcanzar cada logro, tus consejos sabios y aliento constante me recordaron que no hay límites para mis sueños. Mi familia, con su amor y sacrificio, ha sido mi faro en las noches oscuras de estudio y mis celebrantes en cada triunfo. Cada página escrita lleva un pedacito de su apoyo y cariño, y cada descubrimiento realizado es un tributo a su confianza en mí, para hermanos y hermanas, cada uno de ustedes ha sido un pilar en mi camino, un recordatorio constante de que nunca he estado solo en este viaje.

Jarlis Campuzano Gámez



AGRADECIMIENTOS

A mi querida familia,

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su constante apoyo a lo largo de este desafiante viaje. Sus palabras de aliento, su amor incondicional y su presencia han sido mi mayor fortaleza. Cada paso que he dado en esta tesis ha sido posible gracias a ustedes, y su compromiso ha sido mi inspiración constante. Mi logro es también su logro, y por ello les estaré eternamente agradecido/a.

A mis valiosas amistades,

En este sendero académico, no solo he encontrado conocimiento, sino también amistades que han sido faros de luz en mi travesía. Ustedes han sido mi red de apoyo, mi refugio en los momentos de duda y mi fuente de risas y alegría. Entre todas estas amistades, quince de ustedes han destacado de manera especial, siendo mi ancla y mi guía. Su presencia ha convertido cada obstáculo en una oportunidad para crecer, y por ello, les envío mi gratitud más profunda.

A mis mentores y guías,

La sabiduría que han compartido conmigo ha sido un regalo inmenso en mi trayecto académico. Sus enseñanzas no solo han forjado mi intelecto, sino también mi visión de la vida. Su dedicación y disposición para impartir sus conocimientos y experiencias han sido fundamentales para mi desarrollo.

A todos aquellos que han dejado una huella en mi camino,

Cada interacción, cada conversación y cada gesto de aliento que he recibido a lo largo de esta travesía ha dejado su marca en mi corazón. A pesar de la limitación de espacio, quiero expresar mi reconocimiento a cada individuo que ha cruzado mi camino y ha contribuido a mi crecimiento. Su influencia ha sido inestimable, y su presencia ha sido un regalo que atesoro profundamente. Cada uno ha sido una pieza fundamental en mi recorrido académico y personal. Mi éxito no es solo mío, sino un reflejo del amor, el apoyo y la sabiduría que he recibido de cada uno de ustedes. Desde lo más profundo de mi ser, ¡gracias por ser parte de mi viaje!

Oneider Smith Viloría Mendoza

AGRADECIMIENTOS

Mis queridos amigos, mientras miro atrás en el camino que recorrimos juntos durante este proceso, no puedo evitar sentirme abrumado por una profunda gratitud y emoción. Cada paso que di en la realización de esta tesis estuvo impregnado de su apoyo inquebrantable y su amor desinteresado. Me siento afortunado y bendecido por tener amigos como ustedes, cuya amistad y apoyo han sido un faro en este viaje. A mis amigos, ustedes han sido mi roca, mis confidentes y mis motivadores incansables. Tener amigos como ustedes es un tesoro invaluable, y estoy agradecido por cada momento que compartimos. A mi querida profesora Karina Torres, su dedicación y guía han sido fundamentales para el éxito de este proyecto. Su conocimiento, paciencia y apoyo constante me dieron la confianza y la dirección que necesitaba. Su influencia en mi crecimiento académico y personal es incalculable, y siempre recordaré sus enseñanzas con gratitud y respeto. Hermes y Grey, ustedes han sido mis guías fieles en este proceso, Su experiencia y consejos fueron invaluable. A mis familiares, su amor y preocupación constante por mi bienestar y futuro han sido mi fuerza motriz. Cada palabra de aliento y cada sacrificio no pasaron desapercibidos, y les agradezco desde lo más profundo de mi corazón por su constante apoyo. Mi corazón está lleno de gratitud y cariño por todos ustedes. Gracias por ser una parte fundamental de mi historia y por hacer que este logro sea aún más significativo.

A mis queridas abuelas, Adelaida Marulanda y Alina Gámez, Hoy, en un momento de logro y celebración, quiero tomar un instante para expresar mi más profundo agradecimiento y amor hacia ustedes. Cada paso en este camino ha estado iluminado por su influencia, su amor incondicional y su sabiduría. A pesar de la distancia, siento su presencia en cada esfuerzo que he emprendido. Abuela Adelaida, tus historias de perseverancia y coraje han sido mi inspiración constante. Tus valores y tu amor por la familia han sido un faro que me ha guiado a lo largo de este trayecto. Abuela Alina, tu amor infinito y tus palabras de aliento han sido un bálsamo en momentos de duda. Tu dulzura y fortaleza han dejado una huella imborrable en mi corazón. Cada paso que doy, lo hago con la esperanza de que estés orgullosa de mí, sabiendo que tu amor es mi fuerza motriz.

Jarlis Campuzano Gámez

RESUMEN

El presente estudio se centró en la evaluación de la capacidad depuradora de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena. Se utilizaron dos especies vegetales endémicas (*Gyneryum Saggitatum* y *Heliconia Sp*) con el objetivo de investigar su eficacia en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales. La investigación se desarrolló a través de un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo que involucró la recopilación de datos sobre la calidad del agua antes y después del tratamiento en el humedal artificial. Se llevaron a cabo mediciones de parámetros clave como el pH, temperatura, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno utilizando métodos estandarizados. Los resultados obtenidos revelaron una mejora significativa en la calidad del agua post tratamiento en los humedales artificiales. Tanto *Gyneryum Saggitatum* como *Heliconia Sp* demostraron una capacidad efectiva en la remoción materia orgánica. Las concentraciones de contaminantes se redujeron considerablemente, presentándose un porcentaje de remoción de DQO de 85 %, DBO₅ de 80 % y SST de 97 % por parte de *Heliconia Sp*, mientras que *Gyneryum Saggitatum* evidenció un 94 % de DQO, un 75 % de DBO₅ y un 83 % de SST. Llegado a la conclusión que, a nivel mundial, estas investigaciones y prácticas avanzadas en ingeniería ambiental establecen un precedente importante para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Palabras Claves: Agua residual doméstica, Humedales, Fitorremediación, *Heliconia Sp*, *Gyneryum Saggitatum*.

ABSTRACT

*The present study focused on the evaluation of the purification capacity of three pilot-scale subsurface flow artificial wetlands for the treatment of domestic wastewater in the Makuma farm in the Calabazo, Magdalena, department of Magdalena. Two endemic plant species (*Gyneryum Saggitatum* and *Heliconia Sp*) were used to investigate their effectiveness in the removal of pollutants present in wastewater. The research was developed through a quantitative approach and a descriptive scope that involved the collection of data on water quality before and after treatment in the artificial wetland. Measurements of key parameters such as pH, temperature, total suspended solids, chemical oxygen demand and biological oxygen demand were conducted using standardized methods. The results obtained revealed a significant improvement in post-treatment water quality in the constructed wetlands. Both *Gyneryum Saggitatum* and *Heliconia Sp* demonstrated effective organic matter removal capacity. The concentrations of pollutants were reduced, presenting a COD removal rate of 85 %, BOD5 of 80 % and TSS of 97 % by *Heliconia Sp*, while *Gyneryum Saggitatum* showed 94 % of COD, 75 % of BOD5 and 83 % of TSS. It is concluded that, worldwide, this research and advanced practices in environmental engineering set an important precedent for the sustainable management of water resources.*

Key words: *Domestic wastewater, Wetlands, Phytoremediation, Heliconia Sp, Gyneryum Saggitatum.*



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	15
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GENERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. MARCO REFERENCIAL.....	18
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	18
4.2. MARCO TEÓRICO	20
4.2.1. Agua Residual (AR).....	20
4.2.2. Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas En Colombia.....	21
4.2.3. Biorremediación.....	21
4.2.4. Heliconia Sp.....	22
4.2.5. Gynerium Sagittatum (Caña Brava).....	22
4.2.6. Humedales Naturales	23
4.2.7. Humedales Artificiales O Construidos	23
4.2.8. Componentes De Los Humedales Construidos.....	23
4.3. MARCO CONCEPTUAL	24
4.4. MARCO CONTEXTUAL.....	26
4.4.1. Localización De La Vereda Calabazo.....	26
4.5. MARCO LEGAL	27
5. MARCO METODOLÓGICO.....	32

5.1.	LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN.....	32
5.2.	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
5.3.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
5.4.	POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	33
5.5.	MUESTRA POBLACIONAL.....	33
5.6.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
5.7.	ESTRATEGIA Y DESARROLLO METODOLÓGICO.....	34
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	41
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS (TURBIDEZ, pH, TEMPERATURA Y SST) Y QUÍMICOS (DBO ₅ Y DQO) DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	41
6.1.1.	Toma De Las Muestras De Agua Residual Doméstica.....	41
6.1.2.	Traslado La Muestra Al Laboratorio De La Universidad Popular Del Cesar Y Hacer Su Respectivo Análisis.....	44
6.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS TRES SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA PILOTO, UNO CON <i>Heliconia sp</i> , OTRO CON <i>Gynerium Sagittatum</i> Y EL CONTROL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO CASCARILLA DE ARROZ COMO MEDIO FILTRANTE.....	51
6.2.1.	Diseño De Los Humedales De Flujo Subsuperficial.....	51
6.2.2.	Construcción De Los Dos Humedales De Flujo Subsuperficial.....	54
6.2.3.	Obtención De Las Especies Fitorremediadoras.....	56
6.2.4.	Agregado Del Medio Filtrante Y Las Plantas Al Humedal De Flujo Subsuperficial Para Su Posterior Utilización.....	59
6.3.	DETERMINAR LA EFICIENCIA LOS HUMEDALES CON FITORREMEDIACIÓN <i>Heliconia sp</i> vs. <i>Gynerium Sagittatum</i>	62
6.3.1.	Caracterización De La Calidad Del Agua Después Del Tratamiento.....	62

6.3.2. Establecimiento De La Calidad Del Agua De Los Dos Humedales Con Base De La Normativa Vigente Colombiana	72
6.3.3. Selección La Especie Vegetal Con Mayor Eficiencia En La Depuración De Los Contaminantes En Las Aguas Residuales Domésticas	75
7. CONCLUSIONES	79
8. RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Georreferenciación de Colinas de Calabazo, Magdalena.....	27
Figura 2. Esquema del sistema implementado.....	38
Figura 3. Modelación 3D del diseño del humedal de flujo subsuperficial	39
Figura 4. Humedales artificiales a escala piloto construidos en vidrio.....	55
Figura 5. Obtención de la especie <i>Gynerium Sagittatum</i>	56
Figura 6. Especies afectadas por estrés térmico.....	57
Figura 7. Adaptación de la especie <i>Heliconia sp</i>	58
Figura 8. Adecuación de las capas de sustrato de los humedales	59
Figura 9. Implementación de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	61
Figura 10. Eficiencia de remoción de contaminantes por cada humedal.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Marco legal del proyecto	28
Tabla 2. Caracterización <i>in situ</i> del ARD del predio Makuma.....	35
Tabla 3. Caracterización <i>ex situ</i> de la muestra de ARD del predio Makuma	36

Tabla 4. Comparación del humedal artificial con la normativa Resolución 0631 de 2015	40
Tabla 5. Caracterización <i>in situ</i> del ARD del predio Makuma.....	42
Tabla 6. Caracterización <i>ex situ</i> de la muestra de ARD del predio Makuma	44
Tabla 7. Parámetros de diseño del humedal.....	52
Tabla 8. Caracterización del agua post tratamiento del humedal con <i>Heliconia sp</i>	62
Tabla 9. Caracterización del agua post tratamiento del humedal con <i>Gynerium Sagittatum</i> .	67
Tabla 10. Caracterización del agua post tratamiento del humedal control	69
Tabla 11. Comparación del humedal con <i>Heliconia Sp</i> con la Resolución 0631 de 2015	73
Tabla 12. Comparación del humedal con <i>Gynerium Sagittatum</i> con la Resolución 0631 de 2015.....	73
Tabla 13. Comparación del humedal control con la Resolución 0631 de 2015	74



INTRODUCCIÓN

Este trabajo posee como tema de investigación el tratamiento de aguas residuales de procedencia domestica mediante la implementación de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial usando como medio filtrante la cascarilla de arroz y así evaluar la capacidad depuradora de dos especies vegetales (*Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*), para su posterior uso en el riego de plantas de cultivo del predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena.

El interés de hacer el tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto es disminuir el consumo de agua potable y a su vez poder lograr un correcto vertimiento de las aguas resultantes de la actividad humana del hogar usando sistemas alternativos, los cuales son económicos y de fácil acceso. Además de ofrecer la elección de volver a utilizar el efluente tratado con el fin de uso agua riego, llegando a condicionar al predio Makuma de forma sostenible y sustentable al disminuir la cantidad de recursos usados y produciendo un menor impacto ambiental.

El estudio se llevará a partir de un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo, donde primeramente se determinarán los parámetros del agua residual sin tratamiento para identificar sus características fisicoquímicas más relevantes como lo son turbidez, pH, temperatura, Solidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante un análisis *in situ* y *ex situ*, para posteriormente proceder a hacer el diseño y puesta en marcha de los tres humedales con *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* y control; con el objetivo de realizar el tratamiento de agua residual doméstica. Al efluente resultante del tratamiento se le efectuarán las mismas pruebas de calidad de agua para así identificar la especie con mayor capacidad depuradora.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente población ejerce una presión intensificada sobre los recursos naturales, dando lugar a una marcada contaminación de aguas residuales. Esta polución afecta los ecosistemas en su totalidad, resultando en la pérdida de biodiversidad, la degradación de servicios ecosistémicos y la propagación de enfermedades, generando consecuencias adversas para la salud humana. Además, esta problemática impacta negativamente en la seguridad hídrica y alimentaria, subrayando la importancia de abordar con enfoques científicos y tecnológicos el tratamiento efectivo de las aguas residuales (Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación [UNESCO] y ONU-Agua, 2020).

En el contexto colombiano, es significativo destacar que, de los 1.122 municipios registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), solamente el 48,22 % dispone de alguna infraestructura dedicada al tratamiento de aguas residuales (Venegas, 2018). En consecuencia, se aborda únicamente un 10 % de las aguas residuales del país, a pesar de que una población estimada en 50 millones de habitantes contribuye con la generación de Aguas Residuales Domésticas (ARD). En el ámbito rural, las aguas residuales (AR) a menudo carecen de un tratamiento adecuado, resultando en la emisión de contaminantes (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., s.f). Esta circunstancia ha llevado a una creciente y crítica descarga de estos efluentes sin su debido tratamiento, lo cual impacta negativamente en los cuerpos de agua circundantes (Acuatecnica S.A.S, 2017a).

Siguiendo esta línea, según la Corporación Autónoma Regional Del Magdalena (CORPOMAG, 2019), en la cuenca del Río Cesar se desarrolla una influencia cultural originaria de los pueblos indígenas Koguii, Arhuaco y Wiwa. Estos grupos, desplazados después del periodo colonial, se establecieron en la Sierra Nevada y mantienen conexión con su territorio durante décadas. Los pueblos ancestrales expresan preocupación por efectos adversos debido al turismo, conflicto armado, privatización y expansión económica, anticipando consecuencias irreparables para el entorno natural y el equilibrio.

En particular, preocupa la contaminación en la Cuenca del Río Piedra, con residuos sólidos y vertidos, incluyendo también la descarga de aguas residuales domésticas. En la propiedad Makuma, atravesada por el Río Piedras, hay deforestación y tala para construcción

y cultivos. La falta de regulación en el sector agropecuario lleva a uso indiscriminado de agroquímicos, llegando al río y afectando la salud de quienes viven en áreas bajas (CORPOMAG, 2019).

En consecuencia, de lo anterior surge la necesidad imperativa de desarrollar y ejecutar programas y proyectos efectivos para el control de la contaminación en Colombia. En particular, ante la evidencia de una preocupante contaminación cruzada entre diferentes cuerpos de agua, se resalta la importancia de abordar esta problemática de manera integral y estratégica. A razón de lo anterior, la falta de tratamiento adecuado de las ARD vertidas en estos cuerpos de agua puede dar lugar a una carga contaminante relevante que potencialmente alteraría el equilibrio y la calidad del entorno acuático (CORPOMAG, 2019).

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considerando lo definido anteriormente, los autores formulan la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la eficacia de dos humedales artificiales usando *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* (caña flecha) para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena?



2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta la problemática que aqueja al predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena; en cuanto al vertimiento de aguas residuales y la contaminación existente surge la necesidad de dar solución. Las aguas residuales domesticas (ARD) son un producto de las diferentes actividades humanas del hogar donde se produce un gran número de contaminantes que se manifiestan en la presencia de sólidos, desechos orgánicos, detergentes, jabones y grasas. Dichos residuos se descargan en afluentes naturales con un escaso o nulo tratamiento causando un impacto ambiental negativo (Acuatecnica S.A.S, 2017b).

La presente investigación tiene el propósito de determinar la eficacia de dos humedales artificiales usando especies vegetales (*Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*) implementadas en un humedal de flujo subsuperficial cada una para aumentar la depuración de las ARD en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena, con el propósito de prevenir y controlar los riesgos causados por su consumo.

Según Peña-Salamanca et al., 2005; Ospina-Álvarez et al., 2006; Wei et al., 2009 citados por Peña-Salamanca et al., (2013) plantean el uso de la fitorremediación para transformar o destruir contaminantes del agua debido a su potencial fisiológico para asimilar y tolerar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento y principalmente por su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes.

Varios investigadores recomiendan la aplicación de humedales de flujo subsuperficial por ser una opción eficaz y de bajo costo para el tratamiento de las aguas residuales, además de considerarse adecuados para la depuración de ARD en áreas rurales con pequeños núcleos. De igual forma, el uso de humedales de flujo subsuperficial presenta soluciones a los problemas que las tecnologías convencionales son incapaces de resolver en zonas con pequeñas poblaciones como lo son las veredas (Rodríguez-González et al., 2013).

En la ciudad de Santa Marta, Magdalena, los habitantes presentan problemas en la recolección, tratamiento y disposición de agua residual. A su vez se presenta un alto vertimiento de aguas residuales de procedencia doméstica en ríos y en la bahía (CORPOMAG, 2019). Se busca proporcionar una alternativa sostenible y optima mediante la técnica de

fitorremediación con el objetivo de mejorar calidad del agua, mediante la implementación de humedales con las especies vegetales en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena.

Para este proyecto se contará con el uso de las plantas nativas de la zona *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*, debido a la facilidad con la que se pueden conseguir y su eficacia en el tratamiento de contaminantes en las aguas domésticas.

Según estudios realizados al evaluar la capacidad fitorremediadora de la especie *Heliconia sp*, esta es adecuada a las condiciones de los humedales para el tratamiento de aguas residuales a base de la cantidad de eliminación de DBO₅, DQO y SST, el cual está por encima del 70 % de remoción sin deterioro de sus propiedades fisiológicas. De igual forma, *Gynerium sagittatum* posee una alta adaptabilidad de crecimiento al evaluarse a diferentes cargas de lixiviados para potencial en la eliminación de cargas del contaminante de este residuo líquido (Peña-Salamanca et al., 2013).

En el proceso de tratamiento de aguas residuales domesticas existen diferentes tipos de mecanismos para lograr este proceso, los cuales cumplen la función de depurar y tratar las ARD; pero si bien requieren de una inversión la cual puede ser elevada para estos tipos de municipios o veredas que no cuentan con los recursos necesarios para poner en práctica el tratamiento convencional de aguas residuales domésticas, se nos presenta un interrogante y es ¿qué tan eficiente puede ser la implementación de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de ARD utilizando *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* para su aplicación en veredas y la disminución en costos comparado con los sistemas convencionales?



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad depuradora de un humedal artificiales usando *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* en aguas residuales domésticas en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar los parámetros físicos (Turbidez, pH, olor, temperatura y SST) y químicos (DBO₅ y DQO) de las aguas residuales domésticas del predio Makuma, Magdalena.

Implementar los tres sistemas de humedales artificiales a escala piloto., uno con *Heliconia sp*, otro con *Gynerium Sagittatum* y el control para el tratamiento de las aguas residuales domésticas utilizando cascarilla de arroz como medio filtrante.

Determinar la eficacia los humedales con fitorremediación *Heliconia sp* vs. *Gynerium Sagittatum*.



4. MARCO REFERENCIAL

A continuación, se presentarán investigaciones que respaldan el tema de investigación mediante la búsqueda de fuentes de información secundaria.

4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Bohórquez Bedoya (2015), hicieron una investigación sobre efectos del medio filtrante y la frecuencia de alimentación en humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales. Este artículo tuvo la finalidad de evaluar el tratamiento de aguas residuales domésticas con diferentes configuraciones de humedales construidos, esperando que estos sistemas cumplan con los requerimientos establecidos por la ley normativa y que realicen una remoción de DQO, DBO₅, SST, NH₄ permisible para el vertimiento en los afluentes de las aguas residuales domésticas mediante un sistema de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical; se realizaron 8 unidades a escala piloto y está fueron estudiadas haciendo comparaciones entre grava entre arena fina y media como sustratos, y también con la presencia de la planta tropical *Heliconia Psittacorum*. Los resultados revelaron que los sistemas basados en arena fueron significativamente más eficientes en la remoción de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos totales que los sistemas basados en grava. Dicho trabajo de grado es un gran aporte a la investigación para conocer el medio filtrante más eficiente al momento de diseñar los humedales.

Paredes (2014), en su investigación titulada remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical, sembrados con *heliconia (sp)*, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, evaluó la influencia que tenía la presencia de plantas *Heliconia psittacorum* y la aplicación de distintas frecuencias de alimentación, en la eficiencia de remoción en humedales construidos de flujo vertical, basados en arena como medio filtrante para el tratamiento de aguas residuales domésticas, durante su fase de aclimatación (5 meses) en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira. Los resultados muestran que la principal forma de nitrógeno removida fue el nitrógeno amoniacal con porcentajes entre 75-81%, por mecanismos de nitrificación, en donde el sistema plantado con 20 pulsos/d mostró ser el más eficiente ($p < 0,05$), esta investigación y sus resultados nos brindan información valiosa para el desarrollo de nuestro proyecto, en este caso mediante la

utilización de la *Heliconia (sp)*, en humedales construidos de flujo vertical para la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Madera-Parra et al., (2014), investigaron sobre el efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. En este estudio se evaluó la respuesta fisiológica y a cumulativa de las especies: *Colocasia Esculenta (Ce)*, *Heliconia Psittacorum (He)* y *Gynerium Sagittatum (Gs)*, en el efecto de las concentraciones de metales pesados (Hg^{+2} , Cd^{+2} , Cr^{+6} , Pb^{+2}) al sembrarse en humedales subsuperficiales de flujo horizontal (HCFSH) a escala microscópica para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario. Se tuvo un diseño factorial con 16 reactores operados en dos bloques experimentales. Clorofila, potencial hídrico y concentración de metales pesados fueron medidos en tejidos de las plantas en un tiempo de 60 días para determinar la capacidad acumuladora de la especie. La investigación mostró una diferencia en la concentración de clorofila, siendo He y Ce las de mayor producción y Gs de menor producción; además no se observaron diferencias significativas en el potencial hídrico entre las tres especies vegetales estudiadas. La especie *Gynerium Sagittatum* tuvo un mejor desempeño frente a *Heliconia Psittacorum* en la acumulación de metales pesados. El estudio es necesario para conocer las capacidades microscópicas que poseen.

Peña-Salamanca et al., (2013) realizaron una investigación la cual tiene como título, Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia Psittacorum (Heliconiace)*. Este artículo tuvo la finalidad de evaluar el desempeño fitorremediador de especies de plantas en el tratamiento de aguas residuales con el objetivo de estimar su capacidad de eliminación de DBO₅, DQO y SST; así como su respuesta fisiológica de crecimiento mediante el uso de humedales construidos subsuperficiales (HCS) y la revisión de documentos y artículos científicos. Dichos resultados demostraron lo adecuada que es a las condiciones en los humedales construidos la especie *Heliconia Psittacorum*, además de poseer un potencial fitorremediador en la eliminación de DBO₅, DQO y SST mayor al 70 %. Del mismo modo se comprobó que *Gynerium sagittatum* posee una alta adaptabilidad de crecimiento y eliminación de contaminantes al haberse evaluado a diferentes cargas de lixiviados. Con este antecedente se muestra una comparación entre la efectividad de las dos

especies que se utilizarán en la investigación, siendo necesario para conocer cuál posee mayor capacidad de fitorremediación.

Montoya et al., (2013), investigaron sobre el estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. En este estudio se hizo una comparación de tres especies de macrófitos con la finalidad de saber el grado de remoción de carga orgánica que estas pueden aportar a el tratamiento de aguas residuales, esperando obtener una reducción en DBO y DQO₅, mediante la metodología de implementación de humedales de flujo horizontales subsuperficiales, cada uno con una especie macrófita diferente entre ellas, *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*, los resultados arrojaron que las remociones promedio de DQO fueron de 97,31 % y 95,94 % para *Canna limbata*; 94,49 % y 93,50 % para *Heliconia psittacorum*; 97,39 % y 97,13 % para *Phragmites sp*. En DBO fueron del 100 % y del 99,36 % para *Canna limbata*; 99,09 % y 97,49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % y 99,45 % para *Phragmites sp*. Este estudio nos ayuda a tener un parámetro establecido acerca de la *Heliconia psittacorum*, bajo las condiciones dadas en él, basándonos en los resultados de esta observamos que tiene un potencial fitorremediador y que podremos obtener buenos resultados con la utilización de esta.

4.2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente apartado se presentarán algunas consideraciones teóricas que ayudarán a la elaboración de nuestro proyecto, aportando información clave para el desarrollo del mismo.

4.2.1. Agua Residual (AR)

Aguas residuales son aquellas que han sufrido alteraciones adversas en sus propiedades debido a acciones humanas. En consecuencia, estas aguas pierden su idoneidad para el consumo humano debido a la presencia de diversos contaminantes. Esta categoría incluye aguas residuales provenientes de actividades domésticas, urbanas, industriales y ganaderas (Arriols, 2018).

4.2.1.1 Aguas Residuales Domesticas (ARD).

Según Ariols (2018), las Aguas Residuales Domésticas (ARD) provienen de zonas urbanas y hogares, originadas por el empleo de agua potable en diversas actividades cotidianas, como duchas, cocina y piscinas.

Aguas grises: se distinguen por su contenido de jabones y grasas, resultantes de actividades como duchas, lavado de frutas, verduras, utensilios y ropa. Tienen una concentración menor de materia fecal en comparación con las aguas negras (Ariols, 2018).

4.2.2. Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas En Colombia

En Colombia, los métodos más utilizados para tratar aguas residuales domésticas son los procesos de lodos activados, lagunas de estabilización y humedales artificiales. La mayoría de estos enfoques biológicos logran eliminar aproximadamente el 80 % de la DBO₅, DQO y SST. Cuando se aplican de manera conjunta, logran tasas de eficiencia superiores al 90 %, lo que subraya la viabilidad económica de estos procesos biológicos, que se destacan por su mejor rentabilidad económica, funcional y operativa. Además, se resalta la importancia de mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en el país para reducir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Actualmente, solo se está interviniendo alrededor del 30 % de las aguas residuales totales que se generan o reciben a través de los sistemas de alcantarillado (Vargas et al., 2017).

4.2.3. Biorremediación

La biorremediación se describe como un proceso biotecnológico en el que organismos son utilizados para restaurar un entorno contaminado, ya sea en un contexto terrestre o acuático (Pilon-Smits, 2005).

La biorremediación se refiere a la utilización de organismos vivos, componentes celulares y enzimas libres para llevar a cabo procesos de mineralización, transformación parcial, humificación de residuos y agentes contaminantes, así como para modificar el estado redox de los metales. La biorremediación que empleó microorganismos fue pionera desarrollada por el científico estadounidense George M. Robinson en la década de 1960, mientras trabajaba como ingeniero en la compañía Santa María de California. Robinson realizó experimentos utilizando diversos microbios en recipientes contaminados con petróleo (Pilon-Smits, 2005).

La naturaleza también dispone de mecanismos de autorregulación. Cuando un ecosistema sufre daños o perturbaciones debido a factores físicos, químicos o biológicos, despliega mecanismos de recuperación. Bacterias, hongos, algunas plantas y protistas como las

algas pueden degradar agentes dañinos en un esfuerzo por restablecer la salud del ecosistema (Pilon-Smits, 2005).

4.2.4. *Heliconia Sp*

La familia Heliconiaceae pertenece a las plantas monocotiledóneas y está situada en la base del orden Zingiber. El género *Heliconia* engloba alrededor de 220 especies, principalmente en América tropical, con seis presentes en Indonesia, Nueva Guinea y algunas islas del Pacífico Sur. En Colombia, se encuentran aproximadamente cien especies de *Heliconia*, de las cuales alrededor de la mitad son endémicas y en cierto grado amenazadas. La mayoría de estas especies se ubican en los Andes y el Océano Pacífico, abarcando altitudes desde el nivel del mar hasta los 2.400 metros. Además, la presencia de esta especie es más notable en zonas húmedas como el Valle del Atrato y la vertiente andina, especialmente en los valles del Magdalena occidental, oriental y central (Kress y Betancur, 2009).

En el contexto de la clasificación taxonómica, el género *Heliconia* pertenece a la familia Heliconiaceae en el orden Zingiberales. A nivel mundial, este género comprende entre 225 y 250 especies, de las cuales 97 se distribuyen en Colombia, y de estas, 48 se han identificado como endémicas, posicionando a esta región como la de mayor diversidad para el género a nivel global (Paredes, 2014).

4.2.5. *Gynerium Sagittatum (Caña Brava)*

Esta planta es una hierba gramínea erecta con tallos verticales que pueden alcanzar los 4 o 5 metros de altura. Sus hojas, en forma de abanico, pueden crecer hasta 2 metros de largo. Es una planta dioica con astas florales que pueden elevarla a más de 9 metros. Se destaca por su notable adaptabilidad ecológica, prosperando tanto en zonas áridas como inundables, lo que ha dado origen a múltiples variedades. Se desarrolla vigorosamente en medio de vegetación densa y ha sido cultivada en la América tropical durante siglos (Madera-Parra et al., 2014).

La caña flecha o caña brava pertenece a la familia de las Poaceae, que abarca una gran cantidad de especies, alrededor de 5.000, distribuidas en más de 700 géneros. Estas son plantas herbáceas, algunas perennes y otras anuales, con tallos huecos en los entrenudos y nodos muy marcados, y en ciertos casos, con tejido lignificado. En algunas regiones, estas plantas tienden a prevalecer, formando extensas franjas de vegetación que definen la apariencia de los territorios, como praderas, estepas o sabanas (Madera-Parra et al., 2014).

Además de su función como alimento para el ganado, las gramíneas (Poaceae) también desempeñan un papel esencial en la alimentación humana, proporcionando granos y cereales ampliamente consumidos, tales como arroz, maíz, trigo, cebada, caña de azúcar, sorgo, entre otros (Madera-Parra et al., 2014).

4.2.6. Humedales Naturales

Los humedales naturales pueden ser considerados como los ecosistemas más eficaces del mundo en términos de la eliminación de contaminantes. Su capacidad óptima de funcionamiento se debe a la interacción de diversos elementos bióticos y abióticos, que incluyen factores físicos, químicos y biológicos, como el suelo, el agua, la fauna, la flora y los nutrientes. Esta interacción permite al humedal cumplir con funciones específicas (Paredes, 2014).

4.2.7. Humedales Artificiales O Construidos

Según AriasI y Brix (2003), los humedales son zonas donde el agua juega un papel fundamental en el control del entorno y la vida vegetal y animal. Estos se presentan cuando el nivel del agua subterránea está cerca o sobre la superficie, o cuando el suelo está cubierto por aguas poco profundas. Estos humedales pueden ser tanto naturales como artificiales.

Los humedales desempeñan un papel crucial en el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo ventajas ambientales adicionales que mejoran la calidad del entorno. Estos ecosistemas crean y restauran hábitats ecológicos, embellecen los paisajes, actúan como amortiguadores frente a inundaciones y desbordamientos fluviales, suministran agua para el riego mediante la reutilización de aguas residuales, y generan beneficios en términos de actividades recreativas y oportunidades económicas (AriasI y Brix, 2003).

4.2.8. Componentes De Los Humedales Construidos.

- **Agua:** Este componente reviste una importancia fundamental, ya que constituye la fase donde los contaminantes se encuentran y donde se despliegan todas las funciones del humedal (AriasI y Brix, 2003).
- **Medio filtrante:** Compuesto por elementos del suelo como arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación, que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico (AriasI y Brix, 2003). En este medio, tienen lugar múltiples procesos, incluyendo la retención y sedimentación de partículas en

suspensión, la descomposición de materia orgánica, la transformación y absorción de nutrientes, así como la inactivación de microorganismos patógenos. La conductividad hidráulica, una propiedad esencial del medio granular, regula la cantidad de flujo de agua que puede atravesarlo (Paredes, 2014). El medio filtrante actúa como un receptor de sólidos y una superficie inerte a la que las bacterias pueden adherirse, proporcionando la base para el crecimiento de la vegetación. Al implantar una capa superior, la vegetación puede desarrollarse y sus raíces profundas penetran el medio filtrante. La vegetación transporta oxígeno al área de la raíz, lo que posibilita que las bacterias aeróbicas colonicen el entorno y descompongan la materia orgánica. Aunque su papel principal es mantener la permeabilidad de la membrana, también brinda un hábitat para los microorganismos. Comunidades microbianas densas absorben y descomponen nutrientes y materia orgánica. Al inducir periodos de escasez entre fases de suministro de nutrientes, se puede reducir el crecimiento excesivo de biomasa y aumentar la porosidad (Tilley et al., 2018).

- **Vegetación:** En los humedales, las plantas desempeñan un papel fundamental al proporcionar gran parte de la estructura, raíces y rizomas que fomentan procesos de sedimentación, capturando nutrientes como el carbono y nitrógeno para su incorporación en los tejidos. Además, permiten el intercambio de gases entre la atmósfera y el sustrato, creando ambientes ricos en oxígeno y brindando lugares para la formación de biofilm y la colonización bacteriana. La vegetación también mejora la permeabilidad del medio filtrante y contribuye significativamente al valor estético del humedal (Paredes, 2014).

4.3. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presentarán algunas definiciones que son de gran importancia para la comprensión de la investigación.

Afluente: se refiere al flujo de agua que llega a un sistema, instalación o cuerpo de agua en particular, como un río, un lago o una planta de tratamiento de aguas residuales. Los afluentes son fuentes de agua que ingresan a un sistema determinado y pueden contener una variedad de componentes, como aguas residuales, contaminantes, sedimentos y nutrientes (Guadarrama-Brito y Galván Fernández, 2015).

Carga contaminante: cantidad total de contaminantes, sustancias químicas o agentes contaminantes que son liberados o descargados en el medio ambiente, como el agua, el aire o el suelo, debido a diversas actividades humanas o procesos naturales. Es una medida que cuantifica la cantidad de contaminantes presentes en un flujo de efluentes o en una emisión, y es un indicador clave para evaluar el impacto ambiental de dichas actividades (Guadarrama-Brito y Galván Fernández, 2015).

Depuración: se refiere al proceso de eliminación, purificación o limpieza de elementos no deseados, contaminantes, impurezas o defectos de algo. Puede aplicarse en una variedad de contextos, como química, tecnología, medio ambiente y más (Delgadillo et al., 2010).

Efectividad de tratamiento: medida en que un proceso o sistema de tratamiento es capaz de lograr los objetivos previstos en la eliminación o reducción de contaminantes, sustancias no deseadas o problemas específicos. Se trata de evaluar cuán bien un tratamiento cumple con sus propósitos y metas establecidas en términos de mejorar la calidad de un recurso, como el agua, el aire o el suelo (Delgadillo et al., 2010).

Eficacia: La eficacia se relaciona con la realización exitosa de lo que se propone hacer, independientemente de los recursos utilizados o del tiempo empleado. Se concentra en la capacidad de generar los resultados deseados y cumplir con los estándares establecidos, sin necesariamente considerar si esos resultados se obtuvieron de la manera más eficiente posible (Delgadillo et al., 2010).

Efluente: flujo de agua o líquido que sale o es liberado de un sistema, instalación o proceso específico. Por lo general, se utiliza en el contexto de la gestión del agua y el tratamiento de aguas residuales para describir el agua que ha sido tratada, procesada o utilizada de alguna manera y luego se descarga o libera al medio ambiente (Rodríguez, 2013).

Estrés térmico: condición en la cual un organismo o sistema está expuesto a temperaturas extremas o condiciones ambientales que exceden su capacidad de regulación térmica normal, lo que puede llevar a efectos negativos en la salud y el funcionamiento del organismo (Delgadillo et al., 2010).

Microorganismos (Biopelícula): Una microcirculación de biomasa que permite que diferentes biomas se complementen nutricionalmente (Peña-Salamanca et al., 2013).

Planta de tratamiento: Son un conjunto de actividades y procesos individuales de origen fisicoquímico o biológico o una combinación de ellos, incluidos los fenómenos de transporte y manipulación de fluidos (DISIN S.A., s.f.).

4.4. MARCO CONTEXTUAL

La ciudad de Santa Marta, enclavada en la costa caribeña de Colombia, forma parte del departamento de Magdalena. Se sitúa a orillas del Mar Caribe y está rodeada por montañas de la Sierra Nevada de Santa Marta, siendo su ubicación en grados decimales 11.2408° N 74.199° O. El puerto de Santa Marta es uno de los lugares más importantes de Colombia para la exportación de productos como carbón y café. Este entorno diverso alberga un clima tropical con temperaturas cálidas y alta humedad, aunque ocasionalmente es desafiado por fenómenos climáticos extremos, como tormentas y huracanes, que ponen a prueba la resiliencia de la región (CORPOMAG, 2019).

En este contexto, la Colina de Calabazo, en las afueras de Santa Marta, alberga una comunidad enraizada en tradiciones locales y en la vida rural. No obstante, se enfrenta a desafíos significativos debido al acceso limitado a servicios esenciales, infraestructura y oportunidades de desarrollo sostenible. A pesar de estas limitaciones, la comunidad de la colina de Calabazo ha mantenido un estrecho vínculo con su entorno natural, dependiendo en gran medida de la agricultura y la pesca para su sustento. Por su parte, La vereda Calabazo se encuentra ubicada en el pueblo Colinas de Calabazo en el departamento del Magdalena. Está situada al noroeste de la vereda La estrella, y al este de México, teniendo una distancia de aproximadamente 29,61 km y sus coordenadas son: Latitud Norte 11,2825° o 11°17'8" y Longitud oeste de -74,0036° o 74°0'13" (CORPOMAG, 2019).

Por su parte, el predio Makuma, ubicado en la colina de Calabazo y también dentro de la jurisdicción del departamento de Magdalena, se erige como un microcosmos de interacciones entre la población local y su entorno.

4.4.1. Localización De La Vereda Calabazo

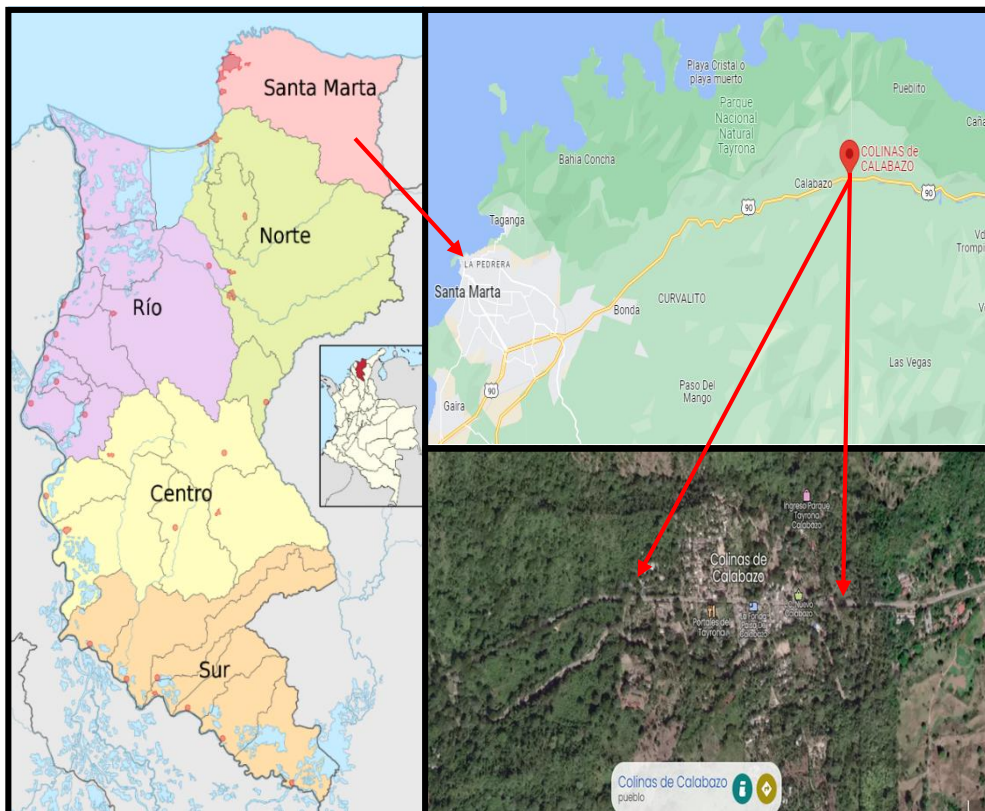
Sin embargo, dentro del área metropolitana de Santa Marta, que abarca una región más amplia alrededor de la ciudad, hay otros municipios cercanos que son adyacentes o próximos a Santa Marta como la vereda Calabazo que se encuentra ubicada en el pueblo Colinas de Calabazo en el departamento del Magdalena. Está situada al noroeste de la vereda. La estrella,

y al este de México, municipios de Santa Marta. Tiene una distancia de aproximadamente 29,61 km cerca de Santa Marta- Magdalena (CORPOMAG, 2019).

En la Figura 1 se plasma la ubicación del área de estudio.

Figura 1.

Georreferenciación de Colinas de Calabazo, Magdalena.



Nota. Tomado y adaptado por Autores, 2023, de Google Maps.

4.5. MARCO LEGAL

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se enmarca la normativa legal vigente aplicada en la Tabla 1.

Tabla 1.
Marco legal del proyecto

Norma	Descripción	Aplicabilidad al proyecto
Constitución Política de la República de Colombia de 1991	Art. 79: Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar.	Con este artículo se conoce la importancia de la aplicación del proyecto de investigación. Mediante la recuperación de la calidad del agua de procedencia doméstica se contribuirá a tener un mayor ambiente sano.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.	A partir de esta norma se identifica a la entidad encargada de llevar los procesos ambientales. Así como como el ordenamiento territorial
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Con este decreto se determinarán los manejos de los recursos naturales, así como se conocerá que recursos ambientales son los que se pueden utilizar.

Norma	Descripción	Aplicabilidad al proyecto
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como 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 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.	Con este decreto se establecen los criterios de calidad del agua. también se establecen los diversos parámetros para el tratamiento de aguas.
Decreto 1575 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.	Esta norma es relevante para la investigación ya que se establece el sistema para la protección y control del agua para consumo humano; se determinan las características optimas; así como el proceso de control y vigilancia para poder garantizar que el agua sea adecuada para el consumo humano.
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.	En esta norma es importante para la investigación al establecer la disposición de las aguas, estableciendo los lugares donde se pueden realizar los vertimientos de ARD y en cuales no, con el objetivo de disminuir la carga antes del sistema de tratamiento. Además de la infraestructura mínima requerida.

Norma	Descripción	Aplicabilidad al proyecto
Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.	Esta normativa también es importante en la investigación porque se realizan cambios al decreto 3930 de 2010, respecto al vertimiento de las aguas residuales domésticas.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Este decreto es importante para la investigación ya que se compilan todas las normas de carácter reglamentario que rigen el sector ambiente.
Resolución 2115 22 junio 2007	Art. 2: Se establecen los valores máximos aceptables para las características físicas del agua.	Es importante para la investigación en el análisis de las muestras de aguas residuales domésticas, los valores máximos aceptables y los instrumentos de muestreo.
Resolución 0631 de 2015	Art. 2: se establece el concepto de ARD como aquellas que provienen de hogares, industriales, comerciales o de servicios. Art. 8: Se determinan los valores permisibles de los parámetros fisicoquímicos para el vertimiento de ARD.	Esta norma es relevante en la investigación porque se enfoca en reducir la contaminación por vertimiento en los cuerpos de agua. También se disponen los valores permisibles para el vertimiento de (ARD).
Resolución 0330 de 2017 (Ministerio de	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y	Esta resolución es de gran importancia para la investigación ya que se describen las características, parámetros y condiciones

Norma	Descripción	Aplicabilidad al proyecto
Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)	se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009	requeridas para la elaboración de humedales artificiales. De igual forma, se emplean las disposiciones, condiciones y parámetros para el diseño del sistema de pretratamiento del ARD, antes de pasar al humedal artificial.
Resolución 000132 de 2021	Por el cual se adopta el Manual de Normas Técnicas para sistemas de riegos y drenaje a nivel predial.	Mediante esta resolución se adoptan los parámetros necesarios que debe cumplir el agua tratada por el humedal artificial para uso el riego de especies vegetales.
Título J. Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural del - RAS	Se proponen alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural a base de características económicas, sociales, culturales, etc., para para la planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo	En esta norma se proponen alternativas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas para sectores rurales. Entre los sistemas de vertimiento propuestos se identifican a los humedales después de un tratamiento primario o pretratamiento.

Nota. Tomado y adaptado por Autores, 2023, de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE), Ministerio de Salud y Protección Social (MINSALUD) y del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MINVIVIENDA).

5. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se plasmarán los datos metodológicos usados en la investigación

5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

Conforme al acuerdo N. 003 del 08 de julio de 2021, este Anteproyecto se apoya en la línea de investigación de Sostenibilidad y Gestión Ambiental, referente al programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Facultad de Ingenierías y Tecnológicas perteneciente a la Universidad Popular del Cesar. La sublínea corresponde a gestión integral del recurso hídrico; y el área temática, de acuerdo con la sublínea de investigación, es procesos de tratamiento de agua potable y tratamiento de aguas residuales; así como procesos de tratamiento de aguas crudas, residual, industrial, agroindustrial, residual doméstica, residuales no domésticas (UNICESAR, 2021).

5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El Enfoque utilizado para la elaboración del proyecto es de naturaleza cuantitativa, dado que implica un proceso sistemático que sigue una serie de pasos. Estos pasos incluyen la formulación de una hipótesis a partir de la teoría, la realización de observaciones y la recopilación de datos, el análisis de los datos obtenidos y la obtención de resultados. Este enfoque de investigación es el más prevalente en la indagación científica (Hernández Sampieri et al., 2014). Con la investigación se pretende evaluar la eficacia de dos especies vegetales (*Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*) al momento de tratar las aguas residuales domésticas, estudiándose sus parámetros físico-químicos. Siendo en caso específico de generar una relación entre la calidad del agua residual domestica al someterse a un tratamiento alternativo (humedal de flujo subsuperficial) como se mencionó anteriormente.

5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación posee un alcance descriptivo puesto que tiene la finalidad de especificar características y propiedades de la población de estudio, en particular el agua residual doméstica proveniente del predio Makuma de la vereda calabaza en el Magdalena (Hernández Sampieri et al., 2014).

5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio está comprendida por el volumen de agua residual doméstica que procede del predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena y el agua tratada por los humedales artificiales a escala piloto, obtenida en el mes de mayo de año 2023.

5.5. MUESTRA POBLACIONAL

Para esta investigación se tendrá una muestra poblacional no probabilística y estará integrado por las muestras *in situ* obtenidas en el sistema de drenaje de las aguas residuales domésticas del predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena. Se tomó una muestra de agua para analizar los parámetros físico-químicos y en laboratorio en diferentes tiempos, una con el ARD sin haberle aplicado el tratamiento (efluente) y otra al ya haber pasado por el tratamiento del humedal (afluente). La toma de estas dos muestras es necesaria para el análisis físico del agua y otra para el químico dado que, para estos análisis, las condiciones de conservación no son las mismas. Las muestras estarán sujetas a condiciones a partir del clima que presente el área al momento de recolectarlas.

Se llevó a cabo un proceso meticuloso y cuidadoso en la obtención, transporte, análisis y tratamiento de una muestra de agua residual doméstica proveniente del predio Makuma en el Magdalena. Este proceso, con el objetivo de mitigar los impactos ambientales y promover la gestión responsable de los recursos hídricos, incluyó la utilización de una pimpina de plástico con capacidad de 20 L, previamente lavada para el almacenamiento y transporte de la muestra. Esta etapa inicial allanó el camino para un estudio exhaustivo en los laboratorios de la Universidad Popular del Cesar, en la ciudad de Valledupar.

La selección de una pimpina de plástico lavada para el almacenamiento y transporte de la muestra de agua residual doméstica no es una elección aleatoria, sino una decisión basada en consideraciones ambientales y de seguridad. El plástico utilizado fue sometido a un proceso de limpieza riguroso para minimizar la posibilidad de contaminación cruzada y asegurar la integridad de la muestra. Dicha pimpina demostró ser una opción confiable y resistente, garantizando que la muestra llegara en condiciones óptimas al laboratorio para su análisis (IDEAM, 2020).

5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación utilizado en la ejecución del proyecto es de carácter no experimental, ya que se lleva a cabo sin intervenir en las variables, sino más bien se observa el fenómeno en su entorno real con el objetivo de analizarlo.

5.7. ESTRATEGIA Y DESARROLLO METODOLÓGICO

Para darle cumplimiento al presente proyecto, se desarrollaron las siguientes etapas de acuerdo al orden de los objetivos y lo establecido por estos.

ETAPA 1: CARACTERIZAR LOS PARÁMETROS FÍSICOS (TURBIDEZ, PH, TEMPERATURA Y SST) Y QUÍMICOS (DBO₅ Y DQO) DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Actividad 1.1: Tomar Las Muestras De Agua Residual Doméstica

Descripción: Para realizar esta actividad se tomó la muestra de tipo simple de ARD del punto de vertimiento de la residencia ubicada en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena. De la zona de drenaje se tomaron 20 L del agua residual doméstica, con base en los siguientes pasos establecidos por el IDEAM (2020):

- Para el análisis físico se utilizó un recipiente de vidrio de 1 litro de capacidad para el muestreo, los cuales deben se deben limpiar con agua y detergentes para eliminar el polvo y posteriormente enjuagar con agua destilada
- Para el análisis de los parámetros químicos se utilizará un frasco de plástico de boca ancha, tapa protectora y cierre hermético para evitar escapes de agua.
- Se determinaron parámetros en el sitio de campo (*in situ*) como la temperatura y el pH, mediante el uso del termómetro para medir y el pH-metro. Se contó con tres repeticiones para cada parámetro y posteriormente se cuantificarán los datos en la Tabla 2.

Tabla 2.

Caracterización *in situ* del ARD del predio Makuma

REPETICIONES	PARÁMETROS	
	Temperatura (°C)	pH
1	Valor de medición 1	Valor de medición 1
2	Valor de medición 2	Valor de medición 2
3	Valor de medición 3	Valor de medición 3
PROMEDIO	Valor promedio	Valor promedio

Nota. Elaboración propia, 2023.

Posterior medición de los parámetros se prosiguió a:

- Rotular los envases y verificar que el rotulo de los mismos sea el correcto.
- Tomar la muestra del sitio escogido. Para el caso del análisis físico, primero se enjuagará dos o tres veces la botella o recipiente donde se va a recolectar la muestra con la misma agua que se va a analizar, se llenará el frasco hasta el tope, evitando dejar aire atrapado en si interior, la cantidad será de 10 litros. Para el análisis químico, a diferencia del anterior, aquí no se debe enjuagar el recipiente con la muestra a recolectar, la muestra de 10 L se recogió rápidamente llenando solo la mitad del recipiente de manera que quede espacio de aire.
- Poner las muestras en conservación. Para el análisis químico, si la muestra a examinar contiene cloro la muestra agregada se le debe agregar 0,1 ml de una solución de tiosulfato sódico al 2 % por cada 100 ml de la muestra colectada para neutralizar la acción del cloro.

Actividad 1.2: Trasladar La Muestra Al Laboratorio De La Universidad Popular Del Cesar Y Hacer Su Respectivo Análisis

Descripción: Las muestras de agua residual domestica recolectada se transportaron a los laboratorios de la Universidad Popular del Cesar. Primeramente, se enviaron las muestras en el mejor medio disponible y en el menor tiempo posible al laboratorio, considerando el tiempo estipulado en los cuadros de preservación de muestras y la viabilidad de los tiempos

que se requieren desde la toma hasta el análisis de cada una de las características fisicoquímicas a evaluar. Posteriormente, se realizaron los respectivos análisis de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua. Dicha información queda tabulada en la Tabla 3.

Tabla 3.

Caracterización *ex situ* de la muestra de ARD del predio Makuma

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Físicas	Turbidez	Método de Nefelometría	Análisis y reporte
	SST	Método Gravimétrico	Análisis y reporte
Químicas	DQO	Método colorimétrico de dicromato	Análisis y reporte
	DBO ₅	Método de dilución	Análisis y reporte

Nota. Tomado y adaptado por los Autores, 2023, a partir de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, de Rice, Bridgewater y American Public Health Association (Eds), 2012.

ETAPA 2: IMPLEMENTAR LOS TRES SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA PILOTO, UNO CON *Heliconia Sp*, OTRO CON *Gynerium Sagittatum* Y EL CONTROL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO CASCARILLA DE ARROZ COMO MEDIO FILTRANTE

Actividad 2.1: Diseño De Los Humedales De Flujo Subsuperficial

Descripción: Se realizaron las operaciones de los distintos parámetros necesarios para la construcción de los humedales de flujo subsuperficial. Por lo cual, se tuvieron en cuenta los criterios establecidos en las investigaciones y documentos de Camacho y Díaz (2016), Higuera Infante (2017) y la Resolución 0330 de 2017.

El área superficial de los humedales a escala piloto se obtuvo mediante la ecuación:

$$As = L * W \quad (1)$$

Donde,

As: Área superficial

L: Longitud

W: Ancho

Luego, se obtuvo el volumen total:

$$V_T = As * Hs \quad (2)$$

Donde,

V_T: Volumen total

Hs: Profundidad del sustrato

Posteriormente se consiguió el volumen útil del humedal:

$$V = V_T * n \quad (3)$$

Donde,

V: Volumen útil

n: porosidad del lecho

Por último, se calculó la cantidad de caudal que ingresará a cada uno de los humedales a escala piloto:

$$Q = \frac{V}{TH} \quad (4)$$

Donde,

Q: Caudal

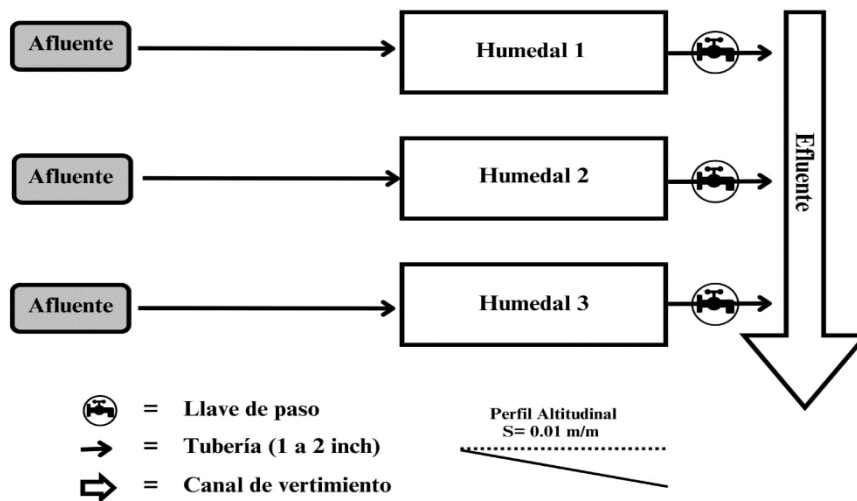
TH: Tiempo de retención hidráulico

Actividad 2.2: Construir Los Dos Humedales De Flujo Subsuperficial

Descripción: Se construyeron 3 humedales de flujo subsuperficial a escala piloto en fibra de vidrio el cual tendrá un dimensionamiento de 55 cm de largo, 24 cm de ancho y una profundidad total de 40 cm, también se consideró un borde libre de 12 cm y una profundidad del lecho (sustrato) de 28 cm. Luego se le agregó una capa de grava y de medio filtrante (cascarilla de arroz). Cada humedal contó con una llave salida para el efluente. En la Figura 2 se aprecia el esquema del sistema.

Figura 2.

Esquema del sistema implementado.



Nota. Realizado por los Autores, 2023.

El modelo 3D del diseño del humedal en su lado frontal se presentará a continuación:

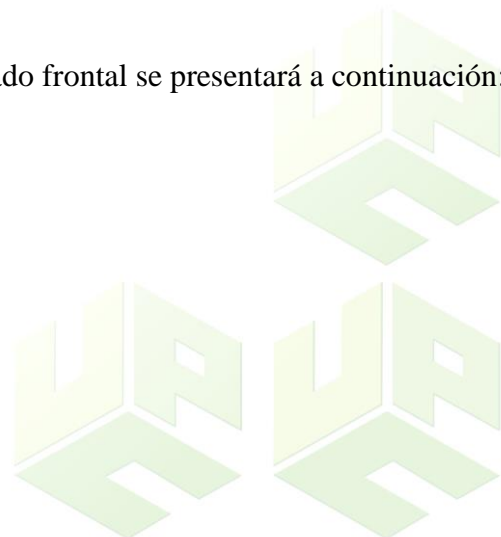
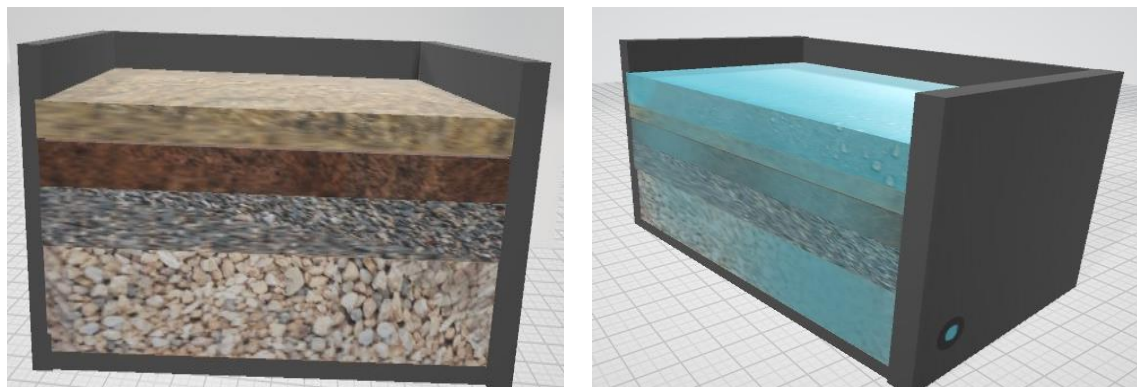


Figura 3.

Modelación 3D del diseño del humedal de flujo subsuperficial



Nota. Elaborado por los Autores, 2023.

Actividad 2.3: Obtener las especies fitorremediadoras.

Descripción: Para darle cumplimiento a esta actividad se obtuvieron las plantas *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*. Siendo las anteriores especies endémicas del Magdalena.

Actividad 2.4: Agregar El Medio Filtrante Y Las Plantas Al Humedal De Flujo Subsuperficial Para Su Posterior Utilización

Se agregó una última capa al humedal, compuesta de cascarilla de arroz como medio filtrante y grava. Finalmente se sembraron las especies en los humedales de flujo subsuperficial.

ETAPA 3: DETERMINAR LA EFICIENCIA LOS HUMEDALES CON FITORREMEDIACIÓN *Heliconia sp* vs. *Gynerium Sagittatum*

Actividad 3.1: Caracterizar La Calidad Del Agua Después Del Tratamiento

Descripción: Para llevar a cabo esta actividad, se evaluaron los mismos parámetros fisicoquímicos plasmados en las Tablas 2 y 3 pero del agua ya tratada por los humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto.

Actividad 3.2: Establecer La Calidad Del Agua De Los Dos Humedales Con Base De La Normativa Vigente Colombiana

Descripción: Se realizó una comparación entre los datos de los parámetros del agua obtenidos después del tratamiento de los humedales y el artículo 8 la Resolución 0631 de 2015,

“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Por medio de dicha resolución se va a determinar las condiciones de la calidad del agua para uso de riego y vertimiento en el predio Makuma, en la vereda Calabazo, Magdalena. La información de cada sobre del agua tratada obtenida cada humedal queda plasmada en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Comparación del humedal artificial con la normativa Resolución 0631 de 2015

Propiedades	Parámetros	Valores Obtenidos Post Tratamiento	Valor Permissible Según Resolución 0631	Cumplimiento (Sí/No)
Físicas	pH	Análisis y reporte	6 a 9 unidades de pH	Sí/No
	SST	Análisis y reporte	100 mg/L	Sí/No
Químicas	DQO	Análisis y reporte	200 mg/L O ₂	Sí/No

Nota. Realizado por los Autores, 2023, con base en la información dispuesta en la Resolución 0631 de 2015, Colombia.

Actividad 3.3: Seleccionar La Especie Vegetal Con Mayor Eficiencia En La Depuración De Los Contaminantes En Las Aguas Residuales Domésticas

Descripción: La especie con mayor porcentaje de depuración se obtuvo mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{concentración } Af - \text{concentración } Ef}{\text{concentración } Ef} * 100 \quad (5)$$

Donde,

Af: Afluente

Ef: Efluente

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS (TURBIDEZ, pH, TEMPERATURA Y SST) Y QUÍMICOS (DBO₅ Y DQO) DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en el marco del cumplimiento del primer objetivo de este proyecto de grado, el cual se enfoca en Caracterizar los parámetros físicos (Turbidez, pH, temperatura y SST) y químicos (DBO₅ y DQO) de las aguas residuales domésticas obtenidas del punto de muestreo del predio Makuma ubicado en la vereda calabazo magdalena, los resultados mostrados son producto de mediciones y ensayos realizados en los laboratorios de la Universidad Popular Del Cesar.

6.1.1. Toma De Las Muestras De Agua Residual Doméstica

Se han completado con éxito las actividades relacionadas con la toma de muestras de agua residual doméstica en el predio Makuma de la vereda Calabazo, Magdalena. Se seleccionó cuidadosamente el punto más adecuado para facilitar la toma de la muestra, garantizando una representatividad adecuada de la calidad del agua en el área de estudio, tal como lo plasman Rodríguez et al., (2010) en su investigación. Para esto, se utilizó un método de muestreo de tipo simple, donde la muestra fue recolectada para analizar las características físicas del agua y otra para evaluar sus características químicas.

Durante la investigación, se elaboró un plan que abarcaba tanto el mantenimiento como la operación de los sistemas, con el propósito de garantizar la eficacia en el desempeño de todas las unidades experimentales. Este plan fue implementado siguiendo las directrices establecidas por la Agencia de Protección Ambiental EPA (2000).

El proceso de muestreo se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos estandarizados para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados. Se tomó especial atención en evitar cualquier tipo de contaminación cruzada durante la recolección y manipulación de las muestras. De igual forma, se procedió a etiquetar adecuadamente las muestras para su posterior análisis en los laboratorios de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar.

Con la finalización de esta fase, se cuenta ahora con una base sólida de datos que permitió realizar un análisis detallado de la calidad del agua residual doméstica en el predio Makuma de la vereda Calabazo.

Consecutivamente a la obtención de la muestra de ARD obtenida en el punto de muestreo del predio Makuma se adquirieron los valores de pH y temperatura, los cuales quedan tabulados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Caracterización *in situ* del ARD del predio Makuma

REPETICIONES	PARÁMETROS	
	Temperatura (°C)	pH
1	24	8,44
2	25	8,02
3	22	7,64
PROMEDIO	23,6	8,04

Nota. Elaborado por los Autores, 2023.

a) pH:

Con base en la Tabla 5, los resultados arrojaron los siguientes valores de pH: 8,44 en la primera repetición, 8,02 en la segunda y 7,64 en la tercera. Se observa una disminución progresiva del pH en las repeticiones. Esta variabilidad en los valores de pH puede deberse a diferentes factores, como las condiciones ambientales cambiantes, la composición de las aguas residuales domésticas, la posible presencia de sustancias químicas o contaminantes que afecten el pH, entre otros (Cerón et al., 2005).

En ese orden de ideas, el pH promedio del agua residual doméstica se encontró en 8,04, lo que indica que es ligeramente alcalino y cercano a la neutralidad, siendo positivo desde el punto de vista de la calidad del agua. De la misma manera, el parámetro de pH del ARD se encuentra en el rango óptimo de vertimiento establecido por la normativa 0631 de 2015 (6 a 9 unidades de pH).

b) Temperatura:

Por su parte, la temperatura analizada *in situ* en el predio Makuma (ver Tabla 5) es un parámetro físico importante en la caracterización del agua, ya que influye en varios procesos biológicos y químicos que ocurren en el tratamiento y en el medio acuático en general (Chafloque y Gómez, 2006). En este caso, los resultados arrojaron los siguientes valores de temperatura: 24 °C en la primera repetición, 25 °C en la segunda y 22 °C en la tercera. Se observa que la temperatura varía entre las repeticiones, y aunque la diferencia entre los valores no es significativa, es importante considerar que incluso pequeñas variaciones en la temperatura pueden afectar la actividad de los microorganismos y procesos de degradación en el tratamiento de aguas residuales (Delgadillo et al., 2010).

En general, una temperatura de 24 a 25 °C es considerada dentro de un rango permisible para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas, ya que la mayoría de los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento son más activos y eficientes en este rango (García Serrano y Corzo Hernández, 2003).

No obstante, es fundamental llevar a cabo un análisis más completo considerando otros parámetros y el contexto específico de la región para evaluar si la temperatura es adecuada para el tratamiento en cuestión. Por tal motivo, es relevante tener en cuenta que la temperatura del agua residual puede variar a lo largo del año debido a cambios estacionales, lo que puede influir en la eficiencia de los sistemas de tratamiento durante diferentes épocas (Delgadillo et. al, 2010).

Por su parte, los humedales artificiales son sistemas naturales diseñados para la depuración de aguas residuales domésticas, y en ellos, las condiciones ambientales, incluida la temperatura, juegan un papel importante en la eficiencia del tratamiento. En general, la mayoría de los procesos biológicos y degradación de contaminantes que ocurren en los humedales artificiales se ven favorecidos por temperaturas cálidas, como las que se encuentran en el rango de 22 a 25 °C. Los valores de temperatura registrados en las repeticiones están dentro de este rango óptimo, lo que indica que el agua residual doméstica sería adecuada para ser tratada en humedales artificiales. Las temperaturas relativamente cálidas favorecerían la actividad de los microorganismos presentes en el humedal, dando como resultado una mayor eficiencia en la

degradación de materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua (Venegas Castillo y Aguilar Álvarez, 2020).

Así mismo, es relevante considerar que los humedales artificiales son sistemas altamente resilientes y pueden adaptarse a cambios estacionales en la temperatura. La variabilidad observada entre las repeticiones no representa una preocupación significativa, ya que se encuentran dentro del rango adecuado para el tratamiento.

6.1.2. Traslado La Muestra Al Laboratorio De La Universidad Popular Del Cesar Y Hacer Su Respectivo Análisis

En la Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de laboratorio de la muestra de agua residual doméstica del predio Makuma, en la cual se evaluaron diversos parámetros fisicoquímicos de importancia. Los análisis realizados incluyeron la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la Turbidez. Estos parámetros son fundamentales para caracterizar la calidad del ARD, ya que proporcionan información vital sobre su carga orgánica, contenido de materia suspendida, capacidad de neutralización y claridad visual. Los datos obtenidos a partir de estas pruebas se evidencia una comprensión integral de la composición y estado de esta muestra de agua residual doméstica, lo que a su vez sentará las bases para la implementación de estrategias de tratamiento adecuadas y la protección del medio ambiente.

Tabla 6.

Caracterización *ex situ* de la muestra de ARD del predio Makuma

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Físicas	Turbidez	Método de Nefelometría	70, 13 NTU
	SST	Método Gravimétrico	160,7 mg/L
Químicas	DQO	Método colorimétrico de dicromato	5520 mg/L O ₂

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
	DBO ₅	Método de dilución	100 mg/L O ₂

Nota. Elaborado por los Autores, 2023.

a. Turbidez:

Al analizar el agua residual doméstica del predio Makuma, se obtuvo un valor de turbidez de 70,13 NTU (ver Tabla 6). Esto indica la claridad del agua y la cantidad de partículas suspendidas en ella, por tal motivo se podría requerir un tratamiento adecuado antes de liberar el agua residual en el medio ambiente.

A razón de los altos niveles de turbidez se demuestra una mayor cantidad de partículas en suspensión, lo que puede afectar negativamente la calidad del agua y reducir la transparencia visual. Esta turbidez evidenciada puede deberse a diferentes factores, como la composición del agua residual, el tipo y cantidad de materiales sólidos presentes, y las condiciones ambientales en el momento de la toma de muestras (Fernández y García, 2014). La presencia de altos niveles de turbidez en el agua residual doméstica puede tener varias implicaciones:

- ✓ **Impacto ambiental:** La turbidez puede alterar la transparencia del agua, lo que reduce la penetración de la luz solar y puede impactar negativamente los ecosistemas acuáticos al dificultar la fotosíntesis y la vida acuática (Peña-Salamanca et al., 2013).
- ✓ **Tratamiento de aguas residuales:** La alta turbidez llega a dificultar algunos procesos de tratamiento de aguas residuales, como la sedimentación y la filtración, generando grandes consecuencias en la eficiencia del tratamiento y la calidad del efluente final (Peña-Salamanca et al., 2013).
- ✓ **Contaminación de las raíces:** Si el vertimiento con alta turbidez arrastra sedimentos y partículas suspendidas, estas pueden llegar a las raíces de las plantas y obstruir su capacidad para absorber nutrientes y agua. Esto puede afectar negativamente la salud de las plantas y su desarrollo (Peña-Salamanca et al., 2013).

- ✓ **Alteración del suelo:** Un vertimiento con alta turbidez puede depositar sedimentos en el suelo agrícola, lo que puede afectar su estructura y composición. Lo anterior trae consecuencias en la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo, lo que a su vez llega a afectar la salud y productividad de las plantas (Peña-Salamanca et al., 2013).

También, la turbidez puede dificultar la remoción de los nutrientes del agua, como el fósforo y el nitrógeno. Estos nutrientes pueden causar eutrofización, que es un proceso de crecimiento excesivo de plantas acuáticas. La eutrofización puede provocar la muerte de los peces y otros animales acuáticos, y puede hacer que el agua sea insegura para el consumo humano (Peña-Salamanca et al., 2013).

b. Sólidos Suspendedos Totales (SST):

El valor de 160,7 mg/L, dispuesto en la Tabla 6, indica que la muestra de agua contiene una concentración relativamente alta de sólidos suspendidos en comparación con lo que se consideraría normal o aceptable según las normas y regulaciones ambientales locales, regionales o nacionales. Los sólidos suspendidos pueden afectar la calidad del agua y tener efectos negativos en la vida acuática y el ecosistema en general.

Por tal motivo, un valor de 160,7 de mg/L de SST en un agua residual doméstica indica la presencia de una cantidad significativa de partículas sólidas en suspensión por litro de agua. Estos sólidos pueden ser tanto materia orgánica como inorgánica, tales como restos de alimentos, papel higiénico, cabello, arena, microorganismos, entre otros elementos presentes en el agua residual.

La alta concentración de SST en el agua residual doméstica puede tener varias implicaciones preocupantes. En primer lugar, sugiere una posible contaminación del agua, ya que los sólidos suspendidos pueden contener materiales orgánicos y microorganismos que afectan negativamente la calidad del agua y pueden representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Bohórquez Bedoya, 2015).

Cuando este tipo de agua residual se vierte en cuerpos de agua naturales, como ríos o lagos, los sólidos suspendidos pueden provocar una serie de problemas ambientales. Por un lado, pueden reducir la penetración de la luz solar en el agua, afectando la fotosíntesis de las

plantas acuáticas y disminuyendo la producción de oxígeno disuelto en el agua. Esto, a su vez, puede afectar la vida acuática y provocar desequilibrios en el ecosistema acuático (Bohórquez Bedoya, 2015).

La presencia de sólidos suspendidos también puede aumentar la turbidez del agua, haciendo que el agua sea menos clara y más opaca. Generando afectaciones en la apariencia visual del espejo de agua y dificultar su uso para fines recreativos y estéticos.

Además, los sólidos suspendidos totales en el agua residual pueden ser indicativos de la presencia de otros contaminantes asociados, como nutrientes (nitrógeno y fósforo) y contaminantes químicos. Estos contaminantes pueden tener efectos negativos adicionales en la calidad del agua y el medio ambiente.

Un humedal artificial puede ser un sistema eficaz para reducir los Sólidos Suspendidos Totales (SST) presentes en el agua residual, incluyendo aquellos obtenidos en la muestra inicial de 160,7 mg/L. Los humedales artificiales son sistemas naturales diseñados para la depuración de aguas residuales y aprovechan diversos procesos biológicos, físicos y químicos para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua (Bohórquez Bedoya, 2015).

Los humedales artificiales albergan una diversidad de plantas acuáticas y microorganismos que juegan un papel importante en la filtración y retención de partículas. Las raíces de las plantas y los biofilms presentes en el humedal actúan como medios de filtración, atrapando y adsorbiendo los SST presentes en el agua (Vargas et al., 2020).

Los microorganismos presentes en el humedal descomponen la materia orgánica, incluyendo partículas de SST, a través de procesos de degradación biológica. Estos microorganismos se alimentan de los sólidos suspendidos totales, reduciendo su concentración en el agua tratada. Los humedales artificiales permiten un mayor tiempo de residencia del agua, lo que favorece la autodepuración y permite que los procesos naturales reduzcan la concentración de SST (Vargas et al., 2020).

c. Demanda química de oxígeno (DQO):

En este caso, se obtuvo un valor de DQO de 5520 mg/L O₂ en la muestra de agua residual doméstica tomada en un predio ubicado en el Magdalena (ver Tabla 6). El hecho de

que el valor de DQO obtenido no cumpla con los límites establecidos en el artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015 (200 mg/L O₂) para el vertimiento del ARD indica que no está siendo tratada adecuadamente y puede tener un impacto negativo en el medio ambiente si es liberada sin tratamiento previo.

El elevado valor de DQO sugiere la presencia de una carga significativa de contaminantes orgánicos, como desechos orgánicos, detergentes, productos de limpieza y otros compuestos orgánicos presentes en el agua residual doméstica. Dichos contaminantes orgánicos son responsables del consumo de oxígeno en el agua, lo que podría agotar el oxígeno disuelto en cuerpos de agua receptores, afectando la vida acuática y generando problemas de eutrofización (Vargas et al., 2020).

De igual forma, la alta Demanda Química de Oxígeno en el ARD conlleva una serie de consecuencias ambientales de gran magnitud. Estas consecuencias son el resultado directo de la presencia significativa de materia orgánica y compuestos químicos oxidables, y plantean una seria amenaza tanto para los cuerpos de agua receptores como para la biodiversidad acuática (Vargas et al., 2020).

En primer lugar, la alta DQO provoca una disminución significativa en los niveles de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua receptores. La descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual requiere un elevado consumo de oxígeno, lo que resulta en una reducción del suministro de oxígeno disponible para los organismos acuáticos. Este fenómeno, conocido como "consumo bioquímico de oxígeno", ocasiona la asfixia y la muerte de la vida acuática, especialmente de peces, insectos acuáticos y otros invertebrados, que dependen de niveles adecuados de oxígeno para su respiración y supervivencia (Bohórquez Bedoya, 2015).

Adicionalmente, la alta DQO fomenta la proliferación de floraciones de algas y plantas acuáticas en los cuerpos de agua receptores, un fenómeno conocido como eutrofización. La gran cantidad de nutrientes y materia orgánica presentes en el agua residual actúa como un fertilizante para estas especies acuáticas, lo que provoca un crecimiento descontrolado de algas y plantas. Estas floraciones de algas, al morir y descomponerse, generan un mayor consumo de oxígeno, intensificando el problema de la escasez de oxígeno disuelto en el agua y afectando negativamente la biodiversidad (Bohórquez Bedoya, 2015).

Otro aspecto importante es la alteración de la calidad del agua debido a la presencia de alta DQO en el agua residual. La descomposición de la materia orgánica puede generar compuestos químicos secundarios y productos de degradación, algunos de los cuales pueden ser tóxicos para la vida acuática. Estos contaminantes químicos pueden acumularse en la cadena alimentaria y afectar a los organismos que dependen del agua como fuente de alimento, lo que puede llevar a una cascada de impactos en el ecosistema acuático (Bohórquez Bedoya, 2015).

La alta contaminación de DQO también tiene un impacto negativo en la biodiversidad acuática. La muerte de organismos acuáticos y la disminución de los niveles de oxígeno y la calidad del agua pueden ocasionar una pérdida de especies y a la disminución de la diversidad biológica en los cuerpos de agua receptores. La reducción de la biodiversidad impacta la estabilidad y resiliencia del ecosistema, dejándolo más vulnerable a futuros cambios ambientales y perturbaciones (Bohórquez Bedoya, 2015).

d. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅):

El análisis de la Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅) en el agua residual doméstica del predio ubicado en el Magdalena, con un valor de 100 mg/L O₂, revela la presencia de una cantidad considerable de materia orgánica biodegradable en el agua. Esta materia orgánica puede ser originada por desechos de alimentos, productos de limpieza, detergentes y otros compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales domésticas. Esta materia orgánica puede degradarse a través de procesos biológicos, lo que resulta en un consumo significativo de oxígeno disuelto en el agua.

En segundo lugar, el aumento de la DBO₅ y la disminución del oxígeno pueden cambiar la composición de la comunidad de organismos acuáticos en el río. Especies sensibles pueden desaparecer, mientras que otras más tolerantes a las condiciones degradadas pueden proliferar, alterando la biodiversidad del ecosistema. La contaminación del río puede afectar la disponibilidad y calidad del agua para uso agrícola, industrial y doméstico, lo que puede limitar el acceso a recursos hídricos seguros y limpios (Fernández y García, 2014).

Asimismo, la alta DBO₅ en el agua residual plantea preocupaciones relacionadas con el vertimiento en cuerpos de agua receptores sin tratamiento previo. La descomposición de la

materia orgánica biodegradable agotará el oxígeno disuelto en el agua, lo que afectará negativamente la vida acuática y generará problemas de falta de oxígeno, conocidos como zonas muertas, que amenazan la supervivencia de los organismos acuáticos.

Por otra parte, un alto nivel de DBO_5 del ARD representa un riesgo para la agricultura, especialmente en cultivos como aguacate y plátanos. La presencia de una carga significativa de materia orgánica biodegradable en el agua puede afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentar el riesgo de enfermedades y plagas, y potencialmente contaminar los productos agrícolas. Por lo tanto, es crucial implementar un tratamiento adecuado del agua residual antes de su uso en la agricultura para garantizar la seguridad y productividad de los cultivos (Zamora et al., 2008).

En este contexto, el cumplimiento con las normativas ambientales para el vertimiento de aguas residuales domésticas se convierte en una obligación ineludible. Las regulaciones y límites establecidos por las autoridades ambientales tienen como objetivo proteger el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos. La alta DBO_5 puede representar un incumplimiento con estas regulaciones, lo que a su vez podría llevar a consecuencias legales, multas y sanciones.

La eficiencia del tratamiento de aguas residuales se convierte en un tema clave al observar una DBO_5 elevada. Cuanto mayor sea la DBO_5 , mayor será la carga de materia orgánica que debe eliminarse durante el tratamiento para cumplir con los estándares ambientales. Esto resalta la necesidad de implementar un tratamiento adecuado para reducir la DBO_5 antes de verter o reutilizar el agua residual.

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente analizados, en el contexto del predio ubicado en el Magdalena, la caracterización del agua residual doméstica arrojó resultados significativos. Entre ellos, se encontró una Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) de 100 mg/L, una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 5520 mg/L, una turbidez promedio de 70.1 NTU y una concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) de 160.7 mg/L.

Estos resultados señalan una alta carga de materia orgánica y otros contaminantes presentes en las aguas residuales, lo que podría tener consecuencias negativas para el ecosistema acuático y la salud pública. La elevada DBO_5 de 100 mg/L indica que el agua

residual contiene una cantidad significativa de materia orgánica biodegradable, que podría agotar el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua receptores, afectando la vida acuática y aumentando el riesgo de eutrofización. Por otro lado, la DQO de 5520 mg/L sugiere una alta concentración de materia orgánica y compuestos químicos presentes en el agua, lo que puede dificultar el proceso de tratamiento y requerir medidas adicionales para eliminar estos contaminantes antes de la descarga al medio ambiente.

En el caso de la turbidez, su promedio de 70,1 NTU es otro indicador preocupante, ya que sugiere la presencia de sólidos suspendidos en el agua, lo que puede disminuir la penetración de la luz solar y afectar negativamente la vida acuática al reducir la disponibilidad de luz y nutrientes.

Por su parte, una concentración de SST de 160,7 mg/L puede tener implicaciones en el tratamiento de las aguas residuales y en su posible vertimiento en cuerpos de agua receptores. Un alto nivel de SST puede afectar la claridad del agua y reducir la penetración de la luz solar en los cuerpos de agua, lo que afecta negativamente la fotosíntesis de las plantas y la vida acuáticas en general. Además, los SST pueden contener materia orgánica biodegradable, lo que puede contribuir a la demanda de oxígeno en el agua y afectar el equilibrio ecológico en el ecosistema acuático. Una elevada concentración de SST también puede disminuir la calidad del agua para diversos usos, como abastecimiento de agua potable y recreación, y afectar la salud humana y la biodiversidad acuática.

6.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS TRES SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA PILOTO, UNO CON *Heliconia sp*, OTRO CON *Gynerium Sagittatum* Y EL CONTROL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO CASCARILLA DE ARROZ COMO MEDIO FILTRANTE

6.2.1. Diseño De Los Humedales De Flujo Subsuperficial

En primer lugar, antes de llevar a cabo la construcción de los humedales artificiales se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica. Se consultaron diversas fuentes académicas, estudios de investigación y publicaciones especializadas en el campo de la ingeniería ambiental y la fitorremediación. Estas referencias proporcionaron información

valiosa sobre las mejores prácticas, metodologías de diseño y técnicas de mantenimiento para asegurar la eficacia y sostenibilidad de los humedales artificiales.

Igualmente, se recurrió a experiencias exitosas previas de construcción de humedales artificiales a nivel piloto en otras regiones con condiciones ambientales similares. Estos casos de estudio proporcionaron información práctica sobre los resultados obtenidos, los desafíos enfrentados y las lecciones aprendidas, lo que permitió tomar decisiones informadas y adaptar el diseño de los humedales artificiales a las necesidades específicas de la región del Magdalena. Entre dichas investigaciones se resaltan los trabajos de Camacho y Díaz (2016), Higuera Infante (2017) y la Resolución 0330 de 2017.

A continuación, se presentan los parámetros de diseño de los humedales horizontales de flujo subsuperficial a escala laboratorio, los cuales quedan plasmados en la Tabla 7.

Tabla 7.

Parámetros de diseño del humedal

Parámetros de Diseño de los humedales				
Largo	Ancho	Profundidad	Borde Libre	Profundidad del
(L)	(W)	total (H_T)	(BL)	sustrato (H_s)
0,55 m	0,24 m	0,40 m	0,12 m	0,28 m

Nota. Realizado por los Autores, 2023.

Se obtuvo el área superficial del humedal a construir siguiendo las ecuaciones 1 y 2.

$$A_s = 0,55 \text{ m} * 0,24 \text{ m} = 0,132 \text{ m}^2$$

$$V_T = 0,28 \text{ m} * 0,24 \text{ m} * 0,55 \text{ m} = 0,03696 \text{ m}^3$$

Para determinar la porosidad de los medios filtrantes utilizados, se llevó a cabo un análisis basado en fuentes de información secundaria. En primer lugar, la cascarilla de arroz es un material natural y renovable que presenta propiedades beneficiosas para el tratamiento de aguas residuales (Higuera Infante, 2017). Su porosidad del 54 % permite una adecuada retención de microorganismos benéficos y biodiversidad en el medio filtrante, lo que favorece los procesos de degradación y eliminación de contaminantes presentes en el agua residual.

Además, la cascarilla de arroz es rica en materia orgánica, lo que puede proporcionar una fuente de nutrientes para las plantas acuáticas y mejorar la calidad del agua tratada.

Por otro lado, la grava, con su porosidad del 26 %, complementa la estructura del medio filtrante. Su baja porosidad ayuda a crear una zona de flujo más rápido en el sistema, lo que mejora la oxigenación del agua y estimula la actividad de los microorganismos aerobios, esenciales en la degradación de materia orgánica. La grava también contribuye a la retención de partículas sólidas y facilita la sedimentación de materiales en suspensión, lo que ayuda a mejorar la claridad del agua tratada (Camacho y Díaz, 2016).

Además de sus características individuales, la combinación de cascarilla de arroz y grava ofrece una estructura porosa con una adecuada distribución de tamaño de partículas. Esta distribución optimiza la infiltración y permite una mejor distribución de flujo en el sistema, mejorando así la eficiencia del tratamiento y evitando posibles obstrucciones.

Otra ventaja de esta combinación de medios filtrantes es su disponibilidad y bajo costo. La cascarilla de arroz es un subproducto de la industria arrocera, mientras que la grava es ampliamente disponible en la mayoría de las regiones. La utilización de materiales locales y de bajo costo es esencial para la viabilidad económica de los humedales artificiales a escala piloto.

Teniendo la porosidad de los medios filtrantes se procedió a obtener el promedio:

$$n = \frac{0,54 + 0,26}{2} = 0,40 = 40 \%$$

Para la obtención del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) se llevaron a cabo aforos del caudal de salida del tanque de almacenamiento, tal como lo dispone Higuera Infante (2017) en su investigación y los resultados obtenidos muestran un caudal promedio de 1,63 ml/min combinado con otro aforo de 3,57 ml/min, lo que resultó en un TRH de 5 días.

Este resultado es de suma importancia, ya que indica que el tiempo promedio que el agua permanece dentro del sistema es de 5 días antes de ser descargada o tratada. Un TRH de 5 días es considerado adecuado para muchos procesos de tratamiento biológico, ya que proporciona el tiempo necesario para que los microorganismos presentes en el medio filtrante puedan degradar la materia orgánica y reducir los contaminantes presentes en el agua residual.

Dicho TRH coincide también con el establecido por el RAS 2017, para el funcionamiento de humedales artificiales.

Igualmente, el TRH de 5 días es beneficioso para la retención de sólidos en suspensión, ya que permite que las partículas más pesadas se sedimenten y se acumulen en el fondo del tanque de almacenamiento. Lo anterior contribuye a mejorar la claridad del agua tratada y evita la acumulación de materiales sólidos en el sistema.

Por otra parte, el TRH definido es favorable para fomentar la biodiversidad en el medio filtrante, ya que proporciona un ambiente propicio para el crecimiento de diversas especies de plantas acuáticas y microorganismos benéficos. Estos organismos trabajan en sinergia para llevar a cabo procesos de remoción de contaminantes, como la nitrificación y la desnitrificación, contribuyendo así a mejorar la calidad del agua tratada (Higuera Infante, 2017).

Es importante destacar que el TRH de 5 días obtenido a partir de los resultados de los aforos es consistente con los estándares y recomendaciones para el diseño de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales. Este resultado respalda la efectividad y viabilidad del sistema de tratamiento implementado, proporcionando una solución eficiente y sostenible para la depuración de aguas contaminadas.

Conforme a esto, se obtuvo:

$$V = 0,03696 \text{ m}^3 * 40 \% = 0,014784 \text{ m}^3$$

Entonces,

$$Q = \frac{0,014784 \text{ m}^3}{5 \text{ d}} = 2,96 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{d} \approx 2,96 \text{ L/d}$$

6.2.2. Construcción De Los Dos Humedales De Flujo Subsuperficial

Se realizaron los humedales artificiales con un ancho de 0,24 metros, un largo de 0,55 metros y una profundidad total de 0,40 metros. Estas dimensiones fueron seleccionadas cuidadosamente para maximizar la capacidad de retención de agua, fomentar la actividad biológica y mejorar la calidad del tratamiento.

La elección de estas dimensiones está respaldada por consideraciones técnicas. Un ancho de 0,24 metros y un largo de 0,55 metros proporcionan una superficie adecuada para la instalación de las macrófitos y microorganismos benéficos que participan en los procesos de depuración. Estas dimensiones permiten una distribución uniforme del flujo de agua en el humedal, garantizando una exposición óptima de los contaminantes presentes en el agua a los mecanismos de tratamiento.

Además, la profundidad total de 0,40 metros es adecuada para garantizar una adecuada oxigenación y mezcla del agua en el humedal, lo que favorece la actividad de los microorganismos aerobios y anaerobios involucrados en los procesos de degradación de la materia orgánica y otros contaminantes. Una profundidad mayor podría disminuir la penetración de la luz solar, afectando negativamente la fotosíntesis de las plantas acuáticas y la actividad biológica.

Por otro lado, la elección de realizar los humedales artificiales en vidrio de 4 mm de espesor es una opción técnica que permite la observación visual del funcionamiento interno del sistema. Esto es de gran utilidad para monitorear el desarrollo de los macrófitos, la colonización de los microorganismos y la acumulación de materiales en el medio filtrante. La transparencia del vidrio permite una evaluación constante del estado del humedal y facilita la identificación de posibles problemas operativos o de obstrucción (ver Figura 4).

Figura 4.

Humedales artificiales a escala piloto construidos en vidrio



Nota. Tomado por los Autores, 2023.

6.2.3. *Obtención De Las Especies Fitorremediadoras*

La obtención de las plantas para la construcción de los humedales artificiales, en particular, *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum*, es un paso crítico en el diseño y éxito del sistema de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, cabe destacar que ambas especies presentaron diferentes desafíos en su obtención y adaptación al nuevo entorno.

En el caso de *Gynerium Sagittatum*, que fue traída desde otro departamento con condiciones ambientales distintas, se enfrentó a un cambio brusco en el ambiente y el clima, especialmente en lo que respecta al estrés térmico (ver Figura 5). La *Gynerium Sagittatum* es una planta acuática resistente y de rápido crecimiento, pero su adaptación a nuevas temperaturas y condiciones puede ser un proceso delicado. Fue necesario someterla a un proceso de adaptación cuidadosamente planificado para mitigar los efectos del estrés térmico ocasionado por el traslado. Este proceso permitió que la planta se aclimatara gradualmente a las nuevas condiciones y pudiera desarrollar mecanismos de supervivencia adecuados para su posterior uso en los humedales artificiales.

Figura 5.

Obtención de la especie *Gynerium Sagittatum*



Nota. Tomada por los Autores, 2023.

En el caso de *Heliconia sp*, aunque fue traída desde el mismo departamento del Magdalena, también requirió un proceso de adaptación antes de su incorporación a los humedales artificiales, aun cuando es una planta originaria de la región, el cambio del entorno de su lugar de origen al de los humedales pudo afectar su crecimiento y desarrollo. Durante el proceso de adaptación, *Heliconia sp* necesitó tiempo para ajustarse a las nuevas condiciones ambientales y a los diferentes niveles de humedad y exposición solar.

Después de obtener las plantas *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* para el estudio, se les proporcionó un período de adaptación de una semana antes de su traslado al lugar de investigación. Sin embargo, durante este tiempo se observó que ambas plantas experimentaron marchitamiento a causa de un estrés térmico, como se aprecia en la Figura 6. La razón de este estrés fue la diferencia de temperaturas entre el Magdalena, donde clima del momento era lluvioso, y el Cesar, donde no se presentaban precipitaciones. Esta variación climática generó condiciones desfavorables para las plantas, subrayando la importancia de considerar cuidadosamente los factores ambientales en futuros proyectos y estudios que involucren especies sensibles al estrés térmico.

Figura 6.

Especies afectadas por estrés térmico



Nota. Tomada por los Autores, 2023.

En respuesta a las dificultades iniciales, se decidió realizar una nueva adaptación de las plantas *Heliconia sp* y *Gynerium Sagittatum* (ver Figura 7). En esta ocasión, se trasladaron nuevamente las plantas del Magdalena al Cesar, y se llevó a cabo un período de adaptación más extenso de dos semanas. Durante este tiempo, se aseguró que tanto en el Magdalena como en el Cesar no hubiera precipitaciones, proporcionando condiciones climáticas más estables para las plantas. Gracias a este enfoque, las especies vegetales lograron aclimatarse de manera más exitosa, permitiendo minimizar el estrés térmico y asegurar su viabilidad para el desarrollo del estudio.

Los resultados obtenidos en este nuevo contexto de adaptación resaltan la importancia de considerar adecuadamente el entorno y proporcionar las condiciones óptimas para el bienestar de las especies vegetales involucradas en proyectos de investigación. El tiempo invertido en la adaptación fue fundamental para garantizar que las plantas alcanzaran su máximo potencial en el tratamiento de las aguas residuales y contribuyeran eficazmente en la mejora de la calidad del agua.

Figura 7.

Adaptación de la especie *Heliconia sp*



Nota. Tomada por los Autores, 2023.

Ambas plantas presentan características complementarias que potencian su efectividad en el tratamiento de aguas residuales en los humedales artificiales. La combinación de la *Heliconia sp* y la *Gynerium Sagittatum* permite crear un sistema equilibrado y eficiente, que

aprovecha las propiedades únicas de cada especie para mejorar la calidad del agua tratada. La adaptación de estas plantas al nuevo entorno de los humedales artificiales fue fundamental para asegurar que se establecieran y desarrollaran adecuadamente, maximizando así su contribución en la depuración de aguas contaminadas y el beneficio del ecosistema acuático.

6.2.4. Agregado Del Medio Filtrante Y Las Plantas Al Humedal De Flujo Subsuperficial Para Su Posterior Utilización

En el primer humedal, se dispusieron varias capas de cascarilla de arroz y grava en un arreglo cuidadosamente planificado. Una capa de 5 cm de grava en la parte inferior proporciona una base sólida y estable, favoreciendo el drenaje adecuado y previniendo la obstrucción del medio filtrante. Sobre esta base, una capa de 5 cm de cascarilla de arroz ofrece una superficie porosa y altamente retentiva, propicia para el asentamiento y crecimiento de microorganismos benéficos que contribuyen a la degradación de contaminantes. Luego, una capa adicional de 5 cm de grava se añadió para mejorar la distribución del flujo de agua y asegurar una oxigenación adecuada. Finalmente, el resto del humedal se llenó con cascarilla de arroz, dejando un borde libre de 13 cm para evitar desbordamientos y facilitar el control y monitoreo del sistema (ver Figura 8).

Figura 8.

Adecuación de las capas de sustrato de los humedales



Nota. Tomada por los Autores, 2023.

En este contexto, tanto la grava como la cascarilla de arroz requirieron procesos de limpieza y tratamiento específicos para evitar potenciales problemas y asegurar un rendimiento efectivo en la depuración del agua.

La grava utilizada como una de las capas del medio filtrante en los humedales es un componente esencial para la distribución adecuada del flujo de agua y la oxigenación en el sistema. Sin embargo, la grava puede contener partículas y sedimentos que podrían aumentar la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) y otras impurezas presentes en el agua. Por esta razón, fue imperativo lavar minuciosamente la grava antes de su colocación en el humedal. Este proceso de lavado removió partículas no deseadas y sedimentación, evitando así su liberación posterior en el sistema y garantizando una depuración más eficiente del agua residual.

Por consiguiente, la cascarilla de arroz, también empleada como parte del medio filtrante, requería una preparación especial para evitar una descomposición excesiva durante su uso en los humedales. La cascarilla de arroz, rica en almidón, podría convertirse en una fuente de materia orgánica adicional que podría afectar negativamente la calidad del agua tratada. Para mitigar este potencial problema, se llevó a cabo un proceso de limpieza que incluyó el lavado y el posterior hervido de la cascarilla de arroz. El lavado eliminó residuos y partículas no deseadas, mientras que el hervido contribuyó a reducir la cantidad de almidón y otros compuestos orgánicos presentes en la cascarilla, evitando su excesiva descomposición en los humedales.

La preparación adecuada de los medios filtrantes fue clave para asegurar que los humedales operaran de manera efectiva y cumplieran con su objetivo de tratamiento de aguas residuales. Al evitar la liberación de impurezas y la descomposición excesiva de la cascarilla de arroz, se logró minimizar el riesgo de impactos negativos en la calidad del agua y se garantizó una adecuada depuración de los contaminantes presentes en el agua residual.

En el segundo humedal, se sembraron las plantas de *Heliconia sp.*, seleccionadas cuidadosamente por sus características específicas que las hacen aptas para el tratamiento de aguas residuales. La siembra se realizó con sus raíces lo más profundas posible en el medio filtrante, asegurando así un contacto óptimo entre las raíces y los contaminantes presentes en el agua residual. La *Heliconia sp.*, conocida por su alta tolerancia a la humedad y su capacidad

de absorber nutrientes, contribuirá activamente en la remoción de contaminantes y mejora de la calidad del agua.

En el tercer humedal, se sembraron las plantas de *Gynerium Sagittatum*, también conocida como cañabrava o cortadera, seleccionadas por su eficiente capacidad de purificación del agua y su habilidad para acumular nutrientes y contaminantes. La siembra se realizó de manera similar, asegurando que las raíces quedaran lo más profundas posible en el medio filtrante para potenciar la remoción de contaminantes y la retención de nutrientes.

El humedal que actúa como control, sin la siembra de plantas, permitirá comparar los resultados obtenidos en los otros humedales y evaluar la eficacia de las diferentes combinaciones de capas de cascarilla de arroz y grava con la presencia o ausencia de las plantas en el tratamiento de aguas residuales.

En la Figura 9 se observa el diseño final los tres humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Figura 9.

Implementación de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial



Nota. Tomada por los Autores, 2023.

6.3. DETERMINAR LA EFICIENCIA LOS HUMEDALES CON FITORREMEDIACIÓN *Heliconia sp* vs. *Gynerium Sagittatum*

6.3.1. Caracterización De La Calidad Del Agua Después Del Tratamiento

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los humedales construidos.

a) Humedal Artificial Con *Heliconia Sp* (Heliconia):

Los resultados obtenidos en la experimentación con el humedal de tratamiento que utiliza *Heliconia sp* como planta acumuladora han sido altamente alentadores y prometedores. Durante el proceso de monitoreo y análisis, se observó una significativa reducción en los niveles de contaminantes presentes en el agua residual doméstica. La especie *Heliconia sp* demostró su eficacia en la remoción de DQO, DBO₅, SST y la turbidez. Estos resultados indican que *Heliconia sp* ha sido una pieza clave en el éxito del sistema de tratamiento y en la mejora de la calidad del agua. La información detallada y los datos obtenidos durante la experimentación se presentarán a continuación en la Tabla 8, lo que proporcionará una visión clara y precisa de la eficacia y desempeño del humedal de tratamiento con *Heliconia sp* en la depuración de aguas residuales. Estos resultados refuerzan la viabilidad y utilidad de los humedales artificiales como una solución sostenible y efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas en la región del Magdalena.

Tabla 8.

Caracterización del agua post tratamiento del humedal con *Heliconia sp*

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Físicas	Temperatura	-	27 °C
	pH	Potenciometría	7,49
	Turbidez	Método de Nefelometría	13,15 NTU
	SST	Método Gravimétrico	5,33 mg/L

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Químicas	DQO	Método colorimétrico de dicromato	870 mg/L O ₂
	DBO ₅	Método de dilución	20 mg/L O ₂

Nota. Elaborado por los Autores, 2023.

Después de someter el agua al tratamiento con heliconia en el humedal, se observaron cambios notables en las características del agua residual en el post tratamiento. La temperatura aumentó ligeramente a 27°C, lo cual puede atribuirse al proceso de transpiración de las plantas y la absorción del calor solar por la vegetación. Aunque el cambio en la temperatura no es significativo, es importante considerar que el aumento podría deberse a la actividad biológica y el proceso de fitodepuración que ocurre en el humedal. Por consiguiente, el aumento en la temperatura puede deberse a la actividad metabólica de las plantas y microorganismos presentes en el humedal.

La presencia de *Heliconia Sp* en el humedal genera una mayor actividad biológica, ya que las plantas liberan oxígeno durante la fotosíntesis y los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el agua residual. Este proceso de descomposición y metabolismo biológico puede generar un ligero aumento en la temperatura del agua (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Además, la exposición solar directa y la retención de calor en el medio filtrante del humedal también pueden influir en el incremento de la temperatura. La presencia de las plantas y la cobertura vegetal en el humedal llegan generar sombra y, por ende, reducir la exposición directa al sol, lo que podría limitar el aumento de temperatura. Sin embargo, es importante considerar la posibilidad de que el diseño del humedal permita una mayor exposición solar, lo que podría resultar en un ligero aumento de la temperatura del agua.

Por su parte, el pH disminuyó a 7,49 en el post tratamiento, lo que puede atribuirse a la actividad biológica de los microorganismos asociados a las raíces de la heliconia. Estos microorganismos descomponedores utilizan la materia orgánica como fuente de alimento,

produciendo ácidos orgánicos durante el proceso de descomposición, lo que puede afectar ligeramente el pH del agua tratada (Málvarez, 1999).

Una posible explicación para esta disminución es la actividad biológica y la presencia de microorganismos en el humedal. Durante el proceso de tratamiento, las plantas de heliconia liberan oxígeno como producto de la fotosíntesis, y los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el agua residual. Estas reacciones biológicas pueden generar una ligera acidificación debido a la producción de dióxido de carbono (CO₂) como subproducto de la descomposición. La presencia de CO₂ puede disminuir el pH del agua, lo que explicaría la reducción observada. Dichos resultados coinciden con los reportados por Paredes (2014).

Otra posible causa de la disminución del pH podría ser la adsorción de iones hidrógeno (H⁺) por parte de los componentes del medio filtrante del humedal, como la cascarilla de arroz y la grava. Estos materiales pueden actuar como buffer y capturar iones hidrógeno, lo que también resultaría en una reducción del pH del agua residual tratada.

La turbidez disminuyó drásticamente a 13,15 NTU, lo cual indica una efectiva retención de partículas y sedimentos por parte del humedal con heliconia. Las raíces de las plantas y la porosidad del medio filtrante (grava y cascarilla de arroz) actúan como un filtro natural, atrapando las partículas en suspensión y permitiendo que el agua salga más clara del humedal. Las raíces y la estructura de las plantas proporcionan superficies que actúan como sitios de adhesión para las partículas en suspensión, lo que promueve la formación de agregados y facilita la sedimentación de las partículas más grandes. Igualmente, la acción de las raíces y la actividad de los microorganismos en el sistema contribuyen a la degradación y asimilación de la materia orgánica, lo que también puede contribuir a la reducción de la turbidez.

Otro componente clave que puede contribuir a la disminución de la turbidez es el medio filtrante del humedal, en este caso, la combinación de cascarilla de arroz y grava. Estos materiales actúan como un filtro natural que atrapa partículas y sedimentos, permitiendo que el agua pase a través del medio filtrante mientras retiene las partículas en suspensión. La alta porosidad y retención de la cascarilla de arroz, junto con la capacidad de la grava para facilitar el flujo del agua, contribuyen a la eliminación de la turbidez y la mejora de la calidad del agua.

Es esencial destacar que una disminución significativa en la turbidez indica una mejora en la claridad del agua y una reducción en las partículas en suspensión.

Los SST se redujeron significativamente a 5,33 mg/L en el post tratamiento, lo cual se atribuye a la eficacia del humedal en la remoción de sólidos suspendidos. Las plantas de heliconia y los microorganismos descomponedores contribuyen a la degradación y asimilación de la materia orgánica, lo que reduce la concentración de SST en el agua tratada. Otro mecanismo importante en la reducción de los SST es el medio filtrante del humedal, compuesto por una combinación de cascarilla de arroz y grava. Estos materiales actúan como un filtro natural que retiene las partículas en suspensión mientras permite que el agua atraviese el sistema. La alta porosidad de la cascarilla de arroz y la capacidad de la grava para facilitar el flujo del agua favorecen la remoción de los SST y la mejora de la calidad del agua.

La reducción significativa de los SST es altamente beneficiosa, ya que indica una mejora sustancial en la calidad del agua residual. Los SST pueden contener partículas y materia orgánica que afectan la transparencia del agua y disminuyen la penetración de la luz solar, lo que a su vez puede afectar negativamente la vida acuática. La disminución de los SST en el humedal con heliconia favorece la claridad del agua y crea un ambiente más propicio para la vida acuática y para los procesos biológicos esenciales en los ecosistemas acuáticos. Las raíces y la estructura de las plantas proporcionan superficies donde las partículas en suspensión pueden adherirse y ser atrapadas, favoreciendo la formación de agregados más grandes que eventualmente sedimentan en el fondo del humedal. Igualmente, la actividad biológica de los microorganismos asociados a las raíces de las plantas contribuye a la degradación y asimilación de la materia orgánica presente en los SST, lo que también contribuye a la disminución de su concentración.

En consonancia con los antecedentes de la investigación de Peña-Salamanca et al., (2013), los hallazgos respaldan y validan la eficacia del tratamiento. Los resultados obtenidos en el estudio se alinean estrechamente con los patrones observados previamente en su investigación, lo que sugiere una congruencia significativa en cuanto a la efectividad del tratamiento.

Por último, la DQO y la DBO₅ experimentaron una reducción considerable a 870 mg/L O₂ y 20 mg/L O₂, respectivamente. Estos cambios reflejan la efectividad del humedal con

heliconia en la remoción de materia orgánica y contaminantes presentes en el agua de residual doméstica. La actividad biológica y el proceso de fitodepuración que ocurren en el humedal contribuyen a la degradación de la materia orgánica, lo que se traduce en una disminución en la DQO y la DBO₅. De igual forma, los microorganismos asociados a las raíces de las plantas contribuyen significativamente en la degradación de la materia orgánica y en la disminución de la DQO. Estos microorganismos realizan procesos de descomposición y mineralización de compuestos orgánicos, transformándolos en sustancias más estables y menos contaminantes. Los beneficios de la reducción de la DQO son diversos y trascendentales para el ecosistema acuático y la salud humana. Una disminución de la DQO indica una reducción en la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, lo que a su vez implica una menor demanda de oxígeno para su degradación. Esto es especialmente beneficioso para los ecosistemas acuáticos, ya que una alta DQO puede agotar los niveles de oxígeno disuelto en el agua, afectando negativamente la vida acuática.

Por otra parte, la reducción de la DQO contribuye a la mejora de la calidad del agua, lo que tiene un impacto positivo en la salud pública y en el uso sostenible del recurso hídrico. Aguas residuales con menor DQO son menos contaminantes y pueden ser reutilizadas de manera segura para riego agrícola u otros usos no potables, lo que contribuye a la conservación de recursos hídricos y a la protección del medio ambiente. Inicialmente, la DBO₅ en el agua del Magdalena mostraba un valor de 100 mg/L O₂, el cual experimentó una significativa disminución hasta alcanzar 20 mg/L O₂ después del tratamiento en el humedal. La participación de las plantas de *Heliconia Sp* en el humedal es esencial para la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). El proceso de fitodepuración que se lleva a cabo en el humedal es factible gracias a la interacción entre las plantas y los microorganismos que se encuentran en sus raíces. Estos microorganismos descomponedores se alimentan de la materia orgánica presente en el agua, lo que conduce a la disminución de la DBO₅ y mejora la calidad del agua tratada. Durante la fotosíntesis, las plantas liberan oxígeno al ambiente acuático, creando condiciones aeróbicas favorables para los microorganismos descomponedores. Esta oxigenación del agua impulsa la actividad biológica y aumenta la eficiencia del humedal en la degradación de la materia orgánica.

Los beneficios de esta reducción de la DBO₅ son diversos y significativos. En primer lugar, una menor DBO₅ indica una disminución en la cantidad de materia orgánica presente en

el agua, lo que mejora la calidad del agua tratada y protege los ecosistemas acuáticos receptores. Además, una baja DBO₅ puede reducir la carga de contaminantes que ingresan a los cuerpos de agua receptores, evitando problemas de eutrofización y mejorando la salud del ecosistema acuático.

En relación con los parámetros de DQO y DBO₅, nuestros resultados convergen con los datos previos recopilados en la investigación de Peña-Salamanca et al., (2013). El estudio refleja una concordancia sustancial con los valores reportados en la Tabla 8, evidenciando así una similitud destacable en cuanto a la magnitud de la carga orgánica y química presente en las muestras analizadas. Esta coincidencia fortalece la base de conocimiento existente al corroborar la consistencia de los niveles de DQO y DBO₅ en el contexto de la depuración de ARD mediante el uso de humedales artificiales a escala piloto con heliconia.

b) Humedal artificial con *Gynerium Sagittatum* (caña flecha):

Los resultados del agua tratada con el humedal con *Gynerium Sagittatum* se pueden apreciar en la Tabla 9.

Tabla 9.

Caracterización del agua post tratamiento del humedal con *Gynerium Sagittatum*

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
	Temperatura	-	28 °C
Físicas	pH	Potenciometría	7,47
	Turbidez	Método de Nefelometría	15,05 NTU
	SST	Método Gravimétrico	28 mg/L
Químicas	DQO	Método colorimétrico de dicromato	317 mg/L O ₂

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
	DBO ₅	Método de dilución	25 mg/L O ₂

Nota. Realizado por los Autores, 2023.

El tratamiento de aguas residuales mediante un humedal artificial a escala piloto con *Gynerium Sagittatum* ha demostrado ser una opción prometedora para mejorar la calidad del agua y su impacto ambiental en la región del Magdalena. Los resultados del efluente obtenidos muestran cambios significativos en diversos parámetros, lo que indica la eficiencia de este sistema de fitodepuración.

En primer lugar, se observa una ligera elevación en la temperatura del agua después del tratamiento con caña flecha, pasando de 23,6°C a 28°C. Este incremento podría deberse al efecto termorregulador de las plantas, que durante el proceso de fitodepuración liberan calor y generan un ambiente más propicio para la actividad microbiana. Además, la mayor presencia de vegetación en el humedal puede contribuir a una mayor retención de calor en el agua.

En cuanto al pH, se aprecia una disminución de 8,04 a 7,47 en después de pasar por el tratamiento. Esta reducción puede ser atribuida al proceso de asimilación de CO₂ por parte de las plantas durante la fotosíntesis. Al capturar CO₂ del agua, las plantas pueden generar un ambiente ligeramente más ácido, lo que favorece la actividad de microorganismos descomponedores y mejora la descomposición de la materia orgánica.

En términos de turbidez, se observa una notable reducción de 70,13 a 15,05 NTU después del tratamiento con caña flecha. Esta disminución puede deberse a la acción conjunta de las raíces de las plantas y los microorganismos asociados, que actúan como agentes de retención y filtración de partículas en el agua. El crecimiento denso y estructurado de las raíces de caña flecha favorece la retención de sólidos en el sustrato del humedal, mejorando así la claridad del agua tratada.

Con relación a los SST, se presenta una disminución significativa de 160,7 mg/L a 28 mg/L en el post tratamiento. Esto indica una efectiva remoción de partículas en suspensión por parte del humedal. Las raíces de *Gynerium Sagittatum* tienen una alta capacidad de retención

de sólidos y su estructura contribuye a crear condiciones ideales para la sedimentación de partículas, lo que se traduce en una reducción notable del SST.

Al comparar los resultados con la dispuesto por Stewart (2005), se evidencia una convergencia notable en lo concerniente a los sólidos en suspendidos totales. La eficiente eliminación de partículas por parte del humedal está en sintonía con la Steward, el cual informó una depuración del 85 %. Es relevante destacar que esta disminución significativa en los SST se alinea con la capacidad de las raíces de *Gynerium Sagittatum* para retener sólidos y la contribución de su estructura en la sedimentación. Por lo tanto, se puede afirmar que los datos actuales respaldan y fortalecen la conclusión del anterior, reafirmando una alta efectividad en la reducción de sólidos en suspensión mediante el tratamiento con humedales caña flecha.

También, se aprecia una reducción considerable en la DBO₅ de 100 mg/L a 25 mg/L. Esta disminución resalta la eficiencia del humedal en la degradación de la materia orgánica biodegradable, la cual es un factor clave en la calidad del agua. Las raíces densas y estructuradas de *Gynerium Sagittatum* ofrecen un ambiente propicio para la actividad microbiana, permitiendo una mayor remoción de la DBO₅.

c) Humedal artificial control:

En cuanto al tratamiento efectuado con el humedal de control al agua residual se presentaron los resultados tabulados en Tabla 10.

Tabla 10.

Caracterización del agua post tratamiento del humedal control

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Físicas	Temperatura	-	30 °C
	pH	Potenciometría	7,11
	Turbidez	Método de Nefelometría	37,25 NTU

PROPIEDADES	PARÁMETROS	MÉTODOS	VALORES Y/O DATOS OBTENIDOS
Químicas	SST	Método Gravimétrico	42,33 mg/L
	DQO	Método colorimétrico de dicromato	1064 mg/L O ₂
	DBO ₅	Método de dilución	100 mg/L O ₂

Nota. Realizado por los Autores, 2023.

Los resultados obtenidos en el post tratamiento reflejan cambios significativos en las características del agua, evidenciando la capacidad de este sistema para mejorar la calidad del recurso hídrico y reducir la carga contaminante.

En cuanto a la temperatura, se observa un aumento de 23,6°C a 30°C en el post tratamiento. Este incremento puede atribuirse a la interacción de los microorganismos presentes en el humedal con la materia orgánica y los contaminantes presentes en el agua. Durante este proceso, se libera calor como resultado de la actividad biológica y la descomposición de la materia orgánica, lo que podría explicar el aumento en la temperatura.

El pH del agua también se vio afectado positivamente, disminuyendo de 8,04 a 7,11 en el post tratamiento. Esta reducción podría estar relacionada con la capacidad de la cascarilla presentes en el humedal y los microorganismos asociados a ellas para neutralizar la acidez del agua a medida que descomponen la materia orgánica. Un pH más cercano a la neutralidad es beneficioso para la vida acuática y contribuye a mantener un ambiente más equilibrado.

La turbidez del agua disminuyó de manera significativa, pasando de 70,13 NTU a 37,25 NTU en el post tratamiento. La cascarilla de arroz y la grava actúan como medios filtrantes que retienen las partículas en suspensión y los SST presentes en el agua, lo que conduce a una mayor claridad y transparencia del agua tratada.

En cuanto a los SST, se aprecia una disminución notable de 160,7 mg/L a 42,33 mg/L en el post tratamiento. Dicha eficiencia de remoción de SST se debe a la capacidad de los

medios filtrantes para atrapar y retener las partículas sólidas presentes en el agua, permitiendo así una reducción significativa de la concentración de SST.

Por último, la DQO mostró una disminución de 5520 mg/L O₂ a 1064 mg/L O₂ en el post tratamiento. La presencia de cascarilla de arroz y grava proporciona una superficie adecuada para la colonización y actividad de microorganismos que descomponen los compuestos orgánicos presentes en el agua, resultando en una reducción significativa de la DQO.

Tanto en el pre tratamiento como en el post tratamiento, la DBO₅ se mantuvo en 100 mg/L O₂, lo que indica que no hubo una reducción efectiva de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. La falta de remoción de la DBO₅ puede atribuirse a diversos factores. Es posible que el diseño del humedal o las condiciones operativas no hayan sido óptimas para favorecer la actividad de los microorganismos descomponedores responsables de la degradación de la materia orgánica. Además, la concentración de nutrientes y la disponibilidad de oxígeno en el agua pueden haber influido en la eficiencia del tratamiento.

La comparación de los resultados obtenidos en el post tratamiento de tres humedales artificiales a escala piloto, dos con una especie de planta diferente y otro solo con cascarilla de arroz y grava como medio filtrante, arroja datos interesantes sobre su efectividad en el tratamiento de aguas residuales. A través de un análisis general comparativo, podemos evaluar el desempeño de cada humedal y su impacto en la calidad del agua tratada y en el medio ambiente.

En el humedal con *Heliconia Sp*, se observó una disminución significativa en la turbidez del agua, pasando de 70,13 NTU en el pre tratamiento a 13,15 NTU en el post tratamiento. Además, hubo una reducción notable en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), de 100 mg/L O₂ a 20 mg/L O₂, lo que indica una efectiva remoción de la materia orgánica biodegradable. La DQO también se redujo, pasando de 5520 mg/L O₂ a 870 mg/L O₂, mostrando una mejora en la calidad del agua tratada. Sin embargo, no se logró una disminución significativa en los SST.

Por otro lado, en el humedal con *Gynerium Sagittatum*, se observaron resultados similares en cuanto a la disminución de la turbidez, DBO₅ y DQO. La turbidez disminuyó de

70,13 NTU a 15,05 NTU, la DBO₅ de 100 mg/L O₂ a 25 mg/L O₂, y la DQO de 5520 mg/L O₂ a 317 mg/L O₂. Sin embargo, en este caso, también se evidenció una reducción significativa en los SST, pasando de 160.7 mg/L a 28 mg/L.

En el humedal con solo cascarilla de arroz y grava como medio filtrante, se obtuvieron resultados más modestos en cuanto a la remoción de contaminantes. La turbidez se redujo de 70.13 NTU a 37.25 NTU, y la DBO₅ se mantuvo en 100 mg/L O₂ tanto en el pre como en el post tratamiento. La DQO se redujo de 5520 mg/L O₂ a 1064 mg/L O₂, pero los SST aumentaron ligeramente, de 160.7 mg/L a 42.33 mg/L.

En términos generales, los humedales con plantas de *Heliconia Sp* y *Gynerium Sagittatum* mostraron una mayor eficiencia en la remoción de turbidez, DBO₅ y DQO, lo que indica una mejor depuración de la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua residual. Además, el humedal con *Gynerium Sagittatum* también destacó por su capacidad para reducir los SST. Sin embargo, todos los humedales mostraron cierta capacidad de mejora en la remoción de contaminantes, lo que sugiere que, con ajustes y optimizaciones en el diseño y operación, podrían aumentar su eficiencia.

En cuanto a los beneficios para el medio ambiente, los humedales artificiales son una solución sostenible y amigable con la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales. La mejora en la calidad del agua tratada beneficia a los cuerpos de agua receptores, evitando problemas de eutrofización y protegiendo los ecosistemas acuáticos. Además, la remoción de contaminantes contribuye a la conservación y mejora de la biodiversidad acuática. Asimismo, al reducir la carga de contaminantes que ingresan a los cuerpos de agua, los humedales ayudan a preservar la calidad del agua para el consumo humano y otras actividades.

6.3.2. Establecimiento De La Calidad Del Agua De Los Dos Humedales Con Base De La Normativa Vigente Colombiana

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos en el tratamiento de aguas residuales mediante tres humedales artificiales a escala piloto: uno con *Heliconia Sp*, otro con *Gynerium Sagittatum* y un tercero con solo cascarilla de arroz y grava (control) con los criterios establecidos en el artículo 8° de la Resolución 0631 de 2015, la cual establece los estándares y lineamientos para el vertimiento de aguas residuales en cuerpos de agua en Colombia, se obtuvo:

Tabla 11.

 Comparación del humedal con *Heliconia Sp* con la Resolución 0631 de 2015

Propiedades	Parámetros	Valores Obtenidos Post Tratamiento	Valor Permisible Según Resolución 0631	Cumplimiento (Sí/No)
Físicas	pH	7,49 unidades de pH	6 a 9 unidades de pH	Sí
	SST	5,33 mg/L	100 mg/L	Sí
Químicas	DQO	810 mg/L O ₂	200 mg/L O ₂	No

Nota. Realizado por los Autores, 2023, con base en la información dispuesta en la Resolución 0631 de 2015, Colombia.

En cuanto al agua tratada en el humedal con *Gynerium Sagittatum* se obtuvo:

Tabla 12.

 Comparación del humedal con *Gynerium Sagittatum* con la Resolución 0631 de 2015

Propiedades	Parámetros	Valores Obtenidos Post Tratamiento	Valor Permisible Según Resolución 0631	Cumplimiento (Sí/No)
Físicas	pH	7,47 unidades de pH	6 a 9 unidades de pH	Sí
	SST	28 mg/L	100 mg/L	Sí
Químicas	DQO	317 mg/L O ₂	200 mg/L O ₂	No

Nota. Realizado por los Autores, 2023, con base en la información dispuesta en la Resolución 0631 de 2015, Colombia.

Respecto al agua que pasó por el proceso de tratamiento en el humedal control se lograron obtener los siguientes resultados:

Tabla 13.

Comparación del humedal control con la Resolución 0631 de 2015

Propiedades	Parámetros	Valores Obtenidos Post Tratamiento	Valor Permisible Según Resolución 0631	Cumplimiento (Sí/No)
Físicas	pH	7,11 unidades de pH	6 a 9 unidades de pH	Sí
	SST	42,33 mg/L	100 mg/L	Sí
Químicas	DQO	1064 mg/L O ₂	200 mg/L O ₂	No

Nota. Realizado por los Autores, 2023, con base en la información dispuesta en la Resolución 0631 de 2015, Colombia.

Al analizar la relación entre los resultados obtenidos en Sólidos Suspendedos Totales, pH y Demanda Química de Oxígeno del agua tratada en los humedales con caña flecha, heliconia y el grupo de control, en relación con los límites establecidos por la normativa colombiana, específicamente el artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015, se evidenció que en los tres tratamientos no se alcanzaron los niveles de DQO exigidos por la legislación.

Sin embargo, es importante destacar que la depuración de DQO fue notablemente significativa al compararla con el estado del agua previo al tratamiento. Esto indica que los humedales con caña flecha y heliconia, así como el grupo de control, tuvieron un efecto positivo en la reducción de la DQO.

No obstante, considerando la relevancia de cumplir plenamente con los parámetros establecidos por las normativas ambientales, es recomendable implementar medidas adicionales para incrementar la eficiencia de la depuración de DQO. En este contexto, se sugiere la adopción de una capa de filtro de carbón activado como un componente adicional en el proceso de tratamiento del agua residual doméstica.

El carbón activado es ampliamente conocido por su capacidad de adsorber y remover una amplia gama de contaminantes presentes en las aguas residuales, incluyendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos

Suspendidos Totales (SST), entre otros. Al introducir esta capa adicional en los humedales, se potencia la capacidad de remoción de estos contaminantes, lo que contribuye a la obtención de resultados más satisfactorios en los análisis post tratamiento.

Es importante destacar que, en muchos casos, los niveles de DQO, DBO y SST pueden estar muy cercanos a los límites permitidos por la normativa, y solo se requiere un pequeño ajuste para cumplir con los estándares. En este contexto, el carbón activado se presenta como una solución efectiva y eficiente para alcanzar esos niveles deseables, ya que su capacidad de adsorción asegura la eliminación de aquellos componentes que aún persisten en el agua después del tratamiento en el humedal.

Además de su poderosa acción remediadora, el uso de carbón activado puede reducir el riesgo de posibles incumplimientos de la normativa ambiental y, en consecuencia, evitar sanciones y problemas legales asociados. Asimismo, su implementación como medida adicional en el sistema de tratamiento confiere mayor confianza en la sostenibilidad y protección del medio ambiente, asegurando que el vertimiento de las aguas residuales tratadas no represente un impacto negativo en los cuerpos de agua receptores.

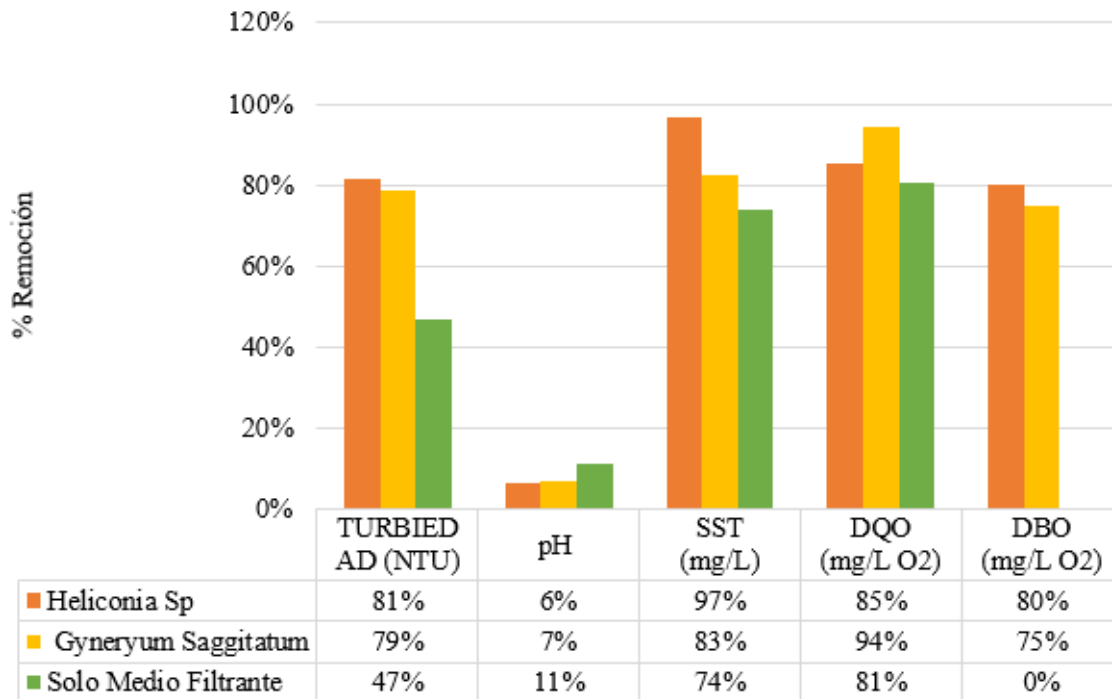
La integración de una capa de filtro de carbón activado en el sistema de tratamiento del humedal permitirá aprovechar su capacidad para adsorber compuestos orgánicos recalcitrantes y otros contaminantes que podrían no ser eliminados adecuadamente por los mecanismos de depuración existentes.

6.3.3. Selección La Especie Vegetal Con Mayor Eficiencia En La Depuración De Los Contaminantes En Las Aguas Residuales Domésticas

Para la selección de la especie vegetal con mayor eficiencia en la depuración de los contaminantes en las aguas residuales domésticas se tuvo como base el porcentaje de remoción de los parámetros de DBO₅, DQO, SST, pH y turbidez respecto al ARD antes del tratamiento. Dichos valores se aprecian en la Figura 10.

Figura 10.

Eficiencia de remoción de contaminantes por cada humedal



Nota. Realizado por los Autores, 2023.

En el análisis comparativo de los porcentajes de remoción de contaminantes en los tres humedales (*Heliconia SP*, *Gyneryum Sagittatum* y control), es importante considerar el uso previsto del agua tratada, que será utilizado para el riego de plantas, como plátanos, aguacates, naranjas, y otros cultivos. El objetivo principal en este contexto es asegurar que el agua tratada sea lo suficientemente limpia y libre de contaminantes para no comprometer la salud y productividad de los cultivos, así como proteger el suelo y el medio ambiente en general.

Analizando los resultados, se destaca que tanto el humedal de *Heliconia SP* como el de *Gyneryum Sagittatum* muestran una alta eficiencia en la remoción de varios contaminantes clave. Ambos tratamientos logran reducciones significativas en sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), lo que indica una capacidad efectiva para eliminar partículas suspendidas y reducir la carga orgánica presente en el agua residual. Estos resultados son alentadores, ya que indican que el agua tratada por estos humedales tendría menos riesgo de contener materiales orgánicos y sólidos que podrían afectar la calidad del suelo y la salud de los cultivos.

El tratamiento de *Gynerium Sagittatum* destaca como la opción más eficiente debido a sus altos porcentajes de remoción en la mayoría de los parámetros evaluados. En particular, su capacidad para eliminar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 94 % es notable, lo que indica una eficaz reducción de la carga orgánica y, por ende, una disminución significativa de la materia orgánica presente en el agua tratada. La DQO es un indicador crítico que refleja la cantidad de sustancias orgánicas que pueden agotar el oxígeno en el agua, lo que puede tener graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, la alta eficiencia en la remoción de DQO de *Gynerium Sagittatum* logra una reducción significativa de la carga orgánica, lo que resulta en un agua tratada más limpia y apta para el riego de plantas.

Comparando estos resultados con el antecedente de Stewart (2005), se puede apreciar una notable similitud en cuanto a la eficacia del tratamiento del humedal de flujo subsuperficial a escala piloto con *Gynerium Sagittatum*. En dicho estudio Stewart estableció una depuración del 97 % utilizando un humedal con la misma especie como agente de tratamiento. Los hallazgos respaldan y amplían esta observación, ya que el tratamiento con caña flecha exhibe una eficiencia sobresaliente en la eliminación de diversos parámetros evaluados. Particularmente, destaca la capacidad de *Gynerium Sagittatum* para reducir DQO en un 94 %, lo que indica una notoria disminución en la carga orgánica presente en el agua tratada. En consecuencia, al igual que en el estudio de Stewart, se confirma que el tratamiento con *Gynerium Sagittatum* conlleva a una reducción importante de la carga orgánica, logrando un agua tratada más pura y adecuada para el riego de plantas.

Asimismo, este tratamiento también muestra una buena capacidad para eliminar los Sólidos Suspendidos Totales (SST) en un 83 % y la turbidez en un 79 %. La reducción de SST y turbidez es crucial para mejorar la claridad y transparencia del agua, lo que favorece el hábitat acuático y reduce la carga de sólidos suspendidos en los cuerpos de agua receptores. La combinación de una alta eficiencia en la remoción de DQO, SST y turbidez posiciona a *Gynerium Sagittatum* como una opción integral para evitar la obstrucción de sistemas de riego y asegurar una distribución uniforme del agua en los cultivos.

En cuanto a la remoción de turbidez, ambos tratamientos tienen resultados similares, con *Gynerium Sagittatum* alcanzando un 79 % y *Heliconia SP* un 81 %. Ambos valores son

considerables, lo que indica una buena capacidad para reducir la turbidez y mantener el agua clara para el riego de los cultivos.

En contraste, el humedal solo con medio filtrante (control) presenta un rendimiento insuficiente en términos de remoción de DBO_5 , alcanzando un 0 % de remoción. La DBO_5 es otro indicador crítico que mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua. La falta de remoción de DBO_5 en este tratamiento indica que no se logra una adecuada degradación de los contaminantes orgánicos, lo que puede resultar en una carga de nutrientes excesiva y problemas de eutrofización en los cuerpos de agua receptores.



7. CONCLUSIONES

En vista de la creciente importancia del tratamiento de aguas residuales domésticas, queda claro que su gestión adecuada es esencial para garantizar la salud pública y la conservación del medio ambiente. Los humedales artificiales construidos con plantas endémicas han demostrado ser una solución altamente efectiva y óptima en comparación con los enfoques convencionales más costosos.

Los humedales artificiales con plantas endémicas se destacan por su capacidad de purificación natural. Los procesos biológicos y físicos que ocurren en estos sistemas emulan los procesos naturales en los humedales, lo que resulta en una eliminación efectiva de contaminantes. Además, su enfoque sostenible y de bajo impacto reduce significativamente la necesidad de energía y productos químicos, lo que disminuye los costos operativos y la huella ambiental.

La construcción y el mantenimiento de humedales artificiales son notablemente más económicos en comparación con los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Esta asequibilidad potencialmente brinda a las comunidades con recursos limitados la capacidad de implementar sistemas de tratamiento efectivos, lo que es fundamental para garantizar que incluso las áreas menos desarrolladas puedan abordar sus desafíos de saneamiento.

Los humedales artificiales no solo cumplen una función crucial en la purificación del agua, sino que también tienen un impacto positivo en la biodiversidad local y la mejora estética del entorno. Estos sistemas promueven la restauración de hábitats y ofrecen oportunidades para actividades recreativas y educativas. Así, la implementación de humedales artificiales no solo tiene beneficios ambientales directos, sino que también fortalece la conexión entre las comunidades y su entorno.

La elección de la planta adecuada es esencial para el rendimiento de cualquier humedal artificial, y la *Gynerium Sagittatum* ha demostrado ser especialmente apta para este propósito. Su presencia en los humedales no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también contribuye a la biodiversidad local y al equilibrio ecológico. Además, la adaptabilidad del humedal de *Gynerium Sagittatum* a diferentes condiciones climáticas y geográficas lo convierte

en una opción viable para diversas regiones. El humedal de *Gynerium Sagittatum*, también conocido como Caña Flecha, se ha destacado como una elección excepcional debido a sus cualidades únicas. Esta planta endémica ha demostrado una notable capacidad para absorber nutrientes y promover la actividad microbiana beneficiosa en el proceso de purificación del agua. Su sistema radicular denso y su resistencia a diversas condiciones ambientales contribuyen a la eficiencia general del humedal. A través de investigaciones y experiencias prácticas, se ha demostrado que el humedal de *Gynerium Sagittatum* es capaz de lograr una alta tasa de remoción de contaminantes, incluidos nutrientes y materia orgánica, lo que lo convierte en una opción altamente eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

La comparación de los resultados de laboratorio revela que el humedal construido con la planta endémica *Gynerium Sagittatum* ha demostrado consistentemente una mayor eficacia en la remoción de contaminantes en comparación con otros humedales. Los datos recopilados muestran una mayor reducción de nutrientes, materia orgánica y otros contaminantes en el agua tratada por el humedal de *Gynerium Sagittatum*. Esto sugiere que la estructura y el sistema radicular de la *Gynerium Sagittatum* proporcionan un entorno propicio para la actividad microbiana beneficiosa y la absorción de nutrientes, lo que resulta en una mayor calidad del agua tratada.

Al considerar los resultados y la efectividad de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, es crucial destacar la importancia de tener en cuenta las condiciones climáticas desde la ubicación de las plantas endémicas utilizadas hasta su implementación en el proceso de tratamiento. Además, se debe enfatizar la necesidad de minimizar el estrés térmico en estas plantas durante todo el proceso, ya que esto desempeña un papel crucial en su salud y eficacia. Además, es esencial minimizar el estrés térmico en estas plantas, ya que el estrés térmico puede debilitar su capacidad para realizar funciones vitales y, por lo tanto, reducir la eficacia del humedal en su conjunto. La exposición a temperaturas extremas puede comprometer la salud y la función de las plantas, lo que a su vez impacta negativamente en la calidad del agua tratada. Por lo tanto, el diseño y el mantenimiento de los humedales deben incorporar estrategias para reducir el estrés térmico, como la elección de especies resistentes al calor, la sombra adecuada y la gestión del riego.

En cuanto a su aporte a la comunidad y al mundo, los beneficios son igualmente notables. La implementación de humedales artificiales con enfoque climático no solo garantiza una fuente sostenible de agua limpia para la comunidad local, sino que también fomenta un sentido de responsabilidad y conexión con el entorno natural. Los humedales bien diseñados y mantenidos pueden servir como espacios educativos y recreativos para la comunidad, promoviendo la comprensión ambiental y la participación en la conservación.

A nivel mundial, estas investigaciones y prácticas avanzadas en ingeniería ambiental establecen un precedente importante para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Los humedales artificiales que consideran las condiciones climáticas se convierten en modelos ejemplares de cómo podemos integrar la tecnología con la naturaleza para abordar desafíos cruciales, como la contaminación del agua y el cambio climático. Estas soluciones contribuyen a la promoción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y establecen una base sólida para la protección de nuestro planeta y la mejora de la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.



8. RECOMENDACIONES

Antes de diseñar un humedal artificial, es esencial comprender las condiciones climáticas, geológicas y biológicas locales. Cada región tiene características únicas que influirán en la eficacia del sistema. Adaptar el diseño a la geografía y al clima local permitirá aprovechar al máximo los procesos naturales de purificación y asegurar un rendimiento óptimo.

La elección de plantas endémicas adecuadas es crucial para el éxito del humedal artificial. Estas plantas deben tener la capacidad de tolerar las condiciones locales, así como la habilidad de absorber nutrientes y promover la actividad microbiana beneficiosa. La investigación y la consulta con expertos en botánica local son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la vegetación a utilizar.

En el contexto del diseño y establecimiento de humedales artificiales, un aspecto fundamental que merece una atención exhaustiva es el transporte de especies vegetales entre distintas localidades. Dicho proceso, si bien es esencial para la colonización exitosa de los humedales, puede llevar a consecuencias negativas si no se consideran adecuadamente las condiciones climáticas locales. Para garantizar la salud y adaptación óptima de las especies vegetales durante el transporte a nivel local, se debe realizar un análisis riguroso de las condiciones climáticas tanto en el lugar de origen como en el destino. El factor climático de mayor relevancia en este contexto es la temperatura. Las variaciones extremas de temperatura pueden inducir estrés térmico en las plantas, debilitando su resistencia y predisponiéndolas a enfermedades o incluso a la muerte.

Es recomendable desarrollar un protocolo integral para el transporte de plantas, incorporando medidas para atenuar los riesgos derivados del estrés térmico. Esto podría incluir técnicas de aclimatación previa al transporte, como la exposición gradual a las condiciones climáticas del destino antes del traslado definitivo. Asimismo, es importante considerar la selección de especies resilientes al cambio climático y capaces de adaptarse a diferentes rangos de temperatura, lo que disminuirá la vulnerabilidad ante fluctuaciones inesperadas.

Se sugiere encarecidamente someter las plantas a un período de adaptación de al menos 15 días antes de su traslado, permitiendo que se aclimaten gradualmente a las nuevas condiciones. Posteriormente, es aconsejable proporcionarles un tiempo adicional de

aproximadamente una semana dentro del humedal mismo para permitir una adaptación completa y exitosa al entorno específico. Este proceso de doble etapa garantiza una transición suave y minimiza el estrés, maximizando las posibilidades de un establecimiento saludable y una contribución efectiva al funcionamiento del humedal artificial.

El monitoreo sistemático y constante emerge como una piedra angular ineludible en la gestión de humedales artificiales, permitiendo una evaluación exhaustiva y dinámica de su desempeño a lo largo del tiempo. Para lograr una purificación eficiente y sostenible, resulta imperativo llevar a cabo análisis de agua en intervalos periódicos. Estos análisis posibilitan la cuantificación precisa de la calidad del efluente, ofreciendo una perspicaz visión sobre la eficacia del sistema y generando información vital para ajustes y optimizaciones con base en resultados empíricos.

La elección de especies vegetales endémicas y fácilmente disponibles para la implementación de humedales artificiales se presenta como una decisión respaldada por razones tanto económicas como ecológicas. Optar por plantas nativas de la región conlleva ventajas financieras significativas, ya que estas especies tienden a tener un costo de adquisición inicial más bajo y demandan un mantenimiento menos oneroso en comparación con opciones exóticas. Asimismo, su adaptación natural a las condiciones climáticas y del suelo locales disminuye la necesidad de inversión en ajustes ambientales adicionales, lo que se traduce en ahorros sostenibles a largo plazo. Además de los beneficios económicos, la elección de plantas endémicas refuerza la sostenibilidad ambiental al mejorar la eficiencia de purificación del humedal. Estas especies están intrínsecamente vinculadas a los procesos ecológicos de la región, lo que contribuye a la resistencia a plagas y enfermedades, promueve la biodiversidad local y enriquece el valor cultural y estético del entorno, fortaleciendo así la solidez del proyecto y su arraigo en la comunidad.

La integración activa de la comunidad en todos los aspectos del humedal artificial, desde su planificación hasta su mantenimiento, se convierte en un pilar trascendental para fomentar un arraigado compromiso y una responsabilidad compartida. A través de programas educativos y experiencias de sensibilización, se puede cultivar un entendimiento profundo de la importancia ecológica y socioambiental de estos sistemas, al tiempo que se forja un lazo emocional que fortalece el apoyo comunitario. Esta conexión informada y emocional puede

sentar las bases para una adopción proactiva y a largo plazo del humedal artificial, enraizando su sostenibilidad en la esencia misma de la comunidad y, en última instancia, asegurando la continuación de sus beneficios y propósitos a lo largo del tiempo.

Agregar una capa de carbón activado al diseño del humedal puede ser una estrategia efectiva para mejorar la remoción de contaminantes y cumplir con las regulaciones colombianas de vertimiento. El carbón activado es conocido por su capacidad para adsorber una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos, incluyendo contaminantes presentes en aguas residuales. Su superficie porosa y alta capacidad de adsorción hacen que sea una opción valiosa para mejorar la calidad del agua tratada en el humedal.

También, la instalación de una llave de paso en el sistema de humedal es esencial para evitar problemas de fugas y facilitar el mantenimiento. Una llave de paso permite controlar el flujo de agua y realizar cierres temporales en caso de mantenimiento o reparaciones.

La creación de conciencia emerge como un pilar esencial en el engranaje de estrategias para el tratamiento de aguas residuales, y la promoción de los humedales artificiales como un componente clave en esta ecuación ejerce un rol transformador tanto en la población en general como en las autoridades locales. Campañas educativas, como una pieza maestra en este rompecabezas de sensibilización, representan un canal crucial para transmitir el conocimiento necesario y catalizar un cambio de paradigma.

la composición del agua residual doméstica es un factor determinante para su tratamiento efectivo. El agua residencial puede contener una variedad de sustancias, desde contaminantes químicos hasta microorganismos patógenos. Conocer esta composición es esencial para seleccionar los métodos de tratamiento adecuados y asegurarse de que el agua tratada cumple con los estándares ambientales y de salud pública. Ignorar este paso puede resultar en la liberación de contaminantes peligrosos en el medio ambiente, lo que afectaría negativamente la salud de las personas y la calidad del agua.

Además, la infiltración de fuentes externas en el sistema de alcantarillado puede llevar a una sobrecarga innecesaria en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto se debe a que el agua de infiltración no solo aumenta el volumen total de aguas residuales a tratar, sino

que también diluye la concentración de contaminantes, lo que dificulta el proceso de tratamiento y puede llevar a la liberación de contaminantes no tratados en cuerpos de agua.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuatecnica S.A.S. (2017a). LA SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA. *Acuatecnica*. <https://acuatecnica.com/la-situacion-del-tratamiento-aguas-residuales-colombia/>
- Acuatecnica S.A.S. (2017b). CÓMO ES EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. *Acuatecnica*. <https://acuatecnica.com/tratamiento-aguas-residuales-domesticas-2/>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA (s. f.). <https://www.usa.gov/es/agencias/agencia-de-proteccion-ambiental-de-estados-unidos>
- AriasI., C. A., y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (13), 17-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>
- Arriols, E. (06 de agosto de 2018). Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. *Ecología Verde*. <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Bohórquez Bedoya, E. (2015). *Efectos del medio filtrante y la frecuencia de alimentación en humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales* [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/items/931316c1-534e-40aa-9d04-e7cf1af8cb36>
- Camacho, H., y Diaz Loraine Margarita. (2016). *Evaluación De La Capacidad Depuradora De Dos Humedales Artificiales Con Medios Filtrantes De Carbón Activado Para El Efluente De La PTAR Salguero*. Valledupar Cesar: Universidad Popular Del Cesar.
- Cerón, Á. A. C., Vidal, A. P., y Lozada, P. T. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Scientia et technica*, 11(27), 243-248.

Corporación Autónoma Regional Del Magdalena. (2019). *Formulación POMCA, Río Piedras -Río Manzanares y otros directorios del caribe: fase de aprestamiento, documento general. Vol. 5. Análisis Situacional Inicial.*
<https://www.corpamag.gov.co/archivos/POMCAS/SZH%201501-00-05%20Analisis%20Situac%20inicial.pdf>

Crites, R., y Tchobanglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados T.1.* Colombia: McGraw-Hill.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L.F., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y uso del agua.* Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Agronomía. Cochabamba, Bolivia. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Fernández, J. D. Z., & García, D. A. F. (2014). Implementación de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para la fitorremediación de aguas mieles de café, en la finca La Clanera, vereda La Chorrera del municipio de Timbío, Cauca. *ConCiencia, 14(4).*

Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (s.f.). Las aguas residuales en Colombia, Tratamiento y sus diferentes ventajas. *Blog Fibras y Normas de Colombia.*
<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/las-aguas-residuales-colombia-tratamiento-diferentes-ventajas/>

García Serrano, J., y Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial.*
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Guadarrama-Brito, M. E., & Galván Fernández, A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 4(7), 1-23.*

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill.

Higuera Infante, S. K. (2017). Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC-Yopal, Casanare, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1). 107-118. <https://doi.org/10.22490/21456453.1842>

Kress, W. John, y Betancur, Julio. (2009). Una Especie Nueva De Heliconia (Heliconiaceae) Del Chocó Biogeográfico Colombiano. *Caldasia*, 31(1), 99-104. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-52322009000100008&lng=en&tlng=es.

Madera-Parra, C., Peña-Salamanca, E. y Solarte-Soto, J. (2014). Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 179 – 188. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a16.pdf>

Málvarez A. (1999). *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. UNESCO, Montevideo.

Montoya, Jorge Ignacio, Ceballos, Leonardo, Casas, Juan Carlos, y Morató, Jordi. (2010). Estudio Comparativo De La Remoción De Materia Orgánica En Humedales Construidos De Flujo Horizontal Subsuperficial Usando Tres Especies De Macrófitas. *Revista EIA*, (14), 75-84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372010000200007&lng=en&tlng=es.

Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación y ONU-Agua. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>

Paredes, L. (2014). *Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical, sembrados con Heliconia (sp), para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d925c8b8-d1e1-4072-8d05-addae093dcd6/content>

Peña-Salamanca, Enrique J., Madera-Parra, Carlos A., Sánchez, Jesús M., y Medina-Vásquez, Javier. (2013). BIOPROSPECCIÓN DE PLANTAS NATIVAS PARA SU USO EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONA PSITTACORUM (HELICONIACEA). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469-481. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000400004&lng=en&tlng=es

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>

Rice, E. W., Bridgewater, L., & American Public Health Association (Eds.). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 10)*. Washington, DC: American public health association.

Rodríguez-González, María Reyes, Molina-Burgos, Judith, Jácome-Burgos, Alfredo, y Suárez-López, Joaquín. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(2), 223-235. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432013000200007&lng=es&tlng=es.

Stewart, E. (2005). *Evaluation of septic tank and subsurface flow wetland for Jamaican public school wastewater treatment*. Michigan Technological University: Michigan, MI, USA.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018): *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición*

revisada.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202018.%20Compendio%20de%20sistemas%20y%20tecnolog%C3%ADas%20de%20saneamiento.pdf

UNICESAR. (2021). *Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 “por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones”*. Valledupar, Cesar: Universidad Popular del Cesar.

UNICESAR. (2023). *Lineamientos y Guía Orientadora para la Estructuración de Informes de Prácticas Académicas en el Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar*. Valledupar, Cesar, Colombia: Universidad Popular del Cesar.

Vargas, Adriana K.N., Calderón, Jimmy, Velásquez, David, Castro, Milton, y Núñez, Diego A. (2020). Biological system analysis for domestic wastewater treatment in Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>

Venegas Castillo, J. A. 1., y Aguilar Álvarez, R. E. 1. (2020). Determinación de los parámetros de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para la optimización del diseño de modelos de caja negra bajo condiciones tropicales. San José, Costa Rica.

Venegas, A. (16 de marzo de 2018). Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. *La Republica.co*. <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>

Zamora, Frank, Rodríguez, Nectali, Torres, Duilio, y Yendis, Héctor. (2008). Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro*, 20(3), 193-199.

ANEXOS

A continuación, se presentan los anexos correspondientes:

Anexo 1.

Pruebas realizadas en los laboratorios de la Universidad Popular del Cesar

No.	FIGURAS	No.	FIGURAS
1		2	
3		4	

No.

FIGURAS

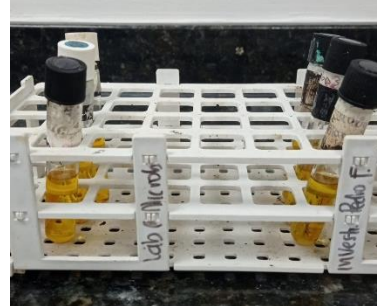
No.

FIGURAS

5



6



7



8



9



10



Nota. Tomadas por los Autores, 2023.

Anexo 2.

Instalación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto

No.	FIGURAS	No.	FIGURAS
1		2	
3		4	

Nota. Tomadas por los Autores, 2023.



Anexo 3.

Muestra del agua residual doméstica del predio Makuma



Nota. Tomadas por los Autores, 2023.

Anexo 4.

Certificado de ponencia The Expo (Nacional)



THE EXPO
Semilleros & Jóvenes Investigadores



**Universidad
Popular del Cesar**

CERTIFICADO
Otorgado a:

*Jarlis Campuzano Gámez, Oneider Smith Vilorio Mendoza,
Karina Paola Torres Cervera*

Por su participación en calidad de **PONENTE**, con el trabajo titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE UN
HUMEDAL ARTIFICIAL USANDO *Gyneryum saggitatum* Y
Heliconia sp. EN AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN EL
PREDIO MAKUMA DE LA VEREDA CALABAZO, MAGDALENA**

Dado en Valledupar, a los 18 días del mes de noviembre de 2022

Clarivel Parra D.
Clarivel Parra Ditta
Vicerrectora de Investigación y Extensión

Martha Guerra Muñoz
Martha Guerra Muñoz
Directora División de Investigación