Evaluación de *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* para el tratamiento de aguas residuales mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial en el campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional – Girardot

María Camila Serna Lozano
Yuli Estefani Peña Apache

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Programa de Ingeniería Ambiental
2024

Evaluación de *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* para el tratamiento de aguas residuales mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial en el campus de la Universidad de Cundinamarca, Seccional – Girardot

María Camila Serna Lozano
Yuli Estefani Peña Apache
Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Directora del trabajo de grado:
Dalia Xiomara Suarez Pulido

Codirector del trabajo de grado:
Francis Antonio Posso

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Programa de Ingeniería Ambiental
2024

Nota de aprobación

_____

_____

_____

_____
Firma del director del trabajo de grado

_____
Firma del jurado

_____
Firma del jurado

Agradecimientos

Le damos gracias a Dios por darnos la sabiduría y las capacidades para llegar a este punto de nuestras vidas, por darnos la oportunidad de escoger esta hermosa profesión y darnos el amor y la pasión de principio a fin, también le damos gracias por permitirnos coincidir como compañeras desde inicios de carrera hasta llegar a ser grandes amigas.

Le damos gracias a nuestras familias por siempre apoyarnos tanto en los momentos de felicidad como en los momentos difíciles, por siempre confiar en nosotras y motivarnos para siempre hacer las cosas de la mejor manera.

A nuestra directora de grado Dalia Suarez y codirector Francis Posso por siempre estar pendiente y atentos a todas las inquietudes y preguntas que teníamos frente al proyecto, por ser guías ejemplares y asesorarnos en todo el proceso, recibiendo de la mejor manera cada inquietud y solicitud para que nosotras lográramos cumplir con nuestros objetivos de la mejor manera. Gracias por todo el conocimiento que nos brindaron y permitirnos tomar este proyecto para poder desarrollarlo.

Dedicatoria

A Dios por llenarme de sabiduría para poder desempeñar el desarrollo de este proyecto de la mejor manera y también el conocimiento y paciencia desde el primer día de universidad hasta hoy

A mi madre Sandra Lozano, mi padre Julián Serna y mi hermano Jacobo Serna por siempre estar pendientes de mí y apoyarme en todo este camino, acompañándome siempre en los momentos difíciles y celebrando igualmente cada logro

A mi novio Juan Correa por apoyarme siempre y estar conmigo en los momentos más alegres y difíciles, por confiar en mí y ser un ejemplo para perseguir mis sueños y confiar en mis capacidades cada dia

Maria Camila Serna Lozano

Con infinita gratitud dedico este trabajo a Dios, quien ha iluminado cada paso del camino, me ha forjado con amor, perseverancia y me ha permitido culminar esta etapa tan maravillosa de mi vida con las personas que amo

A mis padres Maria Lilia Apache y Ruben Dario Peña quienes han sido mi pilar y fuente de inspiración, gracias por su inmenso amor y apoyo incondicional, por apoyar mis sueños y con gran esfuerzo llevarme de la mano para alcanzar cada meta.

A mis hermanos, Oddy, Evelio y Viviana por creer en mí y estar presentes en cada momento

A mi compañero de vida Andrés Abril por su apoyo, motivación constante y compañía en cada proceso

A Abby, mi compañera inseparable de 4 patitas, por la alegría y el amor puro que me acompaño largas noches de estudio, ahora tu compañía será para siempre

A mis compañeras y amigas, en especial Camila Serna por hacer este paso por la universidad un segundo hogar y marcar momentos memorables en cada semestre.

Yuli Estefani Peña Apache

Contenido

Resumen 10
Introducción 12
Planteamiento del problema 14
Justificación 17
Marco normativo 19
Objetivos 20
Objetivo general 20
Objetivos específicos 20
Estado del arte 20
Marco Teórico 25
Aguas residuales domesticas (ARD) 25
Humedales artificiales (HA) 25
Sistemas de flujo subsuperficial (FSS). 27
Componentes del humedal artificial 29
Sustrato o medio de soporte 29
Vegetación 30
Microorganismos 30
Parámetros de interés para el tratamiento por humedales artificiales 30
DQO 30
Nitrógeno 31
Fosforo 31
Caudal 31
Cobertura vegetal 32
Tiempo de retención hidráulica TRH 32
Marco Legal 32
Metodología 33
Fase 1: Diseño y construcción de los humedales artificiales 34
Selección de las especies 34
Fase 2. Caracterización de aguas residuales 36
Preparación agua residual sintética 36
Fase 3. Criterios de operación de los Humedales 37
Fase 4. Diseño experimental 38

Fase 5. Toma de muestras 39
Determinación DBO 39
Fase 6. Tabulación y Análisis de resultados 40
Hipótesis nulas 41
Hipótesis alternas 41
Resultados y análisis 41
Características iniciales del agua residual doméstica sintética. 41
Comportamiento en los porcentajes de remoción para DQO, NT y PT 42
Remoción DQO 42
Remoción NT 46
Remoción PT 50
Porcentajes de remoción para DQO, NT y PT 53
Remoción de DQO 53
Remoción de NT 57
Remoción de PT 60
Eficiencia de remoción de los humedales para el agua residual domestica del Campus de la Universidad de Cundinamarca- Seccional Girardot 62
Determinación de DBO 64
Características vegetales 65
Análisis estadístico de los datos y confirmación de hipótesis experimental 66
Conclusiones 67
Recomendaciones 70
Bibliografía 72

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados de la caracterización inicial de los parámetros DQO, nitrógeno total y Fosforo total de las aguas residuales de la Universidad de Cundinamarca. 36
Tabla 2. Concentraciones de macronutrientes utilizados para elaboración de agua residual sintética correspondiente a la temporada alta y baja 37
Tabla 3. Concentraciones de micronutrientes utilizados para elaboración de agua residual sintética correspondiente a la temporada alta y baja 37
Tabla 4. Características hidráulicas de las unidades experimentales 38
Tabla 5. Visualización del diseño estadístico 39
Tabla 6. Descripción de las condiciones iniciales para cada agua residual sintética 42
Tabla 7. Concentrciones teoricas finales para el agua residual de la Universidad de Cundinamarca, seccional Girardot en los dos tratamientos (Heliconia Psittacorum y Strelitzia Reginae) 62
Tabla 8.Requisitos para los vertidos de aguas residuales urbanas para NT y PT, por directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas 63
Tabla 9. Determinación de la DBO basado en la DQO obtenida en la caracterización y la remoción 64
Tabla 10. Resultados de significancia estadística 67

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Índice de calidad del agua del Rio Bogotá. Fuente: ENA 2022 16
Ilustración 2. Estructura general de un humedal artificial. Fuente: Los humedales como tecnología emergente (2012) 26
Ilustración 3.Humedal artificial de flujo superficial, por Sandec/Eawag (2019) 27
Ilustración 4.. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, por Sandec/Eawag (2019). 28
Ilustración 5. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical, por Sandec/Eawag (2019)..... 28
Ilustración 6. Evidencia del color en la alícuota de agua residual sintética inicial (izquierda) y las alícuotas de TH y TS respectivamente (derecha) 55
Ilustración 7. Estado del Humedal construido en el momento de instalado (imagen de la izquierda) y 6 meses después realizado el tratamiento de las aguas (imagen de la derecha) 66

Resumen

Las aguas residuales domesticas provienen de las actividades diarias en los hogares e instituciones que no realizan actividades industriales, estas aguas presentan altos niveles de materia orgánica, jabones, aceites, microrganismos patógenos, entre otros. En Colombia gran cantidad de estas aguas se vierte sin ningún tipo de tratamiento a los cuerpos de agua afectando su calidad. Girardot es uno de los municipios que no cuenta con una PTAR vertiendo sus aguas directamente al alcantarillado y seguidamente al Rio Bogotá. Por esta razón resulta necesario la implementación de sistemas sostenibles para la depuración de las aguas.

Este proyecto propone la implementación de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del campus de la Universidad Cundinamarca utilizando dos especies de plantas ornamentales *Heliconia Psitacorum* y *Strelitzia Reginae.* La investigación evaluó la eficiencia de remoción para los parámetros demanda química de oxígeno (DQO), Nitrógeno total (NT) y Fosforo total (PT) en el agua residual sintética elaborada con altas concentraciones (CA) y bajas concentraciones (CB) iniciales a un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 3 días, las mediciones se realizaron una vez por semana, durante 6 meses, en dos sistemas de humedales construidos, uno para cada especie de planta. Los resultados de la investigación evidenciaron valores medios de remoción de DQO de 80% para ambas especies, NT de 65% y 68% y PT de 47% y 43% para *Strelitzia Reginae* y *Heliconia Psittacorum* respectivamente. No se evidenciaron diferencias significativas entre el tipo de planta o la concentración inicial en la remoción de los contaminantes. Los resultados obtenidos dan cuenta de la reducción efectiva de la contaminación de las aguas residuales y aprueban la aplicabilidad de los humedales construidos para el tratamiento de estas.

Palabras clave: Humedales construidos, fitorremediación, plantas ornamentales, tratamiento de agua residual, porcentajes de remoción, materia organica, nutrientes

Abstract

Domestic wastewater originates from daily activities in homes and institutions that do not engage in industrial processes. These waters typically contain high levels of organic matter, soaps, oils, and pathogenic microorganisms. In Colombia, a significant amount of this wastewater is discharged untreated into water bodies, adversely affecting their quality. Girardot is one municipality that lacks a wastewater treatment plant (WWTP), leading to direct disposal of its wastewater into the sewer system and subsequently into the Bogotá River. Consequently, there is a pressing need for the implementation of sustainable water purification systems.

This project proposes the establishment of a horizontal subsurface flow wetland to treat wastewater from the Universidad Cundinamarca's campus. The system will utilize two species of ornamental plants: Heliconia psittacorum and Strelitzia reginae. The research focused on evaluating the removal efficiency for key parameters including Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN), and Total Phosphorus (TP) from synthetic wastewater prepared with both high and low initial concentrations, using a hydraulic retention time (HRT) of three days. Measurements were conducted weekly over six months in two constructed wetland systems, one for each plant species. The findings revealed average COD removal rates of 80% for both species, with TN removal efficiencies of 65% for Strelitzia reginae and 68% for Heliconia psittacorum. The TP removal rates were 47% for Strelitzia reginae and 43% for Heliconia psittacorum. No significant differences were observed between the two plant types or the initial concentrations in terms of pollutant removal. Overall, the results demonstrate an effective reduction in wastewater pollution and support the viability of constructed wetlands for wastewater treatment.

Keywords: Constructed wetlands, phytoremediation, ornamental plants, wastewater treatment, removal percentages, organic matter, nutrients

Introducción

El agua es un recurso vital para la supervivencia de los seres vivos y juega un papel fundamental en el sostenimiento de los ecosistemas. Además, es crucial para el desarrollo de las actividades cotidianas de los seres humanos y la construcción de las sociedades contribuyendo en múltiples áreas como la agricultura, la industria, producción de energía y demás actividades económicas esenciales. Pese a su importancia el recurso hídrico se ha visto amenazado a nivel mundial debido a la contaminación y la constante demanda que ha generado el crecimiento poblacional provocando su agotamiento. Según datos del Instituto Mundial de Recursos aproximadamente el 50% de la población mundial vive bajo condiciones de alto grado de estrés hídrico (escasez de agua dulce) por al menos un mes al año (Kuzma, Saccoccia & Chertock, 2023). Paralelo a esto el panorama para el 2050 estima un aumento de 55% en la extracción del recurso a nivel mundial y al menos una de cada cuatro personas se verá afectada por la escasez del recurso. (Gutierrez citado en Naciones Unidas, s.f.).

Sumado a esto, la contaminación generada por las diferentes actividades antrópicas incrementa la escasez y deterioro del agua. Según las Naciones Unidas más del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descargan sin ningún tipo de tratamiento al medio ambiente (2017). Específicamente en Colombia, el Informe Nacional de Monitoreo a los Recursos del SGP-APSB evidenció que para el año 2021 del total de los 1102 municipios del país, se tiene un registro de 715 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicados en 534 municipios, resultando solo en un 49% del total de los municipios de Colombia que cuenta con un STAR, cabe aclarar que solo corresponde a la presencia de la infraestructura física y es independiente de su funcionalidad o estado operativo. Además, el informe señala que en Colombia se generan 2.126 millones de metros cúbicos de aguas residuales municipales, de los cuales solo el 53% recibe tratamiento. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2022) . El vertimiento

directo de las aguas residuales no solo tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente, también se convierte en un problema de salud pública, generando enfermedades diarreicas, la hepatitis A, la fiebre tifoidea, entre otras. (Organizacion Mundial de la Salud, 2023)

Según un reporte de ENA, para el año 2022 las corrientes hídricas superficiales registraron vertimientos de: DBO, 1’389,465 t/año; DQO, 4’517.890 t/año y SST, 1’350.207 t/año, De las cuales se abarcan cuatro sectores económicos: población, industria, sacrifico animal y cafetero. Estos datos evidencian la problemática en cuanto a la contaminación de materia orgánica y solidos totales contenida en aguas residuales domésticas.

Por lo anterior, es importante recalcar que lo que constituye la generación de vertimiento es proporcional al consumo de agua, dicho esto, según Silva et al. (2017) “Los usuarios del agua en zonas urbanas se clasifican en: residenciales, comerciales, industriales e institucionales”. Particularmente en un sector comercial según Cheng y Hong, (2004) “las instituciones o centros educativos, por su tamaño y demanda de agua son considerados como altos consumidores”, y como lo ejemplifica Bonet et al (2002) “los consumos de agua en centros universitarios son similares a los consumos de ciudades de tamaño medio”. En este contexto, es evidente la influencia que tiene las instituciones en la generación de altos volúmenes de agua residual por la concurrencia de personas en estos sitios. Frente a este panorama ambiental surge la necesidad de intervenir implementando diferentes estrategias para el tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico. Las plantas de tratamiento de agua residual presentan sistemas de tratamiento convencionales debido a los procesos que realizan como lo son: el tratamiento preliminar, la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Existen también los sistemas de tratamiento no convencionales que adoptan tecnologías más económicas y sostenibles, imitando los procesos que hace la naturaleza para la depuración de las aguas. (WWAP, 2018) Un ejemplo

de este son los humedales artificiales, que depuran las aguas residuales gracias a la interacción entre las plantas, el sustrato y los microorganismos que utilizan como fuente de energía la materia orgánica de las aguas contaminadas. Los humedales artificiales se componen de plantas macrófitas que emergen después de contar con unas condiciones de sustrato ideales. (Delgadillo, 2010) La implementación de plantas ornamentales en los sistemas de humedal permite que el sistema sea más llamativo aportando a la estética del paisaje y atracción para la comunidad.

En este sentido la Universidad de Cundinamarca busca fortalecer desde la eficiencia en sus procesos la gestión integral del recurso hídrico a partir del tratamiento de sus aguas residuales mediante la presente investigación que implementa las especies *Heliconia Psittacorum y Strelitzia Reginae* en la creación de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales del campus universitario. Teniendo como objetivo principal evaluar la eficacia de estas dos plantas en la remoción de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales. En Colombia especialmente se tienen los casos de la universidad católica y la universidad libre en Bogotá donde implementan sistemas de depuración naturales con diferentes tipos de plantas como la *Lemna mino o Typha spp* en la depuración de aguas residuales de las instituciones educativas respectivamente.

Planteamiento del problema

Las aguas residuales domesticas (ARD) son el resultado de las actividades diarias que se realizan en los hogares que involucran el contacto con agua cruda o potable, como el uso de baños, lavaderos, cocinas entre otros espacios y actividades que utilizan el recurso, es por esto que presentan gran cantidad de grasas, jabones, materia orgánica y microorganismos patógenos. (Espigares & Perez, sf). En Colombia se generan aproximadamente 2.126 millones de metros cúbicos de aguas residuales municipales cantidades que en su mayoría son vertidas directamente

a los cuerpos de agua (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2009)

El tratamiento de las aguas residuales domesticas se realiza bajo procesos físicos, químicos y biológicos que permitan disminuir la carga contaminante y minimizar el impacto en los cuerpos receptores. Sin embargo, la mayoría de los municipios del país no cuenta con un sistema de tratamiento adecuado, solo el 49% de los municipios cuenta con la infraestructura para el tratamiento y en muchos casos dichas estructuras no se encuentran en funcionamiento o no cuentan con las condiciones óptimas de operación. Girardot es considerada como la segunda ciudad más importante de Cundinamarca y como muchos municipios, carece de un sistema de tratamiento de las aguas residuales que genera. Como resultado tanto las aguas provenientes de la zona urbana como de áreas rurales son vertidas directamente en el Rio Bogotá, contribuyendo a la contaminación de este cuerpo hídrico.

El vertimiento aguas de tipo domestico sin tratamiento provoca la contaminación orgánica, química y bacteriológica de los cuerpos de agua, generando no solo un impacto negativo sobre el medio ambiente y los ecosistemas acuáticos, sino también convirtiéndose en un problema critico de salud pública. Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), para 2019 se calculó que aproximadamente 6,6 de cada 100.000 niños fallecieron en Colombia por causas relacionadas a enfermedades gastrointestinales, producto de la falta de saneamiento básico en el país. (DANE citado en UNICEF, 2023).

Para ilustrar, en el Estudio Nacional del Agua (ENA) emitido por el IDEAM en 2022 se tiene que sobre la corriente del río Bogotá se encuentran ubicados ocho puntos de monitoreo que hacen parte de la Red de Referencia Nacional, estos puntos de monitoreo dan lugar al Índice de Calidad del Agua (ICA) del rio Bogotá, como se muestra en la figura 1 se ilustra la categorización del ICA con

respecto a los años 2013, 2016 y 2021 donde se evidencia el notable declive de esta fuente hídrica. “La Campiña”, es el punto de monitoreo ubicado en el municipio de Girardot, antes de la desembocadura del río Bogotá al río Magdalena, según el ENA (2022),” Los altos valores en conductividad (CE) y en materia orgánica (DQO), y las bajas concentraciones en oxígeno (OD) entre el punto Alicachín y La Campiña influyen en esta categorización del indicador de calidad de agua como “malo”. Por lo anterior, esta situación constituye una alerta de la sobrecarga del sistema de vertimientos al cuerpo receptor de las aguas residuales de la comunidad girardoteña.

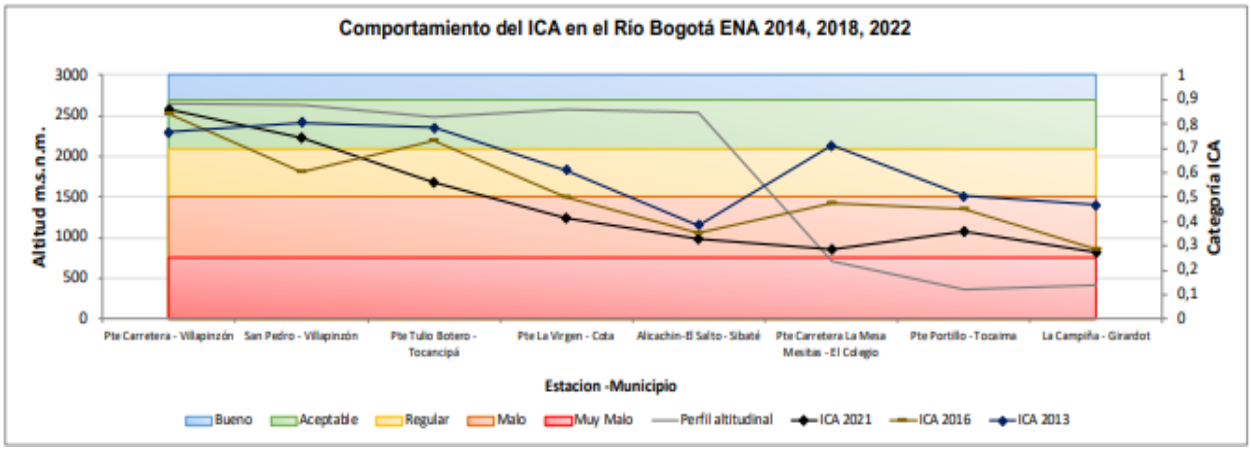


Ilustración 1. Índice de calidad del agua del Rio Bogotá. Fuente: ENA 2022

A pesar de la importancia de los sistemas de depuración, la falta de implementación en nuestro territorio nacional puede atribuirse a la falta de compromiso ambiental tanto de los municipios como de las grandes organizaciones, empresas e instituciones al no asumir esta responsabilidad de beneficio colectivo, por otra parte, los altos costos asociados a las infraestructuras, tecnologías, mantenimiento constante y recursos significativos como personal y electricidad dificulta su adopción tanto en áreas urbanas como en zonas rurales. (Morató, Subirana, Gris, Carneiro, & Pastor, 2016)

La Universidad de Cundinamarca – seccional Girardot, para el segundo semestre del año 2020 albergo alrededor de 2.000 personas correspondientes a 4 programas académicos en jornada diurna

y nocturna, que en promedio generaron el consumo de aproximadamente 5107,6 m^3/anuales (2018-2022) producto de actividades como aseo personal entre (docentes, administrativos y estudiantes), la preparación de alimentos (cafeterías y dispensadores de agua), además de laboratorios, riego y mantenimiento de zonas verdes, teniendo en cuenta que estas fueron vertidas al sistema de alcantarillado sin un previo tratamiento.

Por otra parte, es de interés institucional los hallazgos encontrados en el diagnóstico del Sistema de Gestión Ambiental SGA evaluados bajo la ISO 14001 y correspondientes al periodo académico 2023-2. En este se logró identificar algunas problemáticas ambientales relacionadas con el consumo de agua "anormal" considerando su importancia en un nivel "Alto" con una significancia en color naranja y una frecuencia de 6 observaciones en "Agotamiento de los recursos naturales por consumo de agua". Por otro lado, se encontraron 3 observaciones por generación de vertimientos generando "Afectación del suelo, del agua o de la atmosfera". Por esto, en el documento se considera tomar medidas de prevención y mitigación para la mejora del SGA.

Justificación

En 2014, el Consejo de Estado emitió la sentencia sobre el Rio Bogotá la cual le compete a los municipios ubicados en la cuenca del Rio Bogotá y realizan vertimientos en el cuerpo hídrico, el dictamen ordena el diseño e implementación de medidas para descontaminar el río y evitar su degradación a futuro. (Consejo de Estado de Colombia, 2014). El municipio de Girardot es el último municipio por donde transita el río Bogotá antes de desembocar en el río Magdalena. Sin embargo, carece de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que se encargue de reducir la carga contaminante a las descargas generadas por sus cerca de 150.000 habitantes. (Semana, 2020).

Por lo que el presente trabajo de investigación tiene como propósito presentar una alternativa sostenible para el tratamiento de las aguas residuales del campus de Universidad Cundinamarca seccional Girardot, con la finalidad de contrarrestar los impactos ambientales que generan estas descargas en el medio acuático.

De esta manera se plantea la implementación de un humedal artificial de flujo subsuperficial, el cual es un sistema de tratamiento de aguas residuales no convencional que utiliza fitorremediación para remover los contaminantes presentes en el agua. La implementación de los humedales construidos es recomendada en Colombia por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Colombia, bajo el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento-RAS (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010) y aplicada en diferentes lugares del país debido a la alta efectividad en la remoción de la carga contaminante con ciertas ventajas de operación y funcionamiento del sistema.

El desarrollo del proyecto además pretende contribuir al sistema de gestión ambiental de la universidad de Cundinamarca seccional Girardot en correlación con el objetivo ambiental de universidad verde al hacer un uso responsable del recurso agua e implementar una alternativa de tratamiento para las mismas, así mismo, promover el desarrollo sostenible y cumplir con la responsabilidad social empresarial en la generación de cero pasivos ambientales. Esto va de la mano con el compromiso global en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo sostenible los cuales se alinea el número seis “agua limpia y saneamiento”, el número once “ciudades y comunidades sostenibles” y el número doce “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”. (Organizacion de las Naciones Unidas, s.f.) Entre estos el Sistema de Gestión Ambiental (SGA), norma ISO 14001:2015 cobra importancia y se fortalecerá con la implantación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la Seccional Girardot.

Marco normativo

Contemplando lo establecido en la normativa ambiental colombiana en términos de su importancia para el manejo del recurso hídrico, se sustenta el desarrollo del presente proyecto para el manejo de aguas residuales domesticas según lo estipulado en la resolución 1433 del 2004, por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, específicamente orientados a establecer la meta individual de reducción de la carga contaminante al agua residual y se adoptan otras determinaciones como programas, proyectos y actividades para el saneamiento y tratamiento de vertimientos. Para dar garantía a la eficiencia del tratamiento al agua residual domestica se acoge la resolución 631 del 2015 puntualmente en el capítulo V articulo 8 en el 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 en función a lo determinado en el Decreto 1076 del 2015 reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible para la cumplida ejecución de las leyes del sector Ambiente.

A razón de contribuir al sistema de gestión ambiental de la universidad promoviendo el ahorro de agua y disminución de vertimientos se contempla el reúso del recurso hídrico. Esto se alinea con lo establecido en la resolución 1256 del 2021 en relación con las disposiciones asociadas al uso de aguas residuales tratadas. En el artículo 6 de dicha resolución se determinan los tipos de reúso que se le pueden destinar, destacando su aplicación para riego en áreas verdes y jardines del campus universitario al igual que los criterios estipulados en los parámetros para poder realizar estas actividades de manera adecuada, por último, estas disposiciones buscan proteger las riquezas naturales de la nación y planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su conservación, restauración y uso sostenible.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la eficacia de dos plantas ornamentales en la remoción de la carga contaminante presente en las aguas residuales de la Universidad de Cundinamarca, Girardot en un humedal artificial de flujo subsuperficial

Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de las especies *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales del campus universitario Seccional Girardot
- Evaluar la efectividad en la remoción de nutrientes presentes en las aguas residuales tratadas mediante las plantas ornamentales seleccionadas
- Establecer los parámetros de funcionamiento del humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Cundinamarca seccional Girardot

Estado del arte

La contaminación de los cuerpos de agua genera impactos negativos tanto en el ecosistema como en la salud de las personas, este problemática es debido al vertimiento específicamente de las aguas residuales domésticas, estas generan un cambio bacteriológico y químico en el agua debido a los altos niveles de compuestos orgánicos, microorganismos, solidos totales, sustancias inorgánicas, entre otras, provenientes de las actividades diarias de las personas (Arellano & Guzman, 20011). Debido a lo mencionado es necesario plantear propuestas que contribuyan a dar solución a dicha

problemática, como lo es la implementación de un sistema no convencional de humedal artificial de flujo subsuperficial con las especies ornamentales *Strelitzia reginae y Heliconia psittacorum.*

La implementación de humedales artificiales ha ganado relevancia a nivel mundial, aunque su implementación en América Latina sigue siendo limitada. El estudio titulado "Decentralized constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries: Field-scale case studies, overall performance and removal mechanisms" se enfoca en recopilar y revisar aplicaciones de humedales artificiales para el tratamiento descentralizado de las aguas residuales domésticas en los países en desarrollo durante el periodo 2014-2023. En esta revisión, se evaluaron 29 humedales construidos y se resalta la alta viabilidad de la aplicación de estos sistemas en dichos países, atribuido a las condiciones climáticas favorables y a los bajos costos de operación que requieren. Sin embargo, el estudio también resalta la necesidad de más investigaciones e información para así mismo poder optimizar los rendimientos de los humedales construidos. (Werkneh, 2024)

Tomando como referencia el estudio anterior, para la presente investigación se realizó igualmente la búsqueda de bibliografía en revistas científicas y proyectos de grado que hayan explorado el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial. La mayoría de los estudios han empleado como plantas, especies de humedales naturales por su fácil adaptación como el estudio "Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando *Bambusa sp* en la finca el recreo ubicado en Tauramena, Casanare". En el mismo se utilizó la *Bambusa sp* como macrófita experimental, adicionalmente se utilizó una segunda prueba con *la Heliconia psittacorum*. Los resultados evidenciaron una remoción del 73% y 79% respectivamente siendo la ultima la opción más eficiente. Igualmente, para la presente investigación se sugiere el uso de plantas ornamentales

que proveen flores para aportar mayor estética del paisaje. (Carvajal Arias, Ortiz, & Vega Beltran, 2017).

Para la selección de las plantas ornamentales utilizadas en la presente se utilizó como guía el siguiente artículo de revisión, “Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review” el cual revisa 87 humedales construidos de 21 países, se evidenció que para los países de América latina incluidos México, Colombia y Brasil las más utilizadas fueron *Canna, Iris, Heliconia* and *Strelitzia* debido a las condiciones geográficas y los altos porcentajes de remoción de los diferentes contaminantes. (Sandoval, Zamora-Castro, Vidal-Álvarez, & Marín-Muñiz, 2019)

Se encontraron diferentes estudios aproximadamente 5, que evalúan la eficiencia de remoción de carga orgánica (DQO) y nutrientes como el nitrógeno y fosforo de aguas residuales domesticas por medio de las plantas ornamentales seleccionadas. La investigación “Eliminación de nitrógeno en un humedal construido subsuperficial, plantado con *Heliconia psíttacorum*” realizada en la Universidad del Valle en Colombia evalúa la eficiencia de remoción de doce humedales de flujo subsuperficial a escala de laboratorio, con lechos de soporte en grava, seis de ellos sin plantar siendo controles y los otros seis plantados con *Heliconia psíttacorum*. Los humedales fueron expuestos a cargas hidráulicas de 0.02 y 0.05 m3 d-1 a un TRH de 2.5 y 1.0 día, respectivamente. Los resultados indicaron una mejor eficiencia en la remoción del NH3, NO3, y DQO en los tratamientos expuestos a menor carga hidráulica alcanzando porcentajes del 56.7%, -24.0% y 69.8%, respectivamente. Mientras que con la mayor carga hidráulica las eficiencias fueron del 33.6%, -3.4% y 53.6%. (Gutiérrez & Peña. 2011).

Por otra parte el estudio realizado por la Universidad de Antioquia en Colombia llamado “Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal

subsuperficial usando tres especies de macrófitas" evalúa la remoción de materia orgánica de agua residual domestica mediante la implementación de seis sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto sembrados con tres diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*. con mediciones in situ de cada 15 días, durante 3 meses. Se mencionan porcentajes de remoción de DQO y DBO correspondiente al 94,49 % y 93,50% respectivamente (Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. 2010).

El estudio realizado por La Universidad de Santo Tomas en Villavicencio titulado "Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero" evalúa la capacidad de remediación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con Heliconia psittacorum, a escala piloto, para tratar aguas residuales domésticas de bajo caudal en zonas rurales del piedemonte llanero. Los resultados mostraron remociones de 86,5% para DBO, 76,1% para Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 76,4% para Sólidos Suspendidos Totales (SST) y se destacaron mejores TRH de 2 días para 170 mg/l y de 8 días para 340 mg/l. (Rodríguez & Vargas, 2019).

Por otra parte la investigación "Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands" investigó el uso de cuatro especies ornamentales (*Zantedeschia aethiopica, Strelitzia reginae, Anturium andreanum y Agapanthus africanus*) en dos tipos de humedales de flujo subterráneo (vertical y horizontal) para el tratamiento de aguas residuales domésticas evidenciando que los humedales de flujo vertical (VFCW) mostraron una mejor eliminación de contaminantes para DBO, DQO y compuestos de nitrógeno. Específicamente la *Strelitzia reginae* tuvo un buen desempeño en la producción de flores más saludables y hojas más grandes en comparación con otras especies, incluyendo altas

eficiencias de eliminación de contaminantes, siendo más del 80% para DBO y DQO, 72,2% para amonio (NH4+) y 96,9% para coliformes totales (TC). (Zurita; De Anda & Belmont. 2009)

Adicionalmente la investigación "Performance of Laboratory-Scale Wetlands Planted with Tropical Ornamental Plants to Treat Domestic Wastewater" explora el uso de *Strelitzia reginae* y otras plantas ornamentales en un humedal de flujo subterráneo construido para el tratamiento de aguas residuales y al mismo tiempo demostrar que ofrece potencial de producción comercial de flores. El sistema logró una reducción de más del 75% de DQO, más del 70% de DBO y eliminación de nitrógeno, más del 66% de eliminación de fósforo y una reducción del 99,3% en coliformes totales y fecales. (Zurita; De Anda & Belmont. 2006)

Por último, de las investigaciones encontradas solo una implementa el sistema de tratamiento no convencional en una institución educativa, la "Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Libre" en Bogotá, aunque no implementan plantas ornamentales utilizan especies nativas de humedales naturales como son la *Zantedeschia aethiopica* (Cartucho) y *Schoenoplectus californicus* (Junco) y *Carex Sp* (Cortadera). Como resultados se alcanzó una remoción máxima de carga orgánica expresada como DQO de 70% (Rincón Medina & Millán Ballén, 2013). Esta investigación se realizó con el fin de poder disminuir la carga contamínate que generaba la universidad ya que realizaban sus descargas directamente al alcantarillado, es pertinente para nuestra investigación al promover la responsabilidad institucional que se tiene frente a la problemática de la contaminación de los cuerpos hídricos de la región.

Marco Teórico

Aguas residuales domesticas (ARD)

Las aguas residuales domésticas son aquellas provenientes de la utilización del recurso en las diversas actividades cotidianas en las viviendas. Estas aguas pueden contener una variedad de contaminantes y residuos, incluyendo las descargas del inodoro, duchas, el lavado de ropa, cocina y residuos de alimentos, lo que las convierte en aguas saturadas en jabones, grasas, materia orgánica y otros compuestos químicos.

Humedales artificiales (HA)

Los humedales artificiales son sistemas acuáticos biológicos construidos que imitan el funcionamiento de los humedales naturales. Los humedales principalmente se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y abarcar una comunidad biológica entre plantas macrofitas y microorganismos acondicionados a este tipo de vida acuática. Según Artega et al. (2019) "Estos entornos naturales originan una superficie ideal para el crecimiento de los microorganismos encargados de la filtración y adsorción de los contaminantes, la remoción de materia orgánica MO, además de inhibir el crecimiento de algas". En este sentido, los humedales artificiales han sido propicios como una alternativa sostenible para la depuración de aguas residuales simulando procesos físicos, biológicos y químicos.

Cabe resaltar que estos sistemas se utilizan principalmente como tratamiento secundario, lo que significa que los efluentes requieren primero un tratamiento primario, ajustado a las características del afluente, antes de ingresar al lecho de filtración del humedal. (Delgadillo et al, 2010).

El funcionamiento de los humedales artificiales se basa principalmente en la rizosfera, un entorno donde las plantas macrófitos crean un lecho de raíces que facilita el flujo del agua a tratar y la

transferencia de oxígeno proveniente de las hojas y el tallo de la planta, siendo este suministro de oxígeno fundamental para el proceso de oxidación y degradación de contaminantes, a la misma vez, para el desarrollo de microrganismos beneficiosos en el proceso de remoción. El esquema general de un humedal artificial se muestra en la ilustración 2.

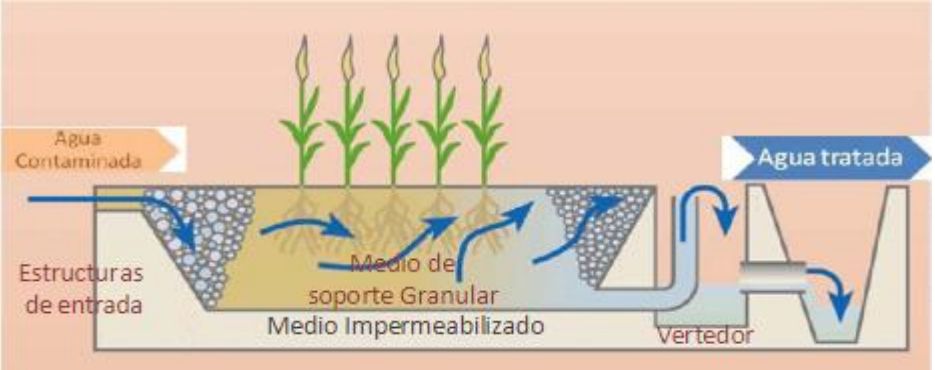


Ilustración 2. Estructura general de un humedal artificial. Fuente: Los humedales como tecnología emergente (2012)

Para el tratamiento de aguas residuales existen dos tipos de humedales artificiales y su clasificación depende de la vegetación utilizada y el diseño del sistema, estos son conocidos como los de flujo libre o superficial y los de flujo subsuperficial, este último se clasifica al mismo tiempo en humedales artificiales de flujo horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, dependiendo la manera como las aguas residuales ingresan al sistema y atraviesan el lecho filtrante.

Sistemas de flujo libre o superficial (FS)

En este tipo de humedal el agua residual se encuentra expuesta sobre la superficie del sustrato con una trayectoria del fluido en sentido horizontal, por otra parte, su lecho filtrante está compuesto por grava o arena y se constituye por tener canales de poca profundidad entre (0,1 a 0,6 m). “Dichos humedales son aplicados para mejorar la condición de efluentes provenientes de tratamientos secundarios”. (Wallace y Kadlec, 2008). Ver ilustración 3.

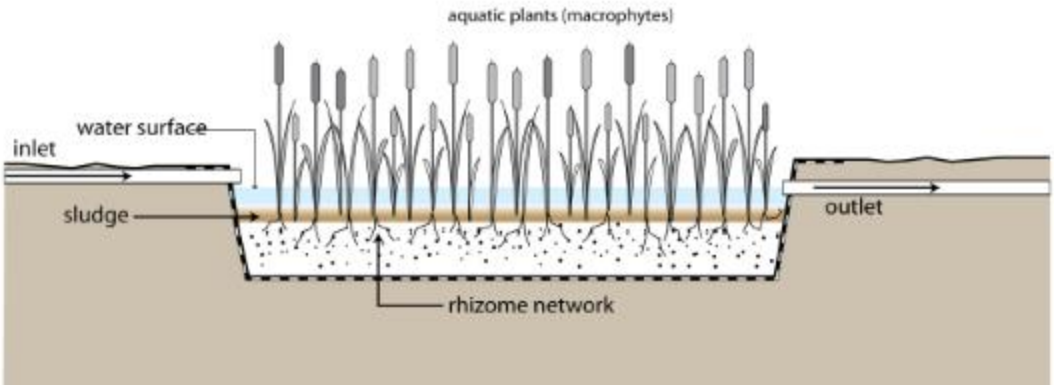


Ilustración 3.Humedal artificial de flujo superficial, por Sandec/Eawag (2019)

Sistemas de flujo subsuperficial (FSS).

Este tipo de humedales construidos son canales en donde se incorpora un sustrato de alta porosidad granular como grava o piedra volcánica y una vegetación adecuada, buscando que el nivel del agua permanezca por debajo del nivel del suelo (EPA, 1995). El agua residual fluye por entre el sustrato horizontal o verticalmente según como corresponda generando un contacto con zonas aerobias y anaerobias, adicionalmente el sistema granular favorece a la acumulación de la biopelicula de microorganismos degradadores de MO en la grava y las raíces de las plantas, asegurando una mayor eficiencia de remoción. Como dicho anteriormente estos pueden ser verticales u horizontales dependiendo de la manera en que ingresa el agua al sistema.

Se determina de flujo horizontal según Martínez et al. (2010), “cuando las aguas residuales cicula lentamente desde la zona de entrada del sistema, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta finalmente la zona del efluente”. El lecho suele tener una inclinación tanto en el fondo como en la superficie, generalmente entre 0,5 y 1%, lo que permite un drenaje completo del humedal. Además, la profundidad del lecho es otro aspecto relevante, ya que generalmente se establece entre 30 y 60 cm, teniendo en cuenta que el agua no debe estar expuesta en la superficie. (Espinosa 2014) Ver ilustración 4.

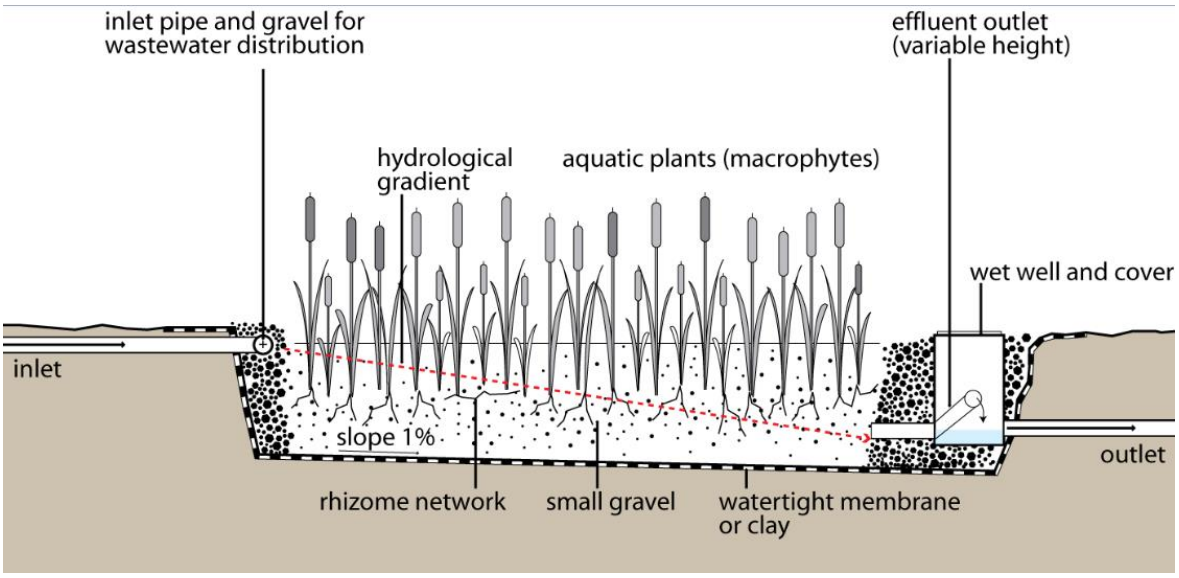


Ilustración 4.. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, por Sandec/Eawag (2019)

El sistema de flujo vertical se define por el sentido en que el agua residual atraviesa el lecho de sustrato, pues este ingresa en distintos puntos de la superficie manera homogénea a lo largo del humedal hacia la parte inferior del sistema donde se encuentra una clase de red de drenaje el cual evacua el caudal por gravedad, como se observa en la ilustración 5..

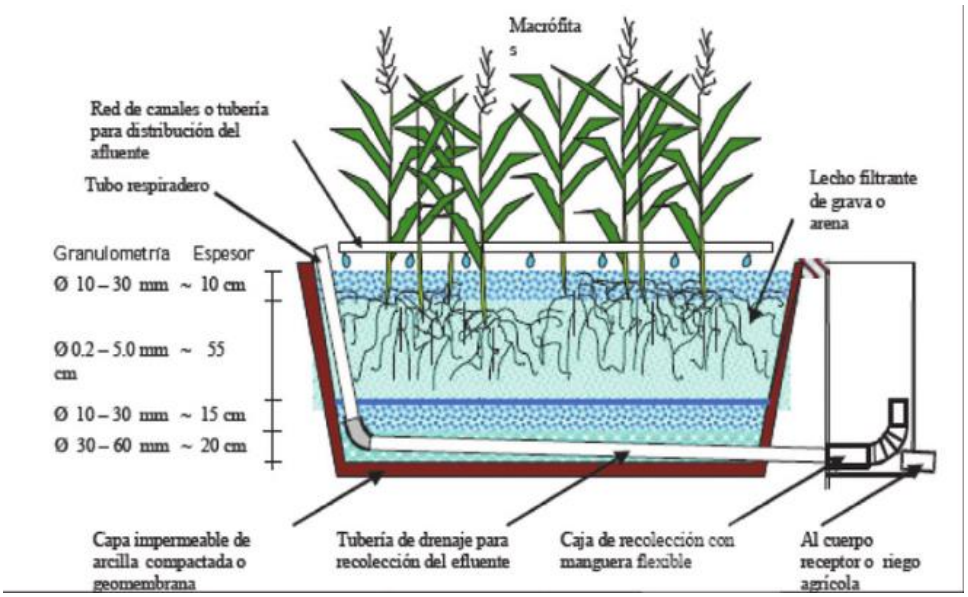


Ilustración 5. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical, por Sandec/Eawag (2019)

Estos sistemas de tratamiento son clasificados como alternativas sostenibles, simples, eficientes y económicas para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, teniendo en cuenta las características de cada tipo de humedal artificial se puede encontrar una mayor utilidad en los humedales de flujo subsuperficial ya que la remoción de carga contaminante es mayor debido a que su medio poroso brinda mayor área superficial y oxigenación para el crecimiento de los microorganismos. Cabe resaltar que debido a que el agua fluye por debajo de la superficie del medio, no se genera producción de vectores. Por lo anterior se debe tener en cuenta los componentes de un humedal artificial.

Componentes del humedal artificial

Los humedales artificiales están constituidos por tres componentes típicos, correspondientes al agua residual o afluente, un sustrato de material sólido y plantas emergentes. Adicionalmente, a medida que el agua residual es tratada, comienzan a desarrollarse microorganismos y pequeños invertebrados acuáticos que contribuyen al proceso de purificación.

Sustrato o medio de soporte

El sustrato en un humedal artificial es el material sólido que se utiliza como base o medio de soporte para las plantas y la fijación de la biopelicula bacteriana dentro del sistema. Este material puede ser grava, arena, arcilla, tierra o una combinación de estos, dependiendo del diseño del humedal.

Vegetación

La vegetación en su mayor parte son plantas macrófitas emergentes adecuadas a factores climáticos y geográficos de la zona, son pieza clave en el funcionamiento de los humedales artificiales. Según Chavarro (2021) “oxigena zonas anóxicas del sistema mediante sus raíces, genera absorción de carbono y otros nutrientes para la formación de tejidos propios de la planta, en el consumo de nutrientes de nitrógeno y fósforo (amonio y nitratos, y compuestos inorgánicos de fósforo)”, del mismo modo, beneficia a los microorganismos que realizan degradación aeróbica y minimiza el caudal del flujo del agua, ayudando al depósito de sólidos.

Microorganismos

En este grupo de organismos, las bacterias cumplen funciones metabólicas muy importantes, ya que permiten eliminar contaminantes y generar compuestos asimilables por la vegetación, “estos incluyen, principalmente, bacterias, hongos, y protozoos formados en una biopelicula alrededor del lecho o raíces de la planta” (Rodríguez y Vargas 2019)

Parámetros de interés para el tratamiento por humedales artificiales

DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) indica la cantidad de oxígeno requerida para degradar la materia orgánica presente en una muestra de agua en condiciones específicas de temperatura y duración. (IDEAM 2007).

Nitrógeno

Es considerado un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y la producción de cultivos, es un componente de la clorofila, pigmento esencial que permite la fotosíntesis.Sin embargo, su uso excesivo mediante fertilizantes puede causar su filtración al medio ambiente llegando a los cuerpos de agua, su exceso puede desencadenar procesos de eutrofización. Además, las formas reducidas de nitrógeno se oxidan en aguas naturales, lo que impacta los niveles de oxígeno disuelto (Nava et al, 2023).

Fosforo

Es un nutriente fundamental para los organismos vivos, en el caso de las plantas estimula el desarrollo radicular y promueve su crecimiento y floración. Por otro lado, se considera un parámetro clave en la calidad del agua debido a su papel en la eutrofización. Por ello, es crucial contar con técnicas de análisis y muestreos precisos para medir la concentración de las diferentes formas presentes en el medio acuático. (Sánchez de Fuentes, 2001)

Caudal

Medida que indica la cantidad de un fluido que pasa por un punto especifico en un tiempo determinado, se mide en m^3/s. Es un parámetro relevante ya que permite cuantificar consumos y evaluar la disponibilidad del recurso hídrico. (Caballero & Osorio, 2016).

Cobertura vegetal

Expresa el porcentaje de cobertura de suelo cubierto por una especie en una medida de espacio y ecosistema. Para un humedal, es un ecosistema de transición entre ambientes acuáticos y terrestres, con zonas húmedas, semihúmedas y secas, que se distingue por albergar una flora y fauna propio del mismo. (IDECA 2023).

Tiempo de retención hidráulica TRH

Se refiere al tiempo que el agua tarda en atravesar el humedal y durante el cual ocurren los procesos de depuración biológica. Para humedales según estudios se utilizan tiempos de 2 a10 días. (Rodriguez & Vargas 2019)

Marco Legal

Contemplando lo establecido en la normativa ambiental colombiana en términos de su importancia para el manejo del recurso hídrico, se sustenta el desarrollo del presente proyecto para el manejo de aguas residuales domesticas según lo estipulado en la resolución 1433 del 2004, por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, específicamente orientados a establecer la meta individual de reducción de la carga contaminante al agua residual y se adoptan otras determinaciones como proyectos, programas y actividades para el saneamiento y tratamiento de vertimientos, para dar garantía a la eficiencia del tratamiento al agua residual domestica se acoge la resolución 631 del 2015 puntualmente en el capítulo V articulo 8 en el 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” en función a lo determinado en el Decreto 1076 del 2015

reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible para la cumplida ejecución de las leyes del sector Ambiente.

A razón de uno de los objetivos específicos del presente proyecto por el cual se constituye el reúso del recurso hídrico se contempla lo descrito en la resolución 1207 de 2014 en relación con las disposiciones asociadas al uso de aguas residuales tratadas, en el artículo 6 de dicha resolución se determinan los tipos de reúso que se le pueden destinar a esta, identificando el uso para riego en áreas verdes y jardines del campus universitario al igual que los criterios estipulados en los parámetros para poder realizar estas actividades, por último, la resolución 1256 del 2021 y las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales considerando la protección de las riquezas naturales de la nación y planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su conservación, restauración y uso sostenible.

Metodología

Esta investigación adoptó un enfoque cuantitativo basado en mediciones numéricas y análisis estadísticos, con el objetivo de cumplir y responder a los objetivos propuestos. El diseño consta de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal validado mediante un ANOVA de dos entradas.

El diseño del humedal se realizó tomando como referencias manuales para el diseño y normativas relevantes como lo es el manual publicado por la EPA (2000) para el diseño y construcción de humedales artificiales, la metodología descrita en el libro tratamiento de Aguas Residuales de Jairo Alberto Romero Rojas (1999) y por último el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) en su título J, Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural.

El alcance de la investigación se centra en el diseño hidráulico para el flujo del agua en un medio subsuperficial y en la evaluación de la calidad del agua en función de la DQO, nitrógeno total (NT) y fosforo total (PT). La metodología se dividió en seis fases:

Fase 1: Diseño y construcción de los humedales artificiales

Para la instalaron del humedal de flujo subsuperficial horizontal se utilizaron como material de soporte 2 recipientes de plástico de medidas 60cm x 40cm x 30cm, a cada uno se le adecuo una llave a la salida como se observa en la figura 1. El volumen de cada recipiente fue de 72 litros, no obstante, debido al espacio que ocupan las plantas y el sustrato, el volumen de las aguas residuales a tratar se redujo a 32 litros A partir de las dimensiones de los recipientes se estimaron los volúmenes para el sustrato, las aguas residuales a tratar y el caudal. Ambos recipientes contenían 27 cm de sustrato correspondiente a grava media (8mm), sustrato y diámetro seleccionado mediante referencias Romero. A (1999). Adicionalmente cada recipiente contenía 3 plántulas de cada especie separada, es decir un recipiente contenía 3 plántulas de *Heliconia psittacorum* y el otro recipiente contenía 3 plántulas de *Strelitzia reginae*, las cuales tenían 80cm de alto aproximadamente y sus respectivas flores.

Selección de las especies

Para la selección de las especies se tuvieron en cuenta tres factores principales. En primer lugar, se evaluó la adaptabilidad a las condiciones climáticas de Girardot, el municipio se caracteriza por tener un clima cálido, donde la temperatura máxima promedio de *36 °C* y mínima de *24 °C*, y con altos porcentajes de humedad que oscilan entre el 64% al 78%. (Alcaldía de Girardot. Sf) La selección de la Heliconia se basó en las recomendaciones establecidas en el manual del ICA

(2012), la especie es una planta tropical conocida por sus flores y su fácil adaptación a diversas condiciones, prospera en climas cálidos de 20°C a 30°C, prefiere luz solar directa o sombra parcial, es por esto que se ubicó debajo de un árbol donde recibiera luz solar filtrada y no directa para evitar quemar sus hojas, requiere de alta humedad ambiental y un sustrato húmedo y rico en materia orgánica. La selección del Ave Paraíso se sustentó en las referencias de Ramírez-Guerrero et al. 2017. Esta especie también tropical soporta temperaturas de 18°C a 30°C, soporta la luz directa y necesita al menos 4 horas de sol, sin embargo, en zonas muy cálidas es recomendable darle sombra durante las horas más intensas. Necesita de un grado moderado de humedad ambiental y un riego constante para evitar un sustrato seco.

La selección de las especies también tuvo en cuenta su previo uso en procesos de fitorremediación y tratamiento de aguas residuales. Por último, se valoraron sus características ornamentales con el fin de contribuir a la mejora estética del lugar donde se ubican.

Una vez instalados los recipientes con el sustrato y las especies se procedió a establecer el periodo de adaptación de las especies en el sistema. El acondicionamiento se dividió en dos etapas, cumpliendo 10 días con agua potable a 22 cm de altura y los otros 30 días se acondicionan con agua residual recolectada de la caja de aguas residuales del campus universitario igualmente a 22 cm de altura dentro del recipiente.

Para completar el montaje fue necesario implementar dos tanques de plástico de 6 litros cada uno para almacenar y suministrar el líquido a los humedales, estos fueron elevados a un metro aproximadamente para asegurar la gravedad necesaria para el suministro del líquido. Los tanques se les adecuo llaves de salida para poder controlar el caudal y se conectaron mangueras de venoclisis para que el líquido llegara a la entrada de los humedales. Finalmente se instaló un tanque de 250 litros el cual cumplía la función de almacenar el agua residual recolectada de la caja de

aguas residuales de la Universidad y también las aguas residuales sintéticas elaboradas en el laboratorio de aguas de la Universidad de Cundinamarca, Girardot.

Fase 2. Caracterización de aguas residuales

Para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema inicialmente se realizó la caracterización de las aguas residuales provenientes del campus de la Universidad de Cundinamarca mediante un muestreo compuesto de 12 horas, las muestras fueron analizadas por el laboratorio Hidrolab. Los resultados se evidencian en la tabla 1.

Caracterización Aguas Residuales	
Parámetro	Resultado
DQO	699 mg/L
DBO	439 mg/L
Nitrógeno Total	218 mg N/L
Fosforo Total	3.1 mg P/L
SST	119mg/L
Coliformes totales	1,2E+8NMP /1000mL
Escherichia coli	8,2E+7NMP /1000mL

Tabla 1. Resultados de la caracterización inicial de los parámetros DQO, nitrógeno total y Fosforo total de las aguas residuales de la Universidad de Cundinamarca.

Preparación agua residual sintética

Se preparó aguas residuales con concentraciones de DQO, Nitrógeno Total (NT) y Fosforo Total (PT) similares a las obtenidas en la caracterización inicial de las aguas residuales de la Universidad de Cundinamarca, seccional Girardot. Las concentraciones del agua residual sintética simularon alta carga contaminante (AC) es decir una temporada con presencia de estudiantes y baja carga contaminante (BC) es decir en el periodo inter-semestral con ausencia de estudiantes y únicamente con personal administrativo. Las concentraciones de las aguas residuales sintéticas para un volumen de 250L se evidencian en las tablas 2 y 3.

Componente	Macro-nutrientes	Concentración (g/l)	Volumen alícuota AC (ml)	Volumen alícuota BC (ml)
SANGRE	Proteína	Puro	500	78
AZUCAR	Glucosa	200	180	27
ACEITE DE COCINA	Lípidos	Puro	25	4
FECULA DE MAÍZ	Carbohidratos	372	265	41

**CA: Temporada alta*
**CB: Temporada baja*

Tabla 2. Concentraciones de macronutrientes utilizados para elaboración de agua residual sintética correspondiente a la temporada alta y baja

Componente	Concentración (mg/l)	Volumen alícuota AC (ml)	Volumen alícuota BC (ml)
UREA	245	43,75	21
K2HPO4	154	18,75	9
MGCL2-6H2O	93	18,75	9
NACL	325	31,25	16
EDTA	133	25	13
MNSO4H2O	2	12,5	7
H3BO3	1	12,5	7
NA2.SEO3-5H2O	1	12,5	7

Tabla 3. Concentraciones de micronutrientes utilizados para elaboración de agua residual sintética correspondiente a la temporada alta y baja

Fase 3. Criterios de operación de los Humedales

Para la puesta en marcha del sistema se tuvo en cuenta el caudal de entrada, de salida del sistema y el tiempo de retención hidráulica (TRH) en el que iba a trabajar. Como se mencionó previamente, de acuerdo con las medidas de los recipientes se estimó el caudal de entrada y salida para un tiempo de retención definido de 3 días, este valor se determinó por diferentes referencias bibliográficas recopiladas como el apartado de humedales artificiales del libro tratamiento de aguas residuales de Alberto Romero, que menciona un mínimo de 2 días para remoción de nutrientes y DQO (corroborar cuando lo pueda abrir) adicional a otras investigaciones con las mismas especies seleccionadas evidenciando buenos rendimientos de 2 a 3 días de retención. La estimación de

ambos caudales se obtuvo como cociente del volumen neto de 32 litros y un tiempo de retención de 3 días dando como resultado 0,123ml/s. una vez definido lo anterior se procedió a estabilizar el sistema con las aguas residuales reales por una semana. En la tabla 4 se evidencian las características hidráulicas del sistema.

Parámetro		Dimensión	Unidad
Ancho	W	0.40	m
Longitud	L	0.60	m
Profundidad	H	0.30	m
Volumen	V	72	L
Caudal	Q	0,123	ml/s
Profundidad del agua	d	0.22	m
Porosidad	n	30-35	%
Volumen agua	Va	32	L
Altura agua	Ha	0.22	m
Altura sustrato	Hs	0.27	m
Tiempo de retención hidráulico	TRH	3	d

Tabla 4. Características hidráulicas de las unidades experimentales

Fase 4. Diseño experimental

En la investigación se utiliza un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) para evaluar la efectividad de las dos especies seleccionadas en el tratamiento del agua residual, en este diseño los tratamientos se aplican de manera aleatoria dentro de bloques que agrupan unidades experimentales similares. (Universidad de Granada, sf). Debido a que solo presentamos un humedal con *Heliconia Psittacorum* y un humedal con *Strelitzia Reginae* no realizamos la separación por bloques, por lo que el proyecto se adaptó así:

Se seleccionó un factor de bloqueo correspondiente a la concentración inicial de DQO, NT y PT. Para controlar la variabilidad se definieron dos niveles: alta (alta carga de contaminantes) correspondiente a la temporada alta de la Universidad y baja (baja carga de contaminantes) correspondiente a la temporada baja en la Universidad. Estos niveles trabajan como los bloques de nuestra investigación. Los tratamientos corresponden a las dos especies seleccionadas siendo el

tratamiento 1 con *Heliconia Psittacorum* (TH) y el tratamiento 2 con *Strelitzia Reginae* (TS), cada tratamiento se aplicó a los dos bloques definidos por los niveles de concentración. Cabe mencionar otros parámetros implementados como lo es el tiempo de retención hidráulica (TRH) seleccionado y el caudal del sistema, estos afectan la eficiencia de remoción de contaminantes sin embargo como son fijos no varían entre los tratamientos, debido a que son constantes no hacen parte del diseño experimental como tratamientos o bloque. Por último, se tiene la variable respuesta correspondiente a la eficiencia en la eliminación de contaminantes después de pasar por los tratamientos.

Bloque (concentración)	**Tanque 1**	**Tanque 2**
Baja concentración	*Heliconia Psittacorum*	*Heliconia Psittacorum*
Alta concentración	*Strelitzia Reginae*	*Strelitzia Reginae*

Tabla 5. Visualización del diseño estadístico

Fase 5. Toma de muestras

Una vez el sistema estabilizado se procedió a tomar las muestras de agua para medir los parámetros de DQO, NT y PT. Las mediciones se realizaron una vez por semana tomando alícuotas de 10ml a la salida de cada tratamiento resultando un total de 17 mediciones de cada parámetro para cada tratamiento, correspondiendo en 9 mediciones para la temporada alta y 8 para la temporada baja. La lectura de los parámetros se realizó con el fotómetro multiparámetro para aguas residuales de HI89300-HANNA INSTRUMENTS.

Determinación DBO

Una vez obtenidos los valores de DQO se procedió a determinar la DBO teórica con la fórmula 1, la cual establece una relación DQO/DBO de 1.2 para las aguas residuales domésticas. (Romero. 1999)

$$DBO_5 = DQO/1{,}2 \quad [1]$$

Fase 6. Tabulación y Análisis de resultados

La tabulación de los resultados se realizó por medio de hojas de cálculo en Microsoft Excel, tomando en cuenta los parámetros con sus valores iniciales a la entrada del sistema y los valores finales a la salida del sistema con el objetivo de determinar el porcentaje de remoción de cada uno de los tratamientos para poder obtener las gráficas que ilustren el comportamiento de los tratamientos.

Finalmente, para el análisis de los resultados se procedió a realizar un ANOVA de dos entradas con un factor de bloqueo por medio de Python, esto con el objetivo de evaluar la eficacia de las dos especies implementadas en la remoción de los parámetros DQO, NT y PT y así responder a los objetivos planteados en la investigación. Los datos utilizados para el análisis corresponden a los porcentajes de remoción obtenidos por cada tratamiento. El modelo estadístico de efecto está dado por:

$$Y = \epsilon + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + \omega_{ijk}$$

Donde:

ϵ: $Media\ total\ del\ porcentaje\ de\ remoción$
α_i: $Efecto\ del\ tipo\ de\ planta\ i$
β_j: $El\ efecto\ del\ parámetro\ j$
$(\alpha\beta)_{ij}$: $Interaccion\ del\ efecto\ entre\ el\ tipo\ de\ planta\ i, y\ el\ parametro\ j$
γ_k: $Efecto\ de\ la\ concentracion\ k$
ω_{ijk}: $Termino\ de\ error\ estocastico$

Las hipótesis de interés en la investigación determinan el efecto de tres variables independientes siendo la especie, el parámetro a medir y a concentración inicial trabajando esta última a su vez como el factor de bloqueo. De esta manera las hipótesis para los cuatro efectos del modelo anterior son:

Hipótesis nulas

Ho1: No hay diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre especies de plantas

Ho2: No hay diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre DQO, NT y PT

Ho3: No hay diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre las concentraciones iniciales (CA y BC)

Ho4: No hay interacción entre las especies de plantas y las condiciones iniciales en la remoción de contaminantes

Hipótesis alternas

Ho1: Existe diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre especies de plantas

Ho2: Existe diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre DQO, NT y PT

Ho3: Existe diferencia en la eficiencia de remoción de contaminantes entre las concentraciones iniciales (CA y BC)

Ho4: Existe interacción entre las especies de plantas y las condiciones iniciales en la remoción de contaminantes

Resultados y análisis

Características iniciales del agua residual doméstica sintética.

Para determinar los porcentajes de remoción fue necesario establecer las condiciones iniciales de DQO, NT y PT para cada muestra, así poder realizar el respectivo análisis.

	Condiciones Iniciales de Aguas Residuales				
	CA			CB	
Parámetros	**AR.1 (mg/L)**	**AR.2 (mg/L)**	**AR.3 (mg/L)**	**AR.4 (mg/L)**	**AR.5 (mg/L)**
DQO	1000	1300	1500	236	150
N	55	35	100	23	25
P	3,8	3,9	5	2	3,5

Tabla 6. Descripción de las condiciones iniciales para cada agua residual sintética

Como se observa en la tabla 6 el sistema operó con diferentes concentraciones iniciales debido a la elaboración de nuevas aguas sintéticas una vez se consumían los 250 L, en total se elaboraron 5 muestras de aguas residuales sintéticas pretendiendo mantener las concentraciones de CA y CB. Los valores de la DQO variaron entre 1000 – 1500 mg/L y 150 – 236 mg/L; para el Nitrógeno total fue de 35 – 100mg/L y de 23 – 25mg/L; por último, para el Fosforo total la variación fue de 3.8 – 5 y de 2. 3.5mg/L, para la temporada alta y la temporada baja respectivamente.

Comportamiento en los porcentajes de remoción para DQO, NT y PT

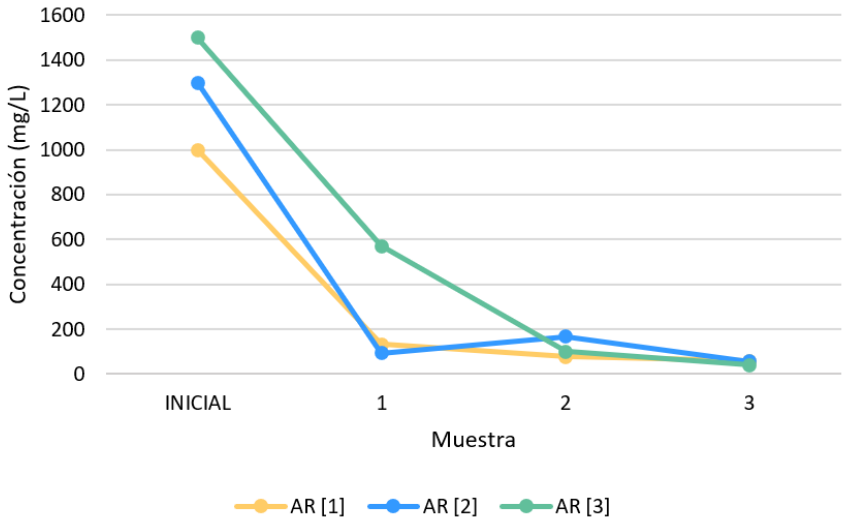
Los resultados obtenidos se presentan en función de los tratamientos con *Heliconia Psittacorum* (TH) y *Strelitzia Reginae* (TS), la concentración del agua residual sintética; concentración alta (CA) y concentración baja (CB) y los parámetros DQO, nitrógeno total (NT) y fosforo total (PT).

Remoción DQO

Las gráficas 1- 4 evidencian el comportamiento de la DQO para cada muestra, teniendo en cuenta la concentración inicial (AR [1]-[5]) y los dos tratamientos (*TH y TS*). En general se evidencia una tendencia de reducción en la concentración de la DQO para TH y TS.

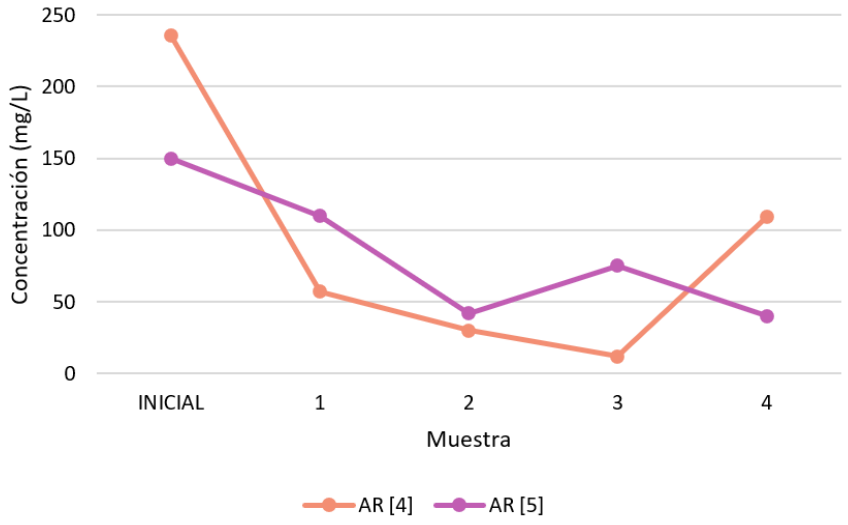
La gráfica 1 representa el tratamiento TS para las muestras de CA, se evidencia una disminución pronunciada de la DQO para las AR [1], [2], y [3] con un 87%, 93% y 62% de remoción en la

primera semana de funcionamiento. Posteriormente el sistema se muestra estables arrojando resultados de 94%, 96% y 97% de remoción.



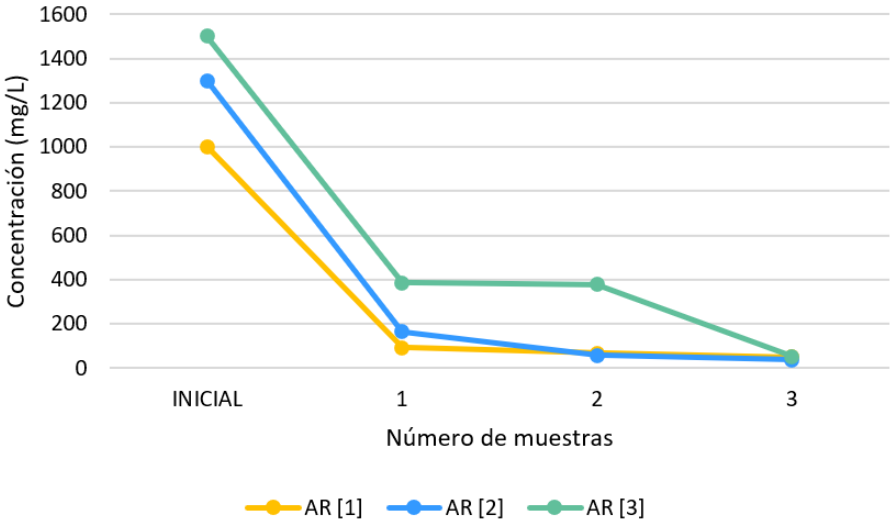
Gráfica 1. Remoción de DQO correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Strelitzia Reginae

La gráfica 2 describe el comportamiento del mismo tratamiento para las muestras de CB, se evidencia que el AR [4] tuvo una remoción inicial pronunciada alcanzando un 76% de remoción y finaliza con un rendimiento del 54%. Por otra parte, el AR [5] inicia con una remoción de 27%, presenta un comportamiento estable y finaliza con una remoción del 73%.



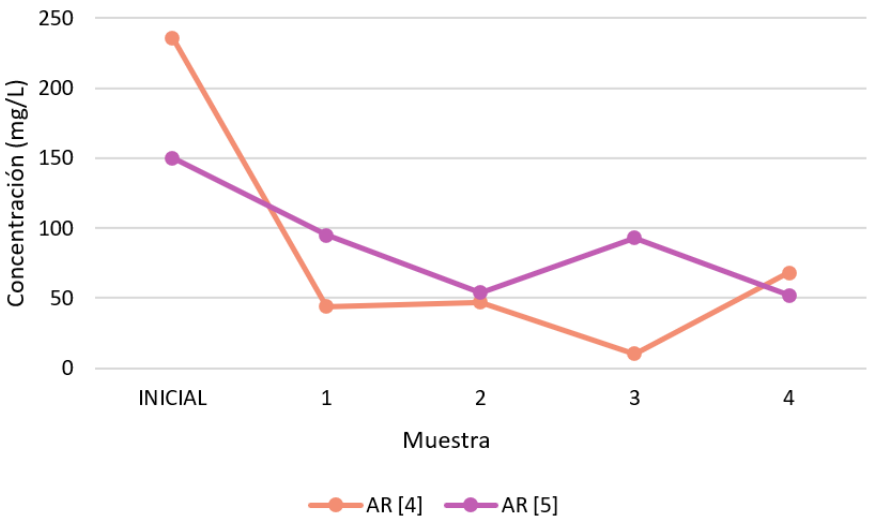
Gráfica 2. Remoción de DQO correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Strelitzia Reginae

La gráfica 3 corresponde al comportamiento en la remoción de DQO para el tratamiento TH en CA, se evidencia una disminución pronunciada en la primera etapa (INICIAL – Muestra 1) del tratamiento con porcentajes de remoción 91%, 87% y 74%, luego estabilizándose y terminando en concentraciones de 94%, 96% y 97%.



Gráfica 3. Remoción de DQO correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Heliconia Psittacorum

Finalmente, la gráfica 4 ilustra el comportamiento de remoción para CB del mismo tratamiento el cual el AR [4] presenta una fuerte disminución llegando a 81% de remoción y luego estabilizarse para terminar en 71% de remoción. Mientras que AR [5] tiene una tendencia de remoción constante alcanzando una remoción final de 65%.



Gráfica 4. Remoción de DQO correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Heliconia Psittacorum

Los mayores porcentajes de remoción de este parámetro se obtuvieron en la muestra 1 y 2 para CA con porcentajes de remoción superiores a 90% en los tratamientos TH y TS. Este resultado se atribuye al crecimiento inicial de las raíces particularmente en la etapa Inicial y en la muestra 1, como reporta Montoya *et al*, 2010 debido a la óptima adaptación por parte de las especies en el sistema, lo que potencia el proceso de la rizofiltración. Las raíces de las plantas retienen, precipitan y concentrar los contaminantes, además favorecen la adhesión de las comunidades bacterianas para degradar la materia orgánica. El sustrato también desempeña un papel crucial favoreciendo la adhesión microbiana permitiendo procesos de adsorción y filtración de contaminantes. (Montoya *et al*, 2010). De igual manera las condiciones de oxígeno fueron ideales para el desarrollo de los microorganismos en esta primera etapa, la mayor remoción de DQO se produce en la zona aerobia, debido al aprovechamiento del oxígeno (O_2) y la producción de dióxido de carbono (CO_2) y agua por actividad microbiana (Velasco, 2006)

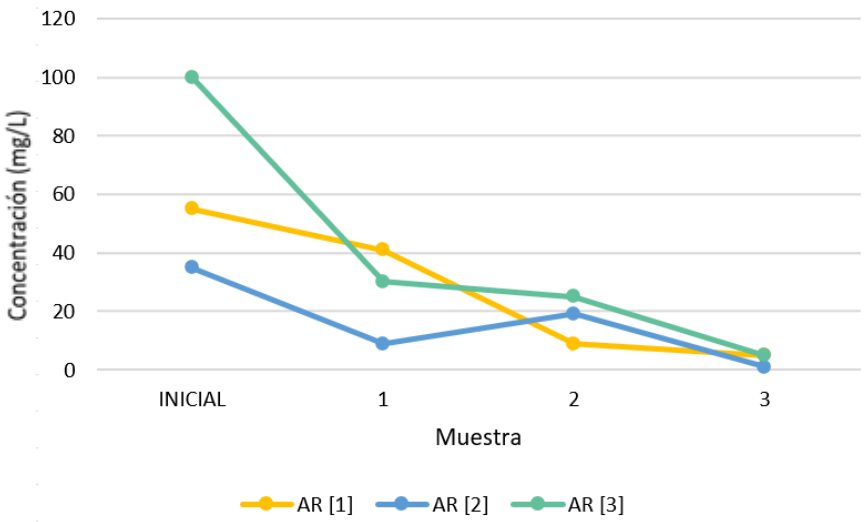
Específicamente el AR [4] presenta remoción desde el inicio hasta la toma 3, sin embargo, se evidencia un incremento en la concentración de la toma 4 respecto a la toma anterior. Este aumento es debido a los cambios de volumen en el sistema ocurridos días previos a la recolección de la

muestra. Romero *et al* (2009) sostiene que las concentraciones de nutrientes y carga orgánica en el efluente son afectadas por la variación del volumen de agua en el sistema, debido a factores como precipitación, evaporación y evapotranspiración. Los dos últimos procesos afectan los tratamientos ya que se concentran los componentes en el humedal, incrementando las concentraciones de nutrientes y carga orgánica, fenómeno que pudo haber ocurrido en el presente trabajo para el caso de la DQO para TH y TS en CB (gráfica 3 y 4).

Remoción NT

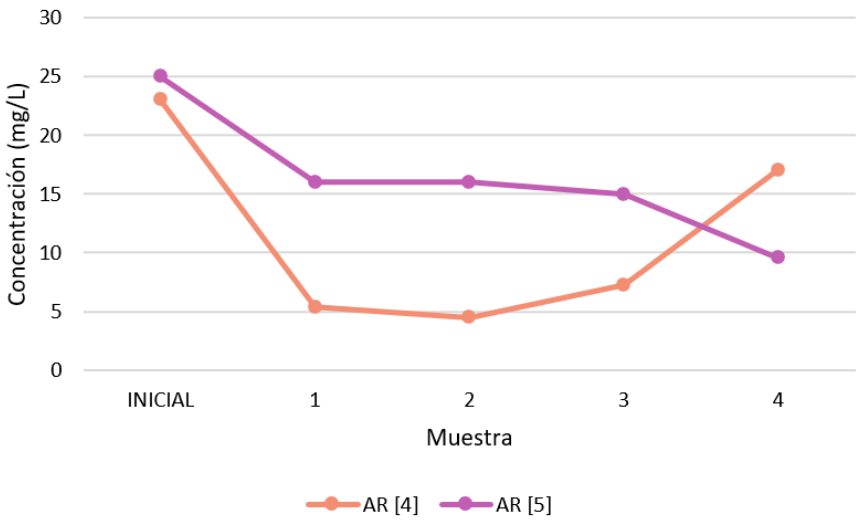
Las gráficas 5-8 evidencian el comportamiento que tuvo la remoción de NT para cada una de las muestras teniendo en cuenta la concentración inicial (CA y CB) y los dos tratamientos (*TH y TS*) En general se evidencia una tendencia de remoción en la concentración del NT en TH y TS.

La gráfica 5 pertenece a CA del tratamiento TS, se evidencia una disminución pronunciada para el AR [3] y más estable para el AR [1] y [2], con un 70%, 25% y 74% de remoción en la primera semana de funcionamiento, resultando en 82%, 80% y 82% de remoción para la muestra final.



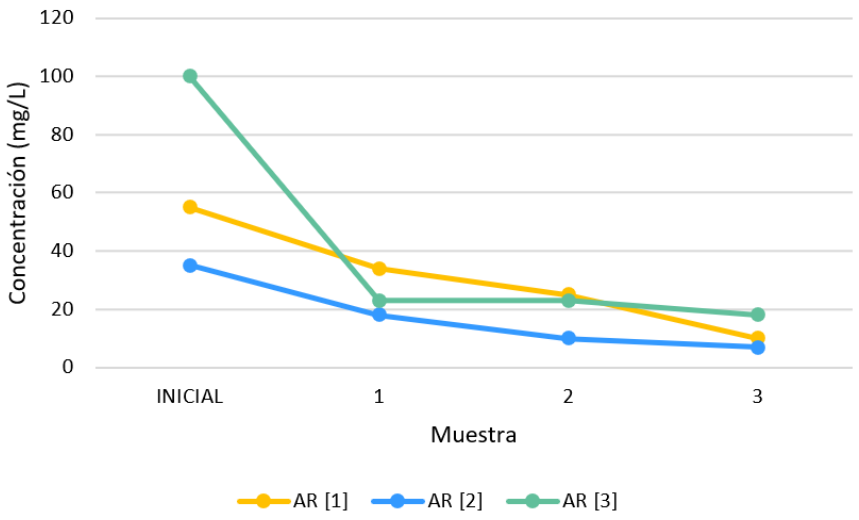
Gráfica 5. Remoción de Nitrógeno Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Strelitzia Reginae

La gráfica 6 representa la remoción del parámetro NT para CB del mismo tratamiento, se evidencia una remoción del 77% y 36% en la primera semana de funcionamiento y finaliza con una remoción de 26% y 62% para AR [4] y [5] respectivamente.



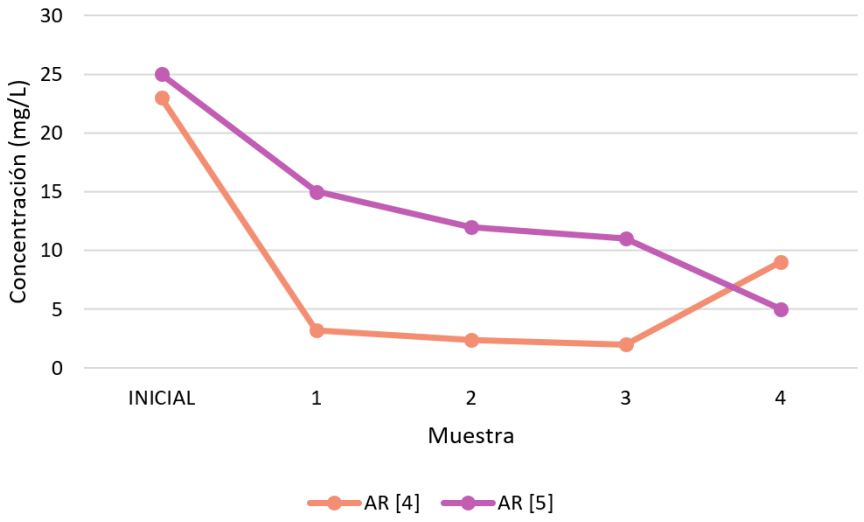
Gráfica 6. Remoción de Nitrógeno Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Strelitzia Reginae

La gráfica 7 representa el tratamiento TH en la remoción del parámetro NT para CA, se evidencia una remoción pronunciada para AR [1-3] en la primera semana de funcionamiento logrando remociones del 38%, 49% y 77% y finaliza con una remoción de 82%, 80% y 82% respectivamente.



Gráfica 7. Remoción de Nitrógeno Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Heliconia Psittacorum

Finalmente, la gráfica 8 representa la remoción en CB del mismo tratamiento, se evidencia una remoción del 86% y 40% en la primera semana de funcionamiento y finaliza con una remoción de 61% y 80% para AR [4] y [5] respectivamente.



Gráfica 8. Remoción de Nitrógeno Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Heliconia Psittacorum

La concentración inicial (CA y CB) en cada tratamiento tuvo un impacto y se reflejó en la eliminación significativa del nitrógeno especialmente en la fase inicial de TH (38%-77%) y TS (25%-74%) para CA y de TH (40%-86%) y TS (36%-77%) para CB. La variación refleja la

efectividad de la actividad microbiana al adaptarse a concentraciones más altas de nitrógeno y aumentar los procesos de nitrificación y desnitrificación hasta lograr un patrón estable de eliminación del nitrógeno. Esto sugiere que los microorganismos fueron eficientes para metabolizar concentraciones de nitrógeno más altas inicialmente. (Kadlec and Knight, 1996, como se citó en Sohsalam *et al*, 2008)

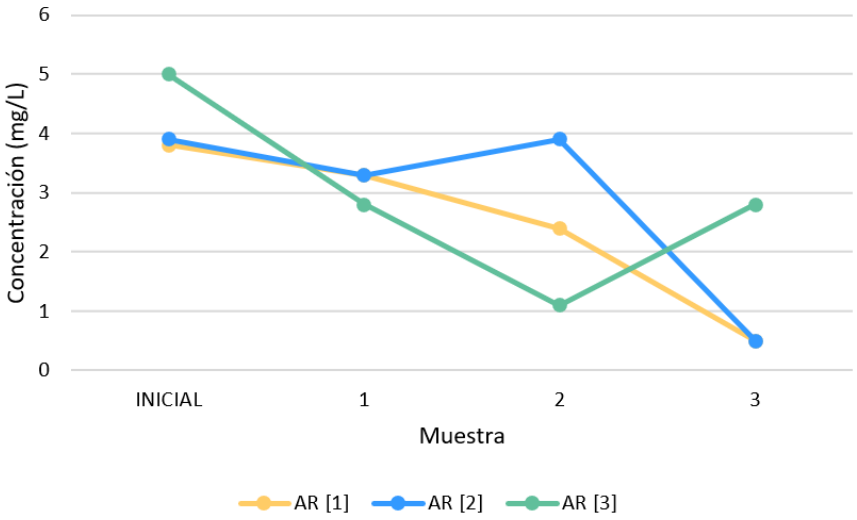
El tratamiento de TH finalizo en remociones consistentemente altas (80%-62%) con 4 de los 5 resultados con eficiencias por encima de 80% esto indica condiciones favorables de operación dentro de este tratamiento contrario a los valores máximos obtenidos por TS donde los porcentajes variaron de manera más notoria (26%-80%). Esto se puede deber a las fluctuaciones en los parámetros como el pH, la temperatura y la humedad ya que son factores que influyen en la remoción de nitrógeno. (Zurita *et al*, 2006)

El nitrógeno está presente en las aguas residuales de forma orgánica (N_{Org}), luego, a través de la amonificación se transforma en amoniaco (NH_3) asimilable por las plantas, donde el rango ideal de pH se encuentra en 6,5 a 8,5 en condiciones anaerobias. La reducción del nitrógeno amoniacal se da por la nitrificación donde los microrganismos son más sensibles a los cambios de pH encontrándose en un rango ideal de funcionamiento de 7.0 a 8.5, una temperatura entre 16° y 32° y en presencia de oxígeno; de este proceso el nitrógeno amoniacal es transformado en nitritos (NO^{2-}) y posteriormente nitratos (NO_3^-) forma asimilable por las plantas. Por último, la desnitrificación ocurre en zonas anaerobias a una temperatura entre 20° y 25°, pH entre 6.5 a 8.0 y presencia de carbono orgánico donde pasaran a ser gas nitrógeno N_2. (Merino *et al*, 2015) Teniendo esto claro, la remoción del NT en TA y TH se puede atribuir principalmente al proceso de nitrificación debido a las condiciones aerobias que presentaba el sistema y óptimos niveles de pH del medio y temperatura.

Remoción PT

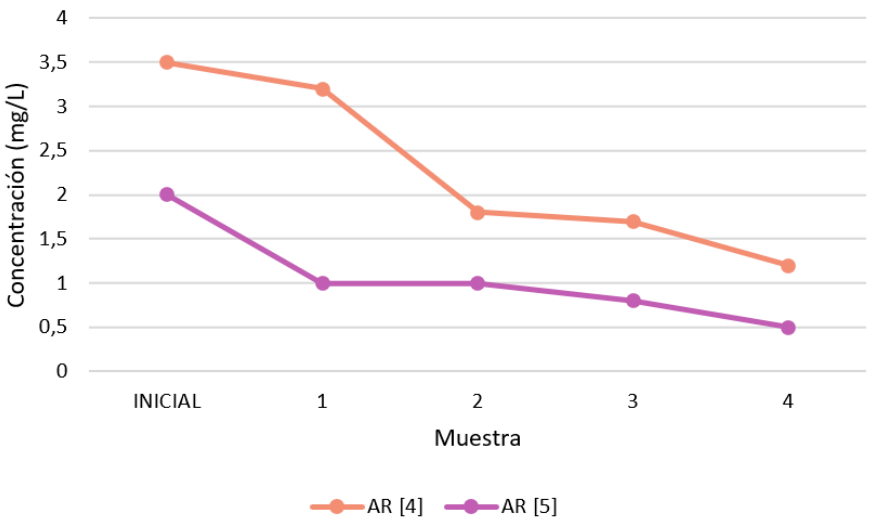
Las gráficas 9 – 12 evidencian el comportamiento que tuvo la remoción de PT para cada una de las muestras teniendo en cuenta la concentración inicial (CA y CB) y los dos tratamientos (*TH y TS*) En general se evidencia una tendencia de remoción en la concentración del PT en TH y TS con variaciones en las muestras

La gráfica 9 pertenece a CA del tratamiento TS, se evidencia una disminución para AR [1], [2] y [3] con un 13%, 15% y 44% de remoción en la primera semana de funcionamiento, resultando en 87%, 87% y 44% de remoción para la muestra final.



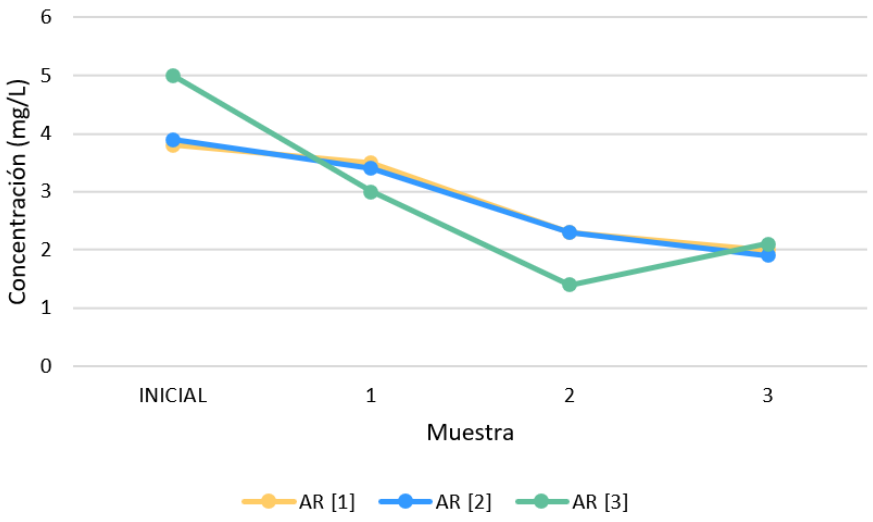
Gráfica 9. Remoción de Fosforo Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Strelitzia Reginae

La gráfica 10 pertenece a CB del mismo tratamiento, se evidencia una disminución para AR [4] y AR [5] con porcentajes de remoción de 9% y 50% en la primera semana de funcionamiento, resultando en 75% y 66% de remoción para la muestra final.



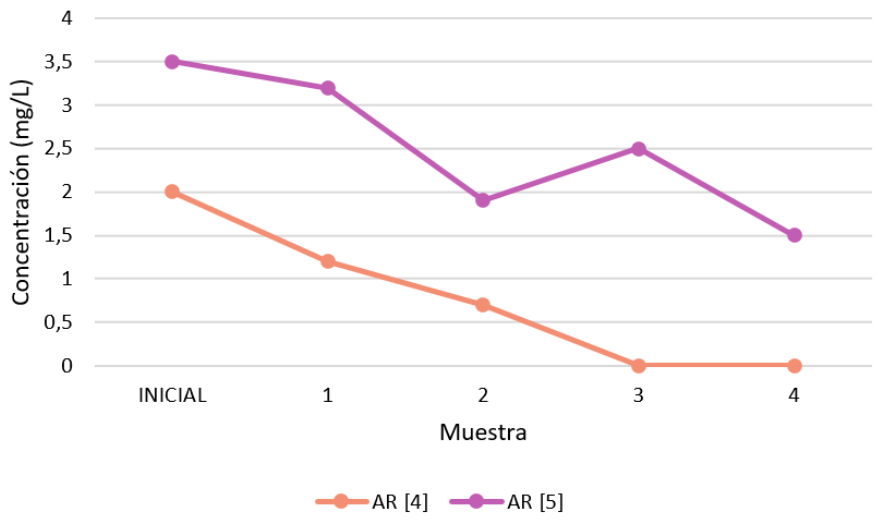
Gráfica 10. Remoción de Fosforo Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Strelitzia Reginae

La gráfica 11 pertenece a TH en CA, se evidencia una disminución en la concentración de PT para AR [1], AR [2] y AR [3] con porcentajes de remoción de 8%, 13% y 40% en la primera semana de funcionamiento, resultando en 47%, 51% y 58% de remoción para la muestra final.



Grafica 11. Remoción de Fosforo Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada alta para la Heliconia Psittacorum

Finalmente, la gráfica 12 representa la remoción en CB del mismo tratamiento, se evidencia una remoción del 86% y 40% de PT en la primera semana de funcionamiento y finaliza con una remoción de 100% y 57% para AR [4] y [5] respectivamente.



Grafica 12. Remoción de Fosforo Total correspondiente a concentraciones iniciales de temporada baja para la Heliconia Psittacorum

La eliminación de PT varía según las concentraciones iniciales (CA y CB) y los tratamientos (TH y TS). El tratamiento CA con TH mostró los porcentajes de eliminación más bajos de remoción para PT esto puede sugerir una absorción limitada por parte de las plantas en comparación con TS donde la eliminación fue mayor. El fosforo es un nutriente fundamental para el desarrollo de las plantas y es absorbido por las mismas como ion ortofosfato (H_2PO_4) y como ion fosfato (HPO4=). Sin embargo, la disponibilidad de estos iones está determinada por el pH del medio: en suelos alcalinos y ácidos el fosforo es insoluble y no es asimilable por las plantas, los niveles de disponibilidad óptimos de fosforo se encuentra en un rango de 5,5 a 6,5. (Becerra, 2007). Así, se evidencia que la eficiencia de remoción de PT también puede verse afectada por parámetros como el pH en el sistema. Esto puede explicar las fluctuaciones en la remoción de PT para TH y TS especialmente evidenciados en las gráficas 9 y 12

Por otro lado, la eliminación de fosforo en humedales artificiales depende en gran medida de la adsorción química del sustrato, sin embargo, con el tiempo las zonas de adsorción en el sustrato pueden saturarse lo que reduce la eficacia. Lo que podría explicar por qué algunas muestras (especialmente en CB con TS) experimentaron una eliminación de fósforo más eficiente inicialmente, pero con rendimientos decrecientes a medida que se alcanzaba la saturación del medio. (Barcelo *et al*, 2019)

Continuando con el sustrato, Korkusuz *et al* (2004) citado en Aguilar *et al,* 2009 menciona en su estudio que la remoción del fosforo podría mejorarse si los sustratos fueran ricos en hierro o aluminio, esto debido a la atracción por la carga positiva de los óxidos y la carga negativa de los iones de fosfato. Lo que podría explicar las bajas eficiencias de remoción de PT para TH y TP. La grava utilizada como sustrato puede favorecer la remoción de fosforo, pero en menor medida que con sustratos ricos en Hierro o Aluminio como el tezontle implementado por Del Toro *et al*, 2019 y Aguilar *et al*, 2009; otra alternativa seria la mezcla de diferentes sustratos como lo evalúa Rivas, 2019.

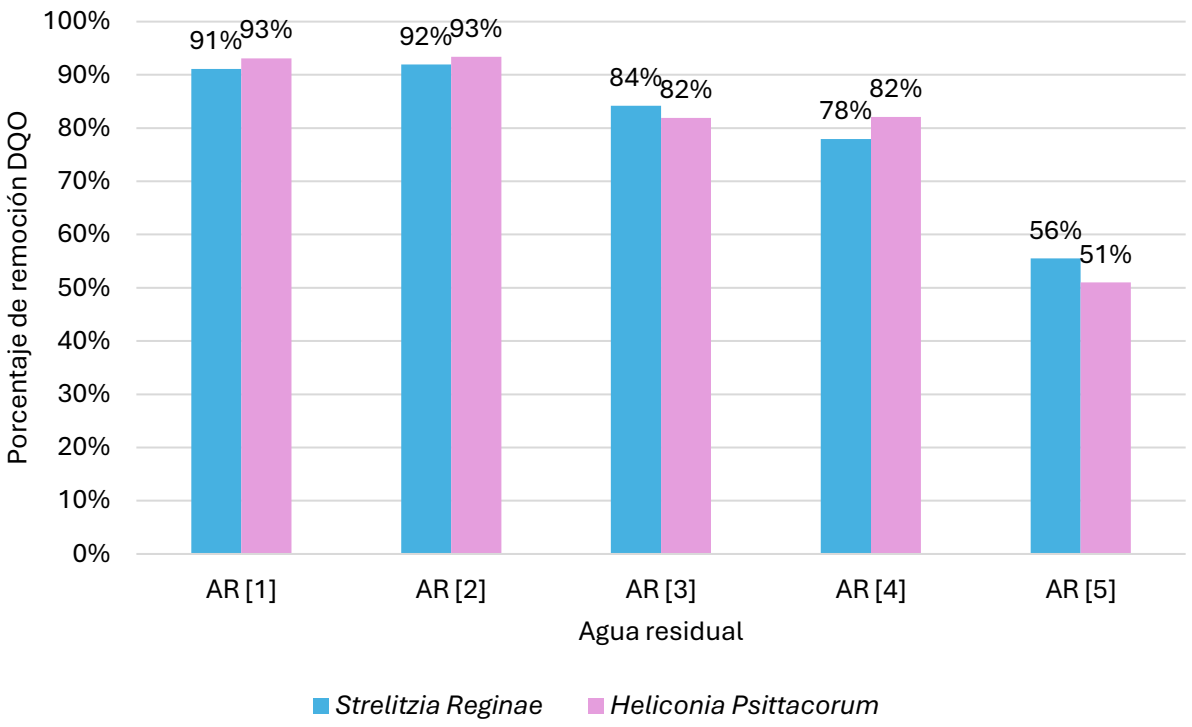
Porcentajes de remoción para DQO, NT y PT

Remoción de DQO

En las figuras 19-21 se muestran los porcentajes de remoción obtenidos para cada uno de los parámetros, considerando la concentración del agua residual (CA, CB), los dos tratamientos (TH, TS) y un TRH de 3 días.

La figura 19 presenta los porcentajes de remoción de la DQO alcanzados por TH y TS para cada concentración de agua residual. Este parámetro mostro niveles más altos de remoción con valores

máximos del 93% y 92% y mínimos del 51% y 56% para TH y TA respectivamente. En promedio, las dos especies alcanzaron niveles de remoción del 80% para DQO.



Grafica 13.Porcentajes de remoción para DQO obtenidos por cada tipo de agua residual en los dos tratamientos (Heliconia Psittacorum en rosado y Strelitzia Reginae en azul)

La reducción en los niveles de DQO en TH y TS puede atribuirse a los procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren en el humedal facilitando la degradación de la materia orgánica presente. Entre los procesos físicos se encuentran la filtración y sedimentación donde las raíces, tallos y sustrato actúan en conjunto con el flujo del agua para retener la materia orgánica y así posteriormente decantar (Nava *et al*, 2023). En este caso podemos atribuirle parte de la remoción de la materia orgánica al lecho filtrante debido al cambio en la turbidez del agua a la entrada y a la salida pasando por el tratamiento.

La turbidez es un parámetro que describe la claridad o transparencia del agua. Se refiere a las partículas en suspensión presentes como sedimentos, materia orgánica, microorganismos y otros solidos sedimentables que interfieren con el paso de la luz en el agua dándole un aspecto turbio u

opaco (Marcó *et al*, 2004). Aunque la turbiedad no es un indicador directo de la cantidad de materia orgánica si tiene relación directa con los sólidos en suspensión los cuales representan una gran porción de la materia orgánica en agua residual doméstica. (Quintero, 2021) Si bien la turbidez no se midió directamente en la investigación, si se pudo observar una diferencia de tonalidades en el influente y el afluente (Ilustración 6). Lo que sugiere que procesos físicos en el humedal contribuyeron a la retención de la materia orgánica. Quintero, 2021 reporta porcentajes de remoción de DQO mayormente atribuibles a estos procesos físicos de un 30%-40% en un humedal plantado con *Heliconia Psittacorum* con un TRH de 1 día.

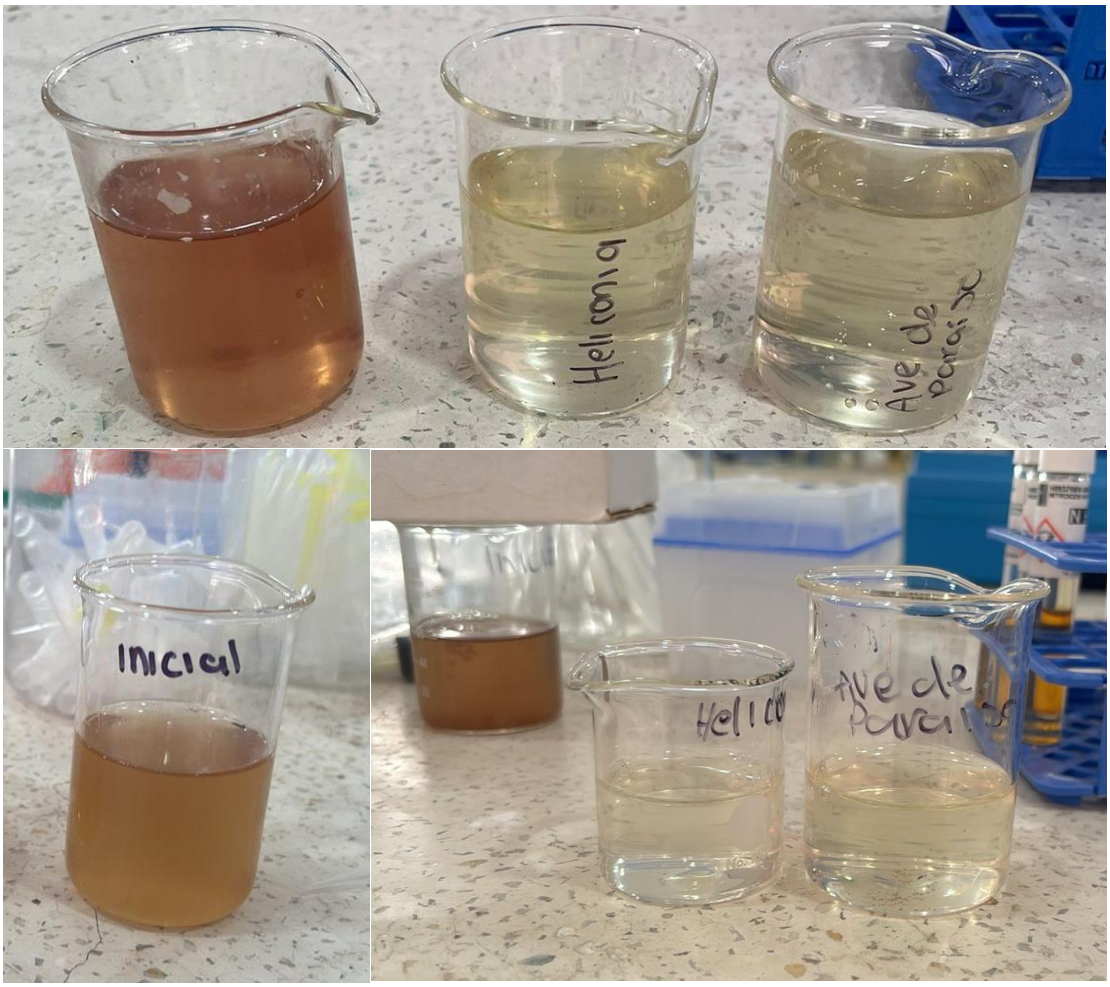


Ilustración 6. Evidencia del color en la alícuota de agua residual sintética inicial (izquierda) y las alícuotas de TH y TS respectivamente (derecha)

La vegetación ejerce un papel clave en la remoción de la DQO mediante procesos de fitodegradación donde las plantas captan, almacenan y degradan los compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos, componentes asimilables que pueda metabolizar los microorganismos, por otro lado, la fitoextracción, en la cual los contaminantes se concentran en las partes superiores como en las hojas. Estos procesos ocurren en simbiosis con microorganismos de la rizosfera, que ayudan a transformar y degradar de la materia orgánica facilitando su absorción por las plantas. (Arias et al, 20210). Estudios previos como los de Rodriguez & Vargas, 2019; Méndez et al, 20215 demostraron resultados similares en la remocion de la DQO, utilizando *Heliconia Psittacorum* como especie para el tratamiento de las aguas residuales con TRH de 1 y 2 dias, obteniendo remociones del 64% y 76% respectivamente. Igualmente, para *Strelitzia Reginae* se obtuvo una eficiencia de remoción similar respecto al resultado de Sandoval et al, 2023 de un 80% de remoción para el mismo parámetro con un TRH de 4 días

La disponibilidad de oxígeno también influye en la degradación de la materia orgánica. Las plantas suministran oxígeno a través de sus raíces donde bacterias aerobias descomponen la materia orgánica; en las zonas más profundas, en condiciones de anoxia, bacterias anaerobias completan la degradación. (Arias *et al*, 2010) Al ser el sistema mayormente aerobio la falta de oxígeno por parte de las plantas puede afectar los procesos de metabolización y remoción de la materia orgánica evidenciada en la disminución de la DQO. Lo que pudo ocurrir en el caso de AR [5] al obtener remociones de 56% y 51% para TS y TH.

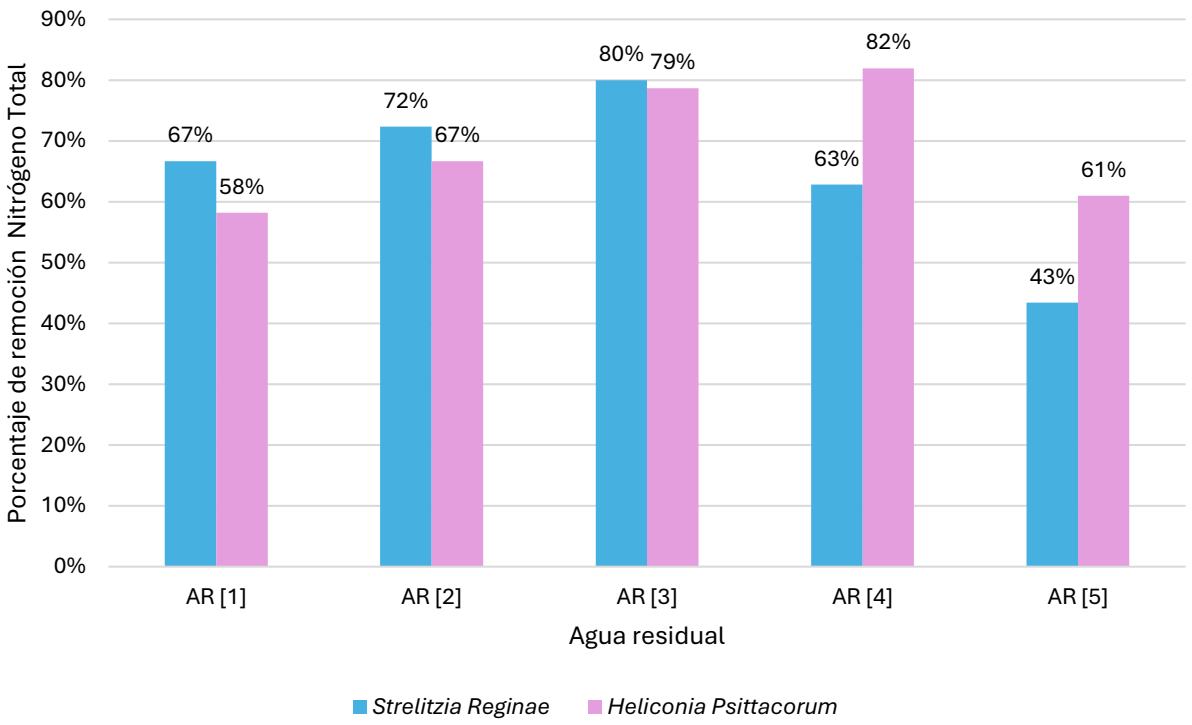
La eficiencia de remoción depende en gran medida del tiempo de retención, dado que la degradación de la materia orgánica es un proceso biológico impulsado por la actividad microbiana. Un tiempo de retención menor de 3 días no será suficiente para que los microorganismos completen los procesos metabólicos y degraden la materia orgánica de forma efectiva, tal como lo

afirman Bustos & Sanin, al comparar TRH de 2, 3 y 4 días y obtener mejores rendimientos a 3 y 4 días. (2022). Igualmente, Romero, 1999 sugiere TRH de 3-4 días para una remoción de materia orgánica eficiente

Otros estudios, como los de Montoya *et al*, 2010 y Carvajal & Vega Beltran, 2017 obtuvieron mayores porcentajes de remoción para este parámetro utilizando *Heliconia Psittacorum* a un tiempo de retención de 7 y 5 días con eficiencias de remoción de 97% y 94% respectivamente, estas diferencias se sustentan en el aumento del tiempo de retención y mejoras en los porcentajes de remoción.

Remoción de NT

La figura 6 presenta los porcentajes de remoción del Nitrógeno Total alcanzados por ambos tratamientos para cada alícuota de agua residual. Este parámetro alcanzo valores máximos de remoción de 82% y 80% y mínimos de 58% y 43%, para TH y el TS respectivamente. En promedio, se obtuvo un porcentaje de remoción de NT del 65% para TS y de 68% para TH



Grafica 14. Porcentajes de remoción para Nitrógeno Total obtenidos por cada tipo de agua residual en los dos tratamientos (Heliconia Psittacorum y Strelitzia Reginae)

La remoción del nitrógeno en los sistemas de humedal artificial incluye procesos como la absorción de nitrógeno por parte de las plantas y microorganismos, la nitrificación, desnitrificación, la volatilización del amonio y el intercambio iónico entre el amonio y el medio. (Rosero, sf) La mayor parte del nitrógeno presente en las aguas residuales se encuentra de forma amoniacal y orgánica, estos compuestos nitrogenados son nutrientes importantes para el desarrollo de los seres vivos y podrán ser eliminados del agua mediante la asimilación por parte de estos. (Pidre *et al*, 2007) La vegetación realiza procesos de fitoabsorcion que permite asimilar los nitratos y el nitrógeno amoniacal a través de las raíces e incorporarlo a sus tejidos; la fitoestabilización por el cual se estabiliza el nitrógeno, reduciendo su movilidad y disponibilidad para evitar el paso a las capas más profundas o la superficie y la fitoestimulacion, que promueve la actividad de bacterias nitrificantes o desnitrificantes. (Arias, 2010). Como afirma Pidre et al, las plantas presentes en humedales construidos remueven tan solo el 15% – 20% de nitrógeno amoniacal por

asimilación, por lo tanto, la mayor parte de la remoción del nitrógeno se debe a los procesos nitrificantes y desnitrificantes llevado a cabo por actividad microbiana presente en la zona radicular (2007).

Un factor condicionante para que estos procesos se lleven a cabo es la presencia zonas aerobias y anaerobias en el sistema. El oxígeno en los humedales proviene principalmente de la reoxigenacion atmosférica y la perdida de oxígeno radicular (ROL) por sus siglas en ingles. Esta última es la principal entrada de oxígeno para los humedales subsuperficiales, las plantas transportan el oxígeno hacia las raíces obtenido de la fotosíntesis favoreciendo el establecimiento de los microorganismos en el sistema radicular. (Wang *et al*, 2018)

Con lo anterior, en la zona aerobia del sistema los microrganismos de este tipo realizaran el proceso de nitrificación donde el nitrógeno en forma orgánica o amoniacal se oxida a nitratos por las bacterias amonio-oxidantes y nitrito-oxidantes. (Arteaga, 2019).

La remoción de NT para TS y TH se asocia entonces a la absorción de N_{org} y amoniacal por las plantas y microorganismos igualmente en forma de nitratos. (Quintero, 2021)

En investigaciones previas, Merino et al, 2015 reporta eficiencias de remoción de nitrógeno total del 30-33% usando *Strelitzia Reginae* con tiempos de retención entre 18 y 38 horas, mientras que Méndez *et al*, 2015 alcanza una eficiencia del 48% con *Heliconia Psittacorum* y un TRH de un día. Por otro lado, estudios como los de Sohsalam et al, 2007 reportaron remociones superiores (83-90%) para *Heliconia Psittacorum* en humedales de flujo superficial con un TRH de 5 y 3 días, y Martínez *et al.* 2018, observaron eficiencias comparables a las nuestras (60-64%).

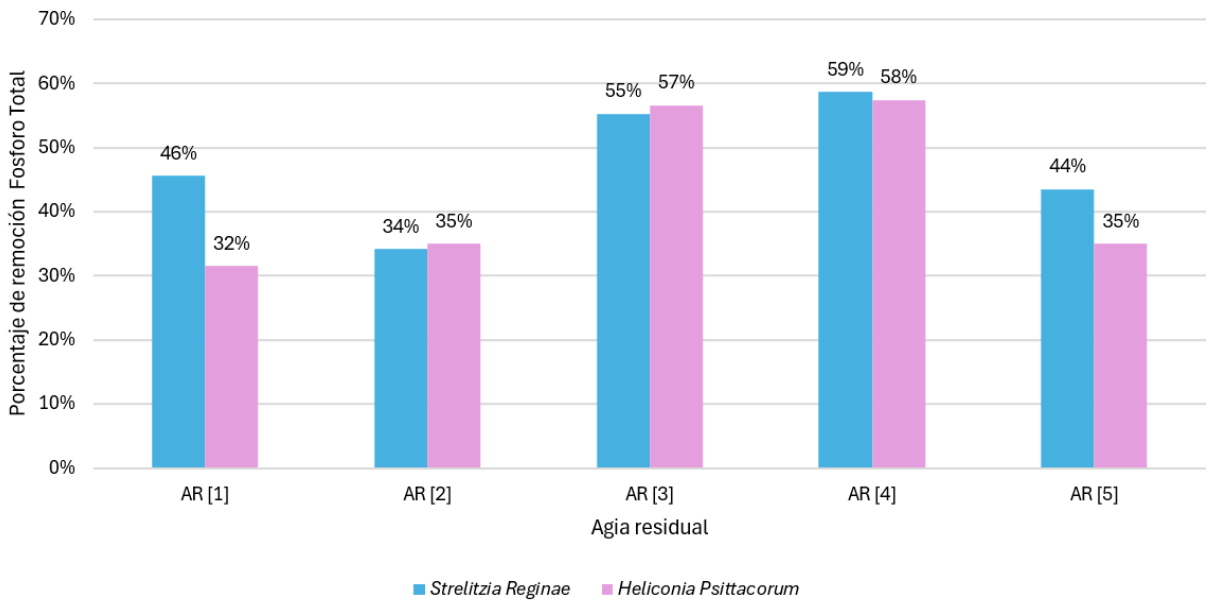
Las variaciones en los porcentajes de remoción se atribuyen a los TRH seleccionados por cada uno de los autores, pues tiempos más largos (6 – 10 días) permiten una mayor actividad microbiana, mejorando la transformación y asimilación de nitrógeno (Sohsalam *et al*., 2007; Romero, 1999).

Esto puede explicar las bajas eficiencias obtenidas por parte de TH y TS de 65% y 68% respectivamente al implementar TRH de 3 días en comparación con los expuestos por los estudios con mayores TRH. Al incrementar el TRH aumenta el tiempo disponible para que los microorganismos puedan realizar de manera eficiente la metabolización y asimilación del nitrógeno.

Otras condiciones como el clima también pueden influir en la remoción del nitrógeno debido a la adaptación por parte de las plantas. Varios estudios realizados en zonas de clima reportaron mayor remoción de nutrientes que en países de clima templado (González, 2015; Stefanakis, 2022) Este factor también influyó en las remociones de NT por TH y TS teniendo en cuenta el clima tropical que presenta Girardot, manteniendo una humedad relativa que supera el 70%

Remoción de PT

La figura 7 presenta los porcentajes de remoción del PT alcanzados por ambos tratamientos para cada alícuota de agua residual. Este parámetro alcanzó valores máximos de remoción de 59% y 58% y mínimos de 34% y 32% para el TS y TH respectivamente. Este parámetro evidenció los porcentajes más bajos de remoción frente a los demás. En promedio, se obtuvo un porcentaje de remoción del PT del 47% para TS y de 43% para TH.



Grafica 15. Porcentajes de remoción para Fosforo Total obtenidos por cada tipo de agua residual en los dos tratamientos (Heliconia Psittacorum y Strelitzia Reginae)

El fósforo es eliminado principalmente por procesos físicos de sedimentación, filtración y adsorción al sustrato, adicionalmente puede ser asimilado por las plantas mediante la fitoabsorcion en forma de iones fosfato (ortofosfato) para emplearlo en sus funciones metabólicas, estos iones son igualmente asimilados por los microorganismos. Según Pidre *et al*, 2007 la absorción de fosforo por parte de la vegetación es de un 10% y por los microorganismos de un 10% a un 20%.

Los resultados obtenidos en la presente investigación son similares a estudios previos como Zurita, 2009 y Merino *et al*, 2015 quienes reportaron un porcentaje de remoción del 50% en un humedal de flujo vertical con un sustrato de tezontle mediante la *Strelitzia reginae*; y un 24% a 44% de remoción a un TRH de 4 días con la misma especie. Estos resultados se alinean con los Prochska *et al*, 2007 quienes obtuvieron rangos de remoción entre el 39% y 64% difiriendo en las condiciones de tipo de humedal, especie y el sustrato seleccionado.

En contraste, los resultados de Rivas, 2019 superan en gran medida los promedios obtenidos en otros estudios y la presente investigación. Utilizando la especie *Heliconia psittacorum*, en un

humedal horizontal de flujo subsuperficial e implementando diferentes tipos de sustrato como grava, arena y bambú se lograron porcentajes de remoción entre 73% y 82%. Esta mejora en la eficiencia de remoción se atribuye en gran medida a la implementación de diferentes tipos de sustrato en el sistema. Como lo expresa Wang *et al*, a pesar de que las plantas contribuyen a la remoción de contaminantes, la eficiencia en la eliminación de fósforo a través de la absorción directa por las plantas alcanza menos del 5% y el 10%. Por lo tanto, el sustrato juega un papel crucial en la eficacia global del sistema para la remoción de fósforo. (2018).

Eficiencia de remoción de los humedales para el agua residual domestica del Campus de la Universidad de Cundinamarca- Seccional Girardot

La tabla 7 representa las concentraciones finales del ARD respecto a la DQO, NT y PT y su porcentaje de remoción con respecto al TH y el TS, estos se representan de la siguiente manera: en un resultado mínimo (la concentración con más baja remoción), un resultado promedio (la concentración promediada con todos los datos de remoción) y, por último, un resultado máximo como (la concentración con remoción más alta).

Caracterización Inicial		**Tratamiento 1**			**Tratamiento 2**			**631-2015 (mg/L)**
		Heliconia psittacorum			***Strelitzia reginae***			
Parámetro	**Resultado (mg/L)**	**Resultado Mínimo (mg/L)**	**Resultado promedio (mg/L)**	**Resultado Máximo (mg/L)**	**Resultado Mínimo (mg/L)**	**Resultado promedio (mg/L)**	**Resultado Máximo (mg/L)**	
DQO	699	342,51	137,65	48,93	307,56	138,80	55,92	180
Nitrógeno Total	218	93,74	69,76	39,24	124,26	76,18	43,60	
Fosforo Total	3,1	2,108	1,77	1,30	2,046	1,64	1,27	

Tabla 7. Concentrciones teoricas finales para el agua residual de la Universidad de Cundinamarca, seccional Girardot en los dos tratamientos (Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae)

Para la DQO estos niveles de concentración se relacionaron con la resolución 0631 del 2015 con el fin de compararlos con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales

de ARD. En dicha resolución se establece que la DQO tiene un máximo permisible de 180 mg/L; respecto al T1 y sus porcentajes de remoción, se observa que el resultado mínimo corresponde al 342,51mg/L, sin embargo, pese a que obtuvo un alto porcentaje de remoción sobrepasa la concentración máxima permisible de la resolución mencionada. Con similitud para el TS, ya que el resultado mínimo obtuvo una carga de 307,56mg/L. Lo que indica que bajo ciertas condiciones el tratamiento con TH y TS no es suficiente para cumplir con los estándares de la normativa.

Para evaluar los resultados obtenidos por NT y el PT se comparó con la Directiva 91/271/CEE (MITECO, 1996), la cual está encargada de regular el tratamiento de aguas residuales en los países de la Unión Europea. En esta se establecen medidas necesarias para garantizar que las aguas residuales urbanas cumplan con concentraciones adecuadas antes de su vertido. Ver tabla 8

Parametros	Concentración		Porcentaje mínimo de reducción
	10.000 a 100.000 h-e	**>100.000 h-e**	
Fósforo total	2 mg/L P	1 mg/L P	80%
Nitrógeno total	15 mg/L N	10 mg/L N	70-80%

**h-e habitante equivalente*

Tabla 8.Requisitos para los vertidos de aguas residuales urbanas para NT y PT, por directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas

De acuerdo con el censo poblacional, en Girardot hay 92.903 habitantes (DANE 2018), por lo que se hace la comparación con los valores establecidos entre 10,000 a 100.000 h-e por la Directiva 91/271/CEE. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de NT en el TH y TS se encuentran muy por encima del límite de 15 mg/L. Esto indica que, aunque el tratamiento reduce notablemente la concentración inicial de nitrógeno de 218 mg/L, no es suficiente para cumplir con los estándares europeos dé remoción. En cuanto al PT se puede afirmar que los valores promedios y máximos de fósforo después del tratamiento se encuentran dentro de los límites permisibles dentro de la

directiva. En lo que se puede apreciar una remoción eficiente en el fosforo total para las dos especies.

Determinación de DBO

A continuación, en la tabla 9 se dictan los valores de la DBO basados en los resultados de la DQO de la caracterización inicial y remoción del TH Y TS. A partir de esta, estipular el grado de biodegradabilidad de las aguas, y la cantidad de oxígeno para estabilizar biológicamente la materia orgánica de la misma. (Romero 1999). Para determinar el desempeño se dispone la comparación con la resolución 631 de 2015.

Caracterización Inicial		**Tratamiento 1**			**Tratamiento 2**			**631-2015 (mg/L)**
		Heliconia psittacorum			***Strelitzia reginae***			
Parámetro	**Resultado (mg/L)**	**Resultado Mínimo (mg/L)**	**Resultado promedio (mg/L)**	**Resultado Máximo (mg/L)**	**Resultado Mínimo (mg/L)**	**Resultado promedio (mg/L)**	**Resultado Máximo (mg/L)**	
DQO	699,00	342,51	137,65	48,93	307,56	138,80	55,92	180
DBO	582,50	285,43	114,70	40,78	256,30	115,67	46,60	90

Tabla 9. Determinación de la DBO basado en la DQO obtenida en la caracterización y la remoción

De acuerdo con Rozano y Dapena (s.f) “en un agua residual urbana, el 80% de la DQO lo produce la materia orgánica degradable, y el 20% restante los inertes” lo que indica que el mayor porcentaje está compuesto por sustancias que pueden ser descompuestas por microorganismos. En el caso de la presente investigación se dispone la relación DBO/DQO la cual permite evaluar la biodegradabilidad de la materia orgánica presente en el agua e indica que entre más acerca a 1 más biodegradable se encuentra. (Raffo y Ruiz, 2014)

Teniendo en cuenta lo anterior, la relación DBO/DQO para nuestro tratamiento dio un resultado de 0.6 lo que indica que el ARD del campus universitario es altamente biodegradable.

Para el análisis normativo se tiene que en la Resolución 0631-2015 el límite permisible para DBO es de 90mg/L, teniendo en cuenta lo anterior, para el TH se observa una reducción considerable, en los tres resultados de remoción, sin embargo, solo el correspondiente al promedio máximo de 40,78mg/L alcanza la remoción ideal para considerarse óptimo. Con similitud el TS presenta remociones considerables, no obstante, el resultado de remoción máxima es la óptima ante la resolución,

Características vegetales

En el sistema se evidencia un crecimiento tanto en altura como en densidad por parte de las plantas (ver ilustración 8). Al iniciar la operación del sistema las especies median de 70cm-80cm, la medición final 6 meses después fue de 1.00cm -1.60cm obteniendo un aumento de 30-60cm. El óptimo desarrollo de las planas se evidenció principalmente por el crecimiento significativo del tamaño y verdor de sus hojas, siendo un indicador de salud y vigor. A medida del avance de la investigación las hojas adquirieron una coloración más intensa, lo que sugiere un aumento en la capacidad fotosintética de las plantas. El verdor refleja un adecuado suministro de nutrientes y recepción de luz solar lo que permite un desarrollo optimo de pigmentos como la clorofila (Manrique. 2003). Otras características evidentes son el aumento en la cantidad de hojas y el crecimiento en el tamaño de estas siendo un signo de producción de nuevo tejido vegetal, dando cuenta igualmente de gran disponibilidad de nutrientes en el medio para que puedan ser absorbidos, así como de agua y luz solar. (Schlegel,1994).

Zurita et al, 2009 reporto igualmente un incremento en la floración y crecimiento de las hojas en la implementación de la *Strelitzia reginae* en humedales de flujo subsuperficial. De igual manera,

Rivas, 2019 y Lopez, 2022 evidenciaron un óptimo crecimiento para la *Heliconia psitaccorum* plantas en humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Ilustración 7. Estado del Humedal construido en el momento de instalado (imagen de la izquierda) y 6 meses después realizado el tratamiento de las aguas (imagen de la derecha)

Análisis estadístico de los datos y confirmación de hipótesis experimental

Tomando en cuenta el diseño experimental planteado para determinar la relación de las tres variables en el rendimiento de los humedales, se procede a definir la hipótesis para cada caso. En la tabla 10 se muestran las significancias estadísticas para cada variable.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Plant)	0.000736	1.0	0.012475	0.911304
C(Parameter)	1.232429	2.0	10.449791	0.000079
C(Concentration)	0.042894	1.0	0.727395	0.395874
C(Plant):C(Parameter)	0.078454	2.0	0.665212	0.516543

**Calculado con 0,05 para un intervalo de confianza de 95%*

Tabla 10. Resultados de significancia estadística

Los resultados del ANOVA muestran que la eficiencia de remoción de contaminantes depende significativamente ($p < 0.05$) del parámetro evaluado (DQO, NT y PT), sin embargo no hay suficiente evidencia estadística para rechazar las hipótesis nulas H_{O1}, H_{O3} y H_{O4} evidenciando que, no se encontraron efectos significativos respecto a los porcentajes de remoción frente al tipo de especie de planta utilizada ($p = 0.9113$), ni la variación en la concentración inicial ($p = 0.3959$), ni la interacción entre la especie de planta y el tipo de parámetro ($p = 0.5165$). Esto indica que la variable especie (*Helicnia psittacorum* y *Strelitzia reginae*) y la variación de las concentraciones iniciales (CA y CB) no repercuten de manera determinante en el rendimiento de los humedales.

El rendimiento de los humedales artificiales depende de la combinación de diferentes variables para lograr resultados significativos como la selección de la especie de planta dependiendo del entorno, su adaptación y desarrollo, el sustrato, la calidad del agua a tratar, las dimensiones, el tiempo de retención hidráulica y demás que influirán de manera considerable en la efectividad del sistema (Acevedo, 2019; Rodriguez, 2019) Dicho esto se debe evaluar el grado de incidencia que tiene cada variable en cada uno de los mecanismos de depuración y la relación entre cada una de ellas para aumentar la efectividad del tratamiento (Delgadillo, 2010 citado en Rodríguez, 2019)

Estudios como el de Zurita *et al*, 2006 y Zurita, 2009 igualmente evidenciaron que no existe diferencia significativa para la remoción de contaminantes (DQO, NT y PT) por parte de las especies ornamentales seleccionadas, entre esas *Srelitzia reginae.*

Conclusiones

La implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales ha sido objeto de amplio estudio evaluando diferentes tipos de flujo, especies de plantas, sustratos,

condiciones de funcionamiento como TRH, concentraciones iniciales y demás mecanismos de depuración. Estos sistemas han mostrado ser una alternativa eficiente y sostenible en la remoción de contaminantes adaptadas a las condiciones locales de implementación.

Los resultados de la investigación demuestran la efectividad de las especies seleccionadas, *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* en la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas. A pesar de no obtener diferencias significativas en la eficiencia entre ambos tratamientos se lograron altos porcentajes de remoción para los tres parámetros evaluados; DQO, NT y PT. Especialmente en la DQO se obtuvo una reducción del 80% en promedio para ambas especies. Esto debido principalmente a los procesos físicos de filtración y sedimentación realizados por el medio filtrante (grava y raíces de las plantas), las plantas contribuyeron mediante la fitodegradacion y fitoextraccion al captar la materia orgánica y generar subproductos asimilables para los microorganismos en la rizosfera

La actividad microbiana en la zona radicular favoreció la degradación de los compuestos orgánicos en condiciones aerobias, beneficiado por el TRH de 3 días que proporciono un periodo adecuado para culminar con los procesos metabólicos evidenciado en los altos porcentajes de remoción de DQO.

Se obtuvieron porcentajes de remoción de Nitrógeno Total dentro del rango de otras investigaciones logrando eficiencias del 68% y 65% *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* respectivamente. Estas remociones se atribuyen principalmente al proceso de nitrificación llevado a cabo por bacterias nitrificantes que en condiciones aerobias transforman el amonio a nitratos compuestos asimilables por las plantas. De igual manera, los procesos de fitoextracción y fitoasimilacion del nitrógeno orgánico y amoniacal por parte de las plantas y en simbiosis con los microorganismos contribuyeron en los porcentajes de remoción de NT.

Parámetros como el pH, la temperatura y disponibilidad de oxígeno fueron clave igualmente para el desarrollo de las bacterias nitrificantes; el cambio de estos parámetros resulta en una variación en las remociones de NT durante el tiempo de evaluación y pudo haber interferido en la obtención de mayores porcentajes de remoción. Finalmente, el TRH de 3 días fue esencial para la realización de los procesos bioquímicos de transformación y asimilación del nitrógeno de manera eficiente.

La remoción de fosforo total se debió principalmente a los procesos de adsorción en el sustrato y en menor medida por la fitoabsorcion realizada por las plantas del ion ortofosfato obteniendo valores finales de remoción de 47% y 43% para la *Strelitzia reginae* y *Heliconia psittacorum* respectivamente. Aunque la actividad microbiana juega un papel menor en comparación con el nitrógeno también contribuye a la transformación y disponibilidad de fósforo en el sistema.

Finalmente se logró determinar los parámetros de funcionamiento del humedal subsuperficial para TH y TS de la siguiente manera: Se determinó un tiempo de retención de 3 días, adecuado para la remoción de materia orgánica y nutrientes; partiendo de las dimensiones de los recipientes usados y el TRH de 3 días necesario para la remoción de materia orgánica y nutrientes el caudal del sistema se fijó en 0,123ml/s para mantener un flujo constante; el sustrato fue seleccionado por criterio de construcción para humedales artificiales eligiendo grava de 8mm la cual brindo una adhesión microbiana y actuó como receptor para la adsorción y filtración de los contaminantes. En conjunto con las especies ornamentales *Heliconia psittacorum y Strelitzia reginae* las cuales demostraron una capacidad Fito remediadora confirmando su idoneidad para el tratamiento de aguas residuales.

La determinación de los porcentajes de remoción en función de las concentraciones iniciales provenientes de la caracterización inicial de las aguas residuales de la universidad de Cundinamarca confirmaron la funcionalidad del sistema de tratamiento al cumplir con los valores

máximos permisibles decretados por la norma colombiana de vertimientos al mantenerse dentro de los rangos para DQO y DBO si se mantiene en condiciones de operación para los porcentajes de remoción promedio (80%) y máximo (93%) para la DQO y máximos para DBO. Igualmente, los valores de PT se encuentran dentro de los valores máximos establecidos por la norma europea respecto a porcentajes promedios y máximos por parte de ambos tratamientos. Sin embargo, los valores del NT no se encuentran dentro de los valores máximos para la misma norma evidenciando la necesidad de implementar mejoras para lograr mejores eficiencias para este parámetro.

Se considera de suma importancia tomar en cuenta factores ambientales que puedan provocar variaciones en cuanto al funcionamiento del sistema. Como la temperatura, la humedad, las precipitaciones, la evaporación y evapotranspiración ya que pueden generar cambios en el volumen de los humedales y en el desarrollo de las plantas y microorganismos reflejados en ineficiencias y cambios en los porcentajes de remoción a través de los tratamientos.

Con base a los resultados obtenidos la implementación de un sistema no convencional para el tratamiento de aguas residuales domesticas aporta de manera significativa a la gestión ambiental de la Universidad de Cundinamarca seccional Girardot respondiendo a las problemáticas ambientales identificadas en el diagnóstico del SGA relacionado con los vertimientos generados, promoviendo la distinción en ser una universidad verde y ofreciendo un modelo replicable para otras instituciones de la región, finalmente aportando en la disminución de la carga contaminante que llega al Rio Bogotá, cuerpo hídrico critico en la zona.

Recomendaciones

Los humedales artificiales resultan eficientes para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, son sistemas complejos, en los que intervienen variables claves para lograr mejores eficiencias.

Una de esas es el TRH. Se recomienda para próximas investigaciones realizar evaluaciones a diferentes TRH ya que estudios como los de Sohsalam *et al*, 2007; Bustos & Sanin, 2022; Rodriguez & Vargas, 2019; Méndez et al, 20215 muestran mejores eficiencias en diferentes tiempos y encuentran diferencias significativas en la variación del TRH frente al desempeño de remoción de los parámetros evaluados. Así mismo realizar variaciones del tipo de sustrato o integrar más de dos tipos como lo realizó Rivas, 2019 y evidenciar si existe un aumento en la remoción de los parámetros. De igual manera se recomienda realizar las mediciones de variables que puedan influir en la eficiencia de remoción de los parámetros evaluados, como lo son la temperatura del medio, el pH, la turbidez y tomar en cuenta otros parámetros que puedan ampliar y demostrar las eficiencias remediadoras que tienen los humedales como lo son sólidos totales (SST), demanda biológica de oxígeno (DBO), nitritos, nitratos y coliformes fecales. Por último, se recomienda realizar replicas desde el inicio del montaje con diferentes humedales que posean los mismos tratamientos, esto para poder confirmar los resultados y evidenciar que variables externas a las manipuladas pueden influir en el desempeño del sistema.

Finalmente se recomienda considerar la implementación de este sistema no convencional a mayor escala, así lograr tratar mayores volúmenes de agua residual doméstica y reducir aún más los niveles de carga contaminante generados y lograr reutilizar el agua tratada en las actividades de riego en la institución. Así mismo la creación de un sistema de monitoreo de calidad del recurso con el fin de asegurar que el tratamiento y los vertimientos estén dentro de la normatividad de vertimientos, por último, la implementación de actividades de educación ambiental con la comunidad universitaria que fomente tanto el cuidado del recurso hídrico como los procesos de investigación en esta área.

Bibliografía

Albortante, J., & García Martínez, M. (2019). Remoción de fósforo mediante un humedal subsuperficial de flujo horizontal. Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

Alcaldía de Girardot. (s.f.). Información del municipio. Recuperado de https://www.girardot-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx

Arellano, J., & Guzmán, J. (2011). Ingeniería ambiental. Alfaomega. ISBN: 978-607-707-233-1.

Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., & Hernández Ángel, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Recuperado de Dialnet.

Arteaga, V. M., Quevedo, A., & Valle, D. H. (2019). Estado del arte: Una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. Tecnología y Ciencias del Agua, 10(5), 319–343. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12

Barceló Quintal, I. D., Osornio Berthet, L. J., González González, J. T., Solís Correa, H. E., & García Espinosa, C. (2014). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30,000 habitantes. Recuperado de https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/114/Espinosa%20Ortiz,%20Camilo%20Eduardo%20-%202014.pdf

BBVA. (2024). La contaminación del agua: Qué es y cuáles son sus consecuencias. Recuperado de https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/la-contaminacion-del-agua-descubre-las-causas-y-consecuencias/

Becerra-Sanabria, L. A., Navia-de Mosquera, S. L., & Ñústez-López, C. E. (2007). Efecto de niveles de fósforo y potasio sobre el rendimiento del cultivar ‘Criolla Guaneña’ en el departamento de Nariño. Revista Latinoamericana de la Papa, 14(1), 51–60.

Bustos Yaima, S. G., & Sanín González, C. D. (2022). Prototipo de humedal artificial como sistema complementario a una PTAR. Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Ambiental, Bogotá, Colombia.

Carvajal Arias, C. E., Ortiz, P., & Vega Beltran, A. L. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando *Bambusa sp.* en la finca El Recreo ubicada en Tauramena, Casanare. *Revista de Tecnología*, 16(1), 65-76.

Caballero, J., & Osorio, R. (2016). Tratamiento de aguas residuales usando Rhizophora mangle para la remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal artificial de flujo vertical (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia. Recuperado de http://repositorio.unicartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/11227/3723/1/Tesis%20Humedal.pdf

Consejo de Estado de Colombia. (2014). Sentencia C-632. Recuperado de https://siriobogota.car.gov.co/assets/sentencia_rio_bogota.pdf

Chavarro, C. (2021). Diseño de humedales artificiales [Tesis para magíster, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Recuperado de https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1378/G%C3%B3mez%20Chavarro,%20Camilo%20Iv%C3%A1n-2021.pdf

Decreto 1076 de 2015. (2015). Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector

Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.

Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. ISBN: 978-99954-766-2-5.

Del Toro, A., Tejeda, A., & Zurita, F. (2019). Addition of corn cob in the free drainage zone of partially saturated vertical wetlands planted with I. sibirica for total nitrogen removal—A pilot-scale study. Water, 11(10), 2151. https://doi.org/10.3390/w11102151

Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (s. f.). *Aguas residuales: Composición*.

Espinosa Ortiz, C. E. (2014). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes [Tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Ingeniería]. https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/114/Espinosa%20Ortiz,%20Camilo%20Eduardo%20-%202014.pdf

EPA. (1995). Manual de humedales construidos: General considerations. U.S. Government Printing Office. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/40001CXS.txt?ZyActionD=ZyDocument

González, D. (2015). Remoción de contaminantes en humedales construidos de flujo vertical sembrados con Heliconia Psittacorum y alimentados con diferentes frecuencias [Tesis de pregrado, Universidad Nacional].

Gutiérrez-Mosquera, H., & Peña-Varón, M. R. (2011). Eliminación de nitrógeno en un humedal construido subsuperficial, plantado con Heliconia psíttacorum. Tecnología y Ciencias del Agua, 2(3), 49–60.

ICA. (2012). El cultivo de heliconias: Medidas para la temporada invernal. Instituto Colombiano Agropecuario. https://www.ica.gov.co

IDEAM. (2022) Estudio Nacional del Agua. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf

IDEAM. (2007). Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. http://www.ideam.gov.co

IDECA. (2023). Cobertura vegetal en humedales de Bogotá. https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/cobertura-vegetal-en-humedales-de-bogota

La República. (2018). Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. La República. https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-48-2-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155

López Alba, J. E., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., & Celis Pérez, M. del C. (2022). Evaluación del crecimiento de plantas sembradas en humedal artificial: Efecto del posicionamiento de sembrado. Journal of Basic Sciences, 8(23), 104–111. http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs

Manrique Reol, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. Ecosistemas, 12(1), 1–11.

Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. C. (2004). La turbidez como indicador básico de

calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Higiene y Sanidad Ambiental, 4, 72–82.

Martínez, S. A., & Betancour, F. M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Informador Técnico (Colombia, 74).

Martínez, N. B., Tejeda, A., Del Toro, A., Sánchez, M. P., & Zurita, F. (2018). Nitrogen removal in pilot-scale partially saturated vertical wetlands with and without an internal source of carbon. *Science of the Total Environment*. Environmental Quality Laboratory, Centro Universitario de la Ciénega, University of Guadalajara, Jalisco, México.

Merino-Solís, M. L., Villegas, E., De Anda, J., & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: An anaerobic filter with a constructed wetland. *Water*, *7*(3), 1149-1163. https://doi.org/10.3390/w7031149

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2022). *Informe Nacional de Monitoreo a los Recursos del SGP-APSB – Vigencia 2022*. Bogotá, Colombia: https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2023-07/informe-monitoreo-nacional-vigencia-2022-v4-20230720-final.pdf.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2010). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J. Recuperado de: https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_j_vf.pdf

Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (2010). Evaluación de sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales de Colombia. Revista EIA, (14), 75-84. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia.

Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2016). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales.

Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial: Una revisión. *Terra Latinoamericana*, *41*, e1715. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). Arranca oficialmente la Década del Agua para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. https://www.un.org/es/desa/water-action-decade

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Organización Mundial de la Salud. (2023). Agua para consumo humano. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water

Pidre, J., Salas, J., & Sánchez, L. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales: Humedales Artificiales.

Prochaska, C. A., Zouboulis, A. I., & Eskridge, K. M. (2007). Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. Department of Chemistry, Division of Chemical Technology, Aristotle University of Thessaloniki, Greece; Department of Statistics, University of Nebraska, USA.

Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2009). Hechos y cifras, el 3er informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: el agua en un mundo en constante cambio. UNESDOC.

Quintero García, K. L. (2021). Implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial

para la remoción de nitrógeno y materia orgánica, acoplados a reactores con microalgas. Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería. https://doi.org/10.26507/ponencia.1613

Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Datos Industriales, 17(1), 71-80.

Ramírez-Guerrero, L., García-Villanueva, E., Navarrete-Valencia, A. L., García-Osorio, C., & Arévalo-Galarza, L. (2017). Ave del Paraíso (Strelitzia reginae Ait.): Aspectos fundamentales para su producción comercial.

Resolución 1256 de 2021. (2021). Por la cual se establecen los criterios para la planificación del uso de aguas residuales tratadas y la protección de los recursos naturales. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.

Resolución 1433 de 2004. (2004). Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.

Resolución 631 de 2015. (2015). Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado público. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.

Rincón Medina, J. A., & Millán Ballén, N. F. (2013). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Libre. Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Ambiental, Bogotá.

Rivas Castro, A. B. (2019). Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Rodríguez, S., & Vargas, Y. (2019). Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie Heliconia psittacorum, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero. Villavicencio, Colombia.

Romero, A. (1999). Tratamiento de aguas residuales. ISBN: 958-8060-13-3

Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Ronzano, E., & Dapena, J. (s.f.). Medida de la Contaminación Orgánica. Recuperado de https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Pasar/Medida_contaminacion_organica.pdf

Rosero, E., Solarte, E., Fernández, A., Peña, E., & Peña, M. (s.f.). Detección de nitrógeno en un humedal artificial de flujo subsuperficial utilizando métodos espectroscópicos de fluorescencia y reflectancia. Revista Bistua, Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia.

Kuzma, S. (2023, agosto 16). 25 countries, housing one-quarter of the population, face extremely high water stress. Recuperado de World Resources Institute: https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries#:~:text=And%20at%20least%2050%25%20of,jobs%2C%20food%20and%20energy%20security.

Sánchez de Fuentes, J. (2001). El fósforo, parámetro crítico de la calidad del agua. Recuperado de

Universidad Central de Venezuela: http://www.ingenieroambiental.com/junio/fosforo.pdf
Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. Applied Sciences, 9(4), 685. https://doi.org/10.3390/app9040685
Schlegel, F. M. (1994). Ecología y enseñanza rural: Manual para profesores rurales del área andina (Vol. 121 de Estudio FAO Montes, ISSN 1014-2886). Food & Agriculture Org. ISBN 9253035226, 9789253035229.
Semana. (2020, julio 25). Girardot podría ser sancionado por vertimientos de aguas residuales. Recuperado de https://www.semana.com/girardot-podria-ser-sancionado-por-vertimientos-de-aguas-residuales/53379/
Sohsalam, P., Englande, A. J., & Sirianuntapiboon, S. (2007). Seafood wastewater treatment in constructed wetland: Tropical case. Department of Environmental Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand. Tulane University School of Public Health and Tropical Medicine, New Orleans, USA.
Stefanakis, A. (Ed.). (2022). Constructed wetlands for wastewater treatment in hot and arid climates. Wetlands: Ecology, Conservation and Management. Technical University of Crete, Chania, Greece. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03600-2
UNICEF Colombia. (2023, marzo). 6 cifras para entender el acceso a agua y saneamiento en Colombia. Recuperado de https://www.unicef.org/colombia/historias/6-cifras-para-entender-el-acceso-agua-y-saneamiento-en-colombia
Universidad de Granada. Diseño de bloques aleatorizados. Recuperado de https://www.ugr.es/~bioestad/guiaspss/practica7/ArchivosAdjuntos/BloquesCompletos.pdf
Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., & Castro, M. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 28(2), 315-322. https://dx.doi.org
Velasco, A., & Vivas, Y. (2006). Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Cauca.
Vymazal, L., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands. Springer Science & Business Media.
Wang, Q., Hu, Y., Xie, H., & Yang, Z. (2018). Constructed wetlands: A review on the role of radial oxygen loss in the rhizosphere by macrophytes. Water, 10(6), 678. https://doi.org/10.3390/w10060678
Wallace, S., & Kadlec, R. (2008). Degradación de BTEX en sistemas de humedales de clima frío. Actas de la 9ª Conferencia Internacional sobre sistemas de humedales para el control de la contaminación del agua.
Werkneh, A. A. (2024). Decentralized constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries: Field-scale case studies, overall performance, and removal mechanisms. Journal of Water Process Engineering, 57, 104710. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104710
WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. París: UNESCO.
Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and

production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Ecological Engineering, 35(5), 861-869. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026

Zurita, F., de Anda, J., & Belmont, M. A. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. Water Quality Research Journal of Canada, 41(4), 410–417. Canadian Association on Water Quality (CAWQ).