

EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS POR PLANTAS ORNAMENTALES MEDIANTE HUMEDALES
FLOTANTES EN EL CANTÓN MILITAR DE APIAY, VILLAVICENCIO (META)



ANA MARÍA GONZÁLEZ ALONSO

OMAR ANDRÉS HERNÁNDEZ ORJUELA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

EVALUACIÓN DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS POR PLANTAS ORNAMENTALES MEDIANTE HUMEDALES
FLOTANTES EN EL CANTÓN MILITAR DE APIAY, VILLAVICENCIO (META)

ANA MARÍA GONZÁLEZ ALONSO

OMAR ANDRÉS HERNÁNDEZ ORJUELA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

PhD. en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaría de División Sede Villavicencio

Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director de Trabajo de Grado

IBETH ELIANA CALDAS LUJÁN

Jurado

DIEGO ANDREY CORTÉS NARANJO

Jurado

Villavicencio, agosto, 2020

Dedicatoria

Para mí es un gran orgullo e inmensa felicidad tener el privilegio de poder dedicarle este gran logro a aquellos que con sacrificio, esfuerzo, amor, dedicación y apoyo me vieron culminar mis estudios universitarios.

A Dios, por darme fuerzas para seguir adelante y no desfallecer ante las adversidades diarias sin perder la fe en él.

A mi madre Rosalía Alonso Martínez, por el esfuerzo, cariño, apoyo, por las desveladas y preocupaciones a lo largo de mi carrera, por forjar a una mujer integra y noble, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mi padre Henry González Gómez, por su sacrificio, motivación, apoyo, comprensión, por su entrega y amor incondicional, gracias por cada uno de los consejos que me brindaste a lo largo de mi carrera y vida.

A mi hermano Juan Sebastián González Alonso, por su compañía, cariño y apoyo constante.

Ana María González Alonso

Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles a ellos, qué, con mucho esfuerzo, dedicación y amor, he conseguido un logro más en mi vida.

A Dios, por brindarme sabiduría, paciencia y fe durante toda la carrera, por permitirme crecer, por ser hoy una persona íntegra y ayudarme a superar cualquier adversidad.

A mi madre Mónica Orjuela Serrano por todo el apoyo que me ha dado y el amor, durante todas las etapas de mi vida.

A mi padre Omar Hernández Prieto por haberme forjado a ser la persona que soy hoy en día, y por ser motivo constante para alcanzar mis logros.

Omar Andrés Hernández Orjuela

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios por permitir culminar la etapa universitaria, superando cada obstáculo que se nos presentó a lo largo de nuestra carrera, a nuestras familias por darnos el privilegio de cursar nuestros estudios universitarios, por el apoyo que nos brindaron desde el inicio de esta gran etapa para nosotros, por sus sacrificios y amor incondicional.

Les agradecemos a la comunidad del batallón de Ingenieros Carlos Albán Estupiñán en especial al Sargento Viceprimero Santiago Preciado, al Soldado Profesional Jhon Henao Rubio, al Profesional de defensa Carlos Manuel Saavedra y al Soldado Manuel González, por el apoyo financiero y técnico para el desarrollo del presente proyecto.

A la Universidad Santo Tomás por brindarnos los recursos necesarios para capacitarnos como Ingenieros Ambientales, a cada uno de los profesores que estuvieron en el proceso de nuestra carrera, en especial a nuestro director de grado Christian José Rojas Reina por brindarnos su conocimiento y apoyo para la ejecución de este proyecto.

Tabla de contenido

Resumen.....	13
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	16
1.1 Formulación en torno al problema.....	18
2. Objetivos	19
2.1 Objetivo general.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3. Justificación	20
4. Alcance	22
5. Antecedentes y marco referencial.....	24
5.1 Antecedentes	24
5.2 Marco Teórico.....	26
5.3 Marco Conceptual.....	27
5.3.1 Tipos de humedales.....	27
5.3.1.1 Humedales artificiales con diferentes plantas acuáticas.....	28
5.3.1.1.1 Humedales artificiales con especies flotantes.....	28
5.3.1.1.2 Humedales artificiales con especies sumergidas.	28
5.3.1.1.3 Humedales artificiales con especies emergentes.	29
5.3.1.2 Humedales artificiales subsuperficiales.	29
5.3.1.2.1 Humedales artificiales subsuperficiales con sistema de flujo horizontal. .	30
5.3.1.2.2 Humedales artificiales subsuperficiales con sistema de flujo vertical.	30
5.3.1.3 Humedales de flujo superficial	31
5.3.1.4 Sistemas de humedales de manto flotantes.	31
5.3.1.5 Sistemas híbridos.	32
5.3.2 Principales componentes de un humedal artificial.	33
5.3.2.1 Agua residual doméstica (ARD).	33
5.3.2.2 Sustrato o medio poroso.	33
5.3.2.3 Vegetación.....	34
5.3.2.4 Microorganismos.	34
5.3.3 Parámetros a estudiar.....	34

5.3.3.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	34
5.3.3.2 Sólidos Suspendidos Totales (SST).	34
5.3.3.3. Fosfatos (P-PO ₄).	35
5.3.3.4 Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).	35
5.3.3.5 Nitritos (NO ₂).	35
5.3.3.6 Nitratos (NO ₃).	35
5.3.3.7 Nitrógeno Total (NT).	36
5.3.3.8 pH.	36
5.3.3.9 Conductividad Eléctrica.	36
5.3.3.10 Oxígeno disuelto (OD).	36
5.4 Marco Legal.	37
6. Metodología.	39
6.1 Fase I: Identificación de individuos de plantas ornamentales para los humedales flotantes.	39
6.1.1 Construcción de vivero.	39
6.1.2 Adaptación.	40
6.1.3 Medición de características morfológicas.	40
6.2 Fase II: Desarrollo del prototipo de humedal flotante.	41
6.2.1 Construcción de los humedales flotantes a escala piloto.	41
6.2.1.1 Excavación.	41
6.2.1.2 Dimensiones.	41
6.2.1.3 Recubrimiento.	42
6.2.1.4 Construcción de balsas.	42
6.2.1.4.1 Sustrato.	42
6.2.1.5 Captación y vaciado del agua residual.	42
6.2.2 Tiempos de Retención Hidráulica (TRH).	43
6.2.3 Toma de muestras.	43
6.2.4 Determinación de Concentraciones.	44
6.3 Fase III: Análisis de Resultados.	46
6.3.1 Análisis de remoción.	46
6.3.2 Tabulación y análisis estadístico de datos.	47
7. Resultados y Análisis de Resultados	48
7.1 Adaptación y control del crecimiento de las plantas.	48

7.2 Influencia del pH, conductividad y temperatura en el ARD utilizada.....	51
7.3 Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	52
7.4 Comparación de porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	55
7.5 Determinación de la Concentración de Entrada de los Nutrientes.....	57
7.6 Comparación de porcentajes de remoción de P-PO ₄	58
7.7 Comparación de porcentajes de remoción de NT.....	60
7.8 Comparación de eficiencias en la remoción de contaminantes entre los humedales flotantes y las lagunas de estabilización en un TRH de 8 días.....	63
7.8.1 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de DBO ₅	63
7.8.2 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de SST.....	65
7.8.3 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de P-PO ₄	66
7.8.4 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de NT	68
7.9 Análisis estadístico.....	69
8. Conclusiones	74
9. Recomendaciones	76
Bibliografía	77
ANEXOS.....	84

Lista de Tablas

Tabla 1. Marco Legal	37
Tabla 2. Aumento Gradual de ARD Contenida en Solución	40
Tabla 3. TRH para el tratamiento por cada humedal y tomas de muestras	44
Tabla 4. Métodos de Mediciones para los parámetros.....	45
Tabla 5. Medición inicial de las plantas ornamentales	49
Tabla 6. Control del crecimiento y estado de las plantas implementadas en los humedales	50
Tabla 7. Resultados de conductividad en la entrada y salida de los humedales flotantes	52
Tabla 8. Resultados de DBO ₅ en la entrada y salida de los humedales flotantes	53
Tabla 9. Resultados de la SST en la entrada y salida de los humedales flotantes	56
Tabla 10. Resultados de P-PO ₄ en la entrada y salida de los humedales flotantes	58
Tabla 11. Resultados de NT en la entrada y salida de los humedales flotantes.....	60
Tabla 12. Porcentajes de remoción de DBO ₅ por m ² en el TRH de 8 días.....	64
Tabla 13. Porcentajes de remoción de SST por m ² en el TRH de 8 días.....	65
Tabla 14. Porcentajes de remoción de P-PO ₄ por m ² en el TRH de 8 días.....	67
Tabla 15. Porcentajes de remoción de NT por m ² en el TRH de 8 días	68
Tabla 16. Estadísticos descriptivos <i>Heliconia psittacorum</i>	70
Tabla 17. Estadísticos descriptivos <i>Alpinia purpurata</i>	70
Tabla 18. Correlaciones para <i>Heliconia psittacorum</i>	71
Tabla 19. Correlaciones para <i>Alpinia purpurata</i>	72

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación de los seis humedales flotantes a escala piloto	22
Figura 2. Tipos de humedales artificiales.	28
Figura 3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	30
Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	30
Figura 5. Plantas acuáticas para tratar ARDs.....	31
Figura 6. Humedal flotante con raíz parcialmente sumergida	32
Figura 7. Humedal y raíz sumergida.....	32
Figura 8. Sistema de humedales híbridos	33
Figura 9. Vivero de adaptación.....	40
Figura 10. Dimensiones de los humedales flotantes	41
Figura 11. Montaje de la balsa flotante.....	42
Figura 12. Humedales superficiales con manto flotante	43
Figura 13. Amarillamiento de hojas de la especie <i>Alpinia purpurata</i>	49
Figura 14. Gráfica del crecimiento promedio de las plantas de cada medición	50
Figura 15. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de DBO ₅ en los tratamientos	53
Figura 16. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de SST en los tratamientos.....	56
Figura 17. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción P-PO ₄ en los tratamientos....	59
Figura 18. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de NT en los tratamientos.....	61
Figura 19. Gráfica de Porcentaje de remoción DBO ₅ /m ² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes	64
Figura 20. Tonalidad verde por presencia de algas; muestras tomadas de las lagunas de estabilización.....	66
Figura 21. Porcentaje de remoción de P-PO ₄ /m ² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes.....	67
Figura 22. Porcentaje de remoción de NT/m ² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedal flotante.....	68
Figura 23. Diagrama de dispersión % de remoción <i>Heliconia psittacorum</i> primera ronda	71
Figura 24. Diagrama de dispersión % de remoción <i>Heliconia psittacorum</i> segunda ronda.....	71
Figura 25. Diagrama de dispersión % de remoción <i>Alpinia purpurata</i> primera ronda	72
Figura 26. Diagrama de dispersión % de remoción <i>Alpinia purpurata</i> segunda ronda.....	72

Lista de Anexos

Anexo 1. Línea de tiempo de los documentos encontrados con las palabras de búsqueda "Floating wetlands" y “Macrophytes”	84
Anexo 2. Fotografía del riego de las plantas ornamentales a partir de las soluciones de ARD y agua potable, con fines de adaptación	84
Anexo 3. Planilla Control de Crecimiento de las Plantas Ornamentales	85
Anexo 4. Excavación de los humedales.....	85
Anexo 5. Recubrimiento de los humedales artificiales.....	86
Anexo 6. Transporte del ARD y vaciado de los humedales	86
Anexo 7. Curvas patrón para la determinación de las concentraciones de cada nutriente	87
Anexo 8. Tabla de concentraciones de DBO ₅ y SST	88
Anexo 9. Resultados de NT, NTK, NO ₃ , NO ₂	89
Anexo 10. Cálculo para comparar proporcionalmente las eficiencias de los humedales flotantes y las lagunas de estabilización	89
Anexo 11. Porcentajes de remoción de contaminantes.....	89

Resumen

El presente trabajo de grado, consistió en evaluar la capacidad de remoción de contaminantes orgánicos caracterizados a través de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y nutrientes, como ortofosfatos (P-PO₄) y Nitrógeno Total (NT) a partir de dos plantas ornamentales de tipo emergente – higrófitas, *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata*, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (ARDs) con pretratamiento, provenientes de la comunidad del Cantón Militar de Apiay, mediante seis humedales de manto flotante a escala piloto.

La metodología realizada consistió en una investigación de campo experimental, en el que inicialmente se adaptaron las especies de plantas al agua residual doméstica (ARD) y se seleccionaron las plantas que obtuvieron mejores resultados de adaptación transfiriéndolas a las estructuras flotantes. Para el tratamiento de las ARDs se establecieron tiempos de retención hidráulica (TRH) de 4, 6 y 8 días, en el cual se desarrollaron seis tratamientos por duplicado. Además de los tratamientos a partir de los humedales flotantes, se determinó la eficiencia del actual sistema de tratamiento de las lagunas de estabilización que se encuentran en el Cantón Militar de Apiay y que poseen la vegetación *Lemma sp.* y *Chrysopogon zizanioides*, esto con el fin de comparar las eficiencias de remoción de los sistemas. Los resultados del presente estudio fueron analizados por medio de **Microsoft Excel** y **IBM SPSS statistics**.

Los resultados obtenidos, alcanzaron remociones por parte de los humedales flotantes con la especie *Alpinia purpurata* de DBO₅ en un 36,14%, SST de 61,91% y P-PO₄ en 46,35%. Los humedales con *Heliconia psittacorum* alcanzó remociones de DBO₅ de 23,21%, SST de 62,66%, P-PO₄ de 88,77% y NT de 32,20%. Las lagunas de estabilización, obtuvieron porcentajes de remoción de DBO₅ de 57,14% (promedio de ambas lagunas), P-PO₄ de 31,64% y NT de 25,00%. De acuerdo a los resultados, la *Heliconia psittacorum* demostró mayor remoción de contaminantes en el TRH de 4 días con una eficiencia 40,56%, seguidamente en el TRH de 8 días en un 37,53%; de igual manera los resultados obtenidos por los humedales flotantes son considerables, siendo una alternativa viable para el tratamiento de ARDs, para la posible implementación a futuro convirtiéndose en un sistema complementario para las lagunas de estabilización.

Palabras claves: *Heliconia psittacorum*, *Alpinia purpurata*, humedal flotante, contaminantes.

Abstract

This degree work consisted of evaluating the ability to remove organic pollutants characterized through the Biological Oxygen Demand (BOD), Total Suspended Solids (SST) and nutrients, such as orthophosphates (P-PO₄) and Total Nitrogen (NT) from two emergent ornamental plants - hygrophytes, *Heliconia psittacorum* and *Alpinia purpurata*, for the treatment of domestic wastewater (ARDs) with pretreatment, from the community of the Military Canton of Apiay, using six floating mantle wetlands on a pilot scale.

The methodology carried out consisted of an experimental field investigation, in which the plant species were initially adapted to domestic wastewater (ARD) and the plants with the best adaptation results were selected by transferring them to the floating structures. For the treatment of ARDs, hydraulic retention times (HRT) of 4, 6 and 8 days were established, in which six treatments were performed in duplicate. In addition to the treatments from the floating wetlands, the efficiency of the current treatment system for the stabilization lagoons found in the Military Canton of Apiay and with the vegetation *Lemma sp.* and *Chrysopogon zizanioides*, this in order to compare the removal efficiencies of the systems. The results of the present study were analyzed using Microsoft Excel and IBM SPSS statistics.

The results obtained reached removals by floating wetlands with the species *Alpinia purpurata* of BOD₅ in 36.14%, SST of 61.91% and P-PO₄ in 46.35%. The wetlands with *Heliconia psittacorum* reached BOD₅ removals of 23.21%, SST of 62.66%, P-PO₄ of 88.77% and NT of 32.20%. The stabilization lagoons obtained removal percentages of BOD₅ of 57.14% (average of both lagoons), P-PO₄ of 31.64% and NT of 25.00%. According to the results, *Heliconia psittacorum* showed greater removal of pollutants in the 4-day HRT with an efficiency of 40.56%, followed in the 8-day HRT by 37.53%; in the same way, the results obtained by floating wetlands are considerable, being a viable alternative for the treatment of ARDs, for possible future implementation, becoming a complementary system for stabilization ponds.

Key words: *Heliconia psittacorum*, *Alpinia purpurata*, floating wetland, pollutants.

Introducción

En países en desarrollo como Colombia, los sistemas de producción están en constante crecimiento producto del aumento de la demanda por el buen desempeño económico de los últimos decenios, afectando gravemente el ámbito ambiental, debido a que no siempre se han tomado medidas de mitigación de los residuos generados por las actividades industriales; esto se evidencia con el incremento de las descargas de ARDs e industriales sobre los cuerpos de agua, contaminando las fuentes de agua superficiales y subterráneas, que limitan el aprovechamiento hídrico en los lugares subyacentes a los puntos de vertimiento y generan degradación de diversos ecosistemas (IDEAM, 2016).

Debido a la afectación del recurso hídrico, como consecuencia de la inexistencia de plantas de tratamientos de Aguas Residuales Domesticas (ARDs) en la mayoría de los municipios del territorio colombiano, los vertimientos producto de actividades antrópicas, son vertidos directamente a los cuerpos de agua, generando su contaminación. Por consiguiente, es necesario diversificar los tratamientos efectivos para las ARDs e industriales, como parte de las actividades de gestión para la reducción y control de la contaminación, desarrollando tecnologías de tratamiento de bajo costo como la implementación de humedales artificiales, que estén sujetos a diversas alternativas de solución, orientadas a mitigar el impacto ambiental generado por el vertimiento de ARDs crudas o parcialmente tratadas hacia diversos cuerpos receptores (IDEAM, 2016).

Los humedales flotantes son instrumentos innovadores, debido a que pueden cumplir con la función de tratar varios tipos de efluentes, mediante la fitorremediación ejercida por la vegetación asociada a la actividad de microorganismos; los microorganismos tienen la capacidad de remover algunos metales pesados, material orgánico y nutrientes; esta fitotecnología se convierte en una alternativa de bajo costo para la implementación en zonas que su población sea de baja densidad (Mulamootil, McBean, & Rovers, 1997). Los sistemas de humedales flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de ARDs, los cuales se remueven principalmente la DBO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), compuestos nitrogenados y fosfatados, a través de los diferentes procesos de fitorremediación (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010).

1. Planteamiento del problema

Uno de los desafíos económico-ambientales más importantes en la actualidad es la producción más limpia, complementado los vertidos que generan los procesos productivos, con los tratamientos de ARDs (Tchobanoglous, Burton, & Inc. Staff Metcalf, 2003). Las consecuencias que causan los vertidos de ARDs cuando superan la capacidad de autodepuración de los cuerpos de aguas receptoras, provocan riesgos a la salud humana que afectan el sistema digestivo, generan el deterioro a la calidad de los servicios ecosistémicos que ofrece los cuerpos hídricos, aumentan la presencia de vectores, provoca la muerte de fauna y flora, y en forma acumulativa se convierte en impactos significativos al paisaje natural del entorno (Alfaro Salazar, 2015).

Según cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se considera que el 32% de la población mundial carece de servicios de saneamiento básico, generando 280.000 muertes asociadas a enfermedades de carácter hídrico, que representa el 4% del total de las muertes en el mundo, relacionadas con la calidad, higiene y saneamiento (OMS, 2014). En América Latina y el Caribe, se estima que solo entre el 25% y el 30% de los efluentes urbanos son retornados a los cuerpos hídricos con previo grado de tratamiento, a causa de la carencia de infraestructura, recursos económicos o por la falta de un adecuado mantenimiento y operación de plantas de tratamiento (CEPAL & BID, 2018).

En Colombia, aproximadamente 300 municipios no realizan tratamiento de ARDs que se generan, y alrededor de 450 no poseen una planta de tratamiento; el caso más crítico ocurre en la cuenca del Magdalena-Cauca (25% del área territorial), con un 70% de la población y un 11% de la oferta hídrica del país, en el que aproximadamente 1300 cuerpos de agua están siendo contaminados por ser receptores de los vertimientos municipales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2002). De igual forma, en Colombia, se ha buscado la factibilidad de implementar tratamientos no convencionales debido a su bajo costo y alto rendimiento en la descontaminación hídrica. En el departamento del Meta de los 29 municipios, solo nueve tiene un sistema de tratamiento de ARDs, que constituyen un 31% de la cobertura municipal departamental (Ríos, 2017).

Hoy en día la ciudad de Villavicencio, se encuentra en la fase de diseño para la construcción de su primera Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), que proporcionará tratamiento al

84% de las ARDs generadas en la ciudad que carecen actualmente de saneamiento, esto reducirá las cargas contaminantes vertidas al Río Ocoa (Alcaldía de Villavicencio, 2018).

Dentro del municipio de Villavicencio se encuentra el Cantón Militar de Apiay, administrado por el Ministerio de Defensa. El artículo 103 de la ley 99 de 1993, establece la coordinación entre el Ministerio de Defensa y Ministerio de Ambiente, en el desarrollo de estrategias para la protección de la naturaleza por parte de las fuerzas militares de Colombia en sus áreas de influencia (Congreso de Colombia, 1993); en cumplimiento de esta prerrogativa, en la actualidad, el Cantón Militar de Apiay cuenta con un sistema de tratamiento constituido por dos PTAR, que están compuestas por un proceso de pretratamiento y con procesos de tipo biológico de lodos activados como tratamiento secundario, ambas PTAR desarrollan tratamientos independientes, una con capacidad de 10 L/s y otra de 6 L/s con el fin de tratar las ARDs provenientes de la comunidad del Cantón Militar de Apiay, sin embargo, durante la temporada de lluvias y debido a la creciente población dentro de la guarnición militar, se puede presentar un caudal de exceso de 4 L/s que no puede ser tratado por las PTAR, lo cual es vertido con pretratamiento a dos lagunas de estabilización, ambas con dimensiones de 50 m de largo, 14 m de ancho y 0,7 m de profundidad, con el fin de depurar las ARDs.

Para el tratamiento de este caudal de exceso, inicialmente los operarios de las lagunas implementaron la siembra del “buchón de agua” (*Eichhornia crassipes*), reflejando múltiples veces una descontrolada proliferación de la macrófita generando “colchones de lodo”, lo cual afectó el sistema de remoción y el volumen efectivo del tanque, ocasionando una alteración en el tiempo de retención y la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, por lo cual la especie fue retirada.

En la actualidad, las lagunas cuentan con “lenteja de agua” *Lemna sp.* de las cuales solo una laguna de estabilización cuenta con pocas unidades de *Chrysopogon zizanioides*, conocida como “pasto vetiver”, implementadas como filtro biológico para el tratamiento de ARDs. De acuerdo a la información suministrada por el personal del Cantón Militar de Apiay, la presencia de las pocas unidades de la especie se debe a que anteriormente la gran mayoría de plantas sembradas, evidenciaron baja adaptabilidad causando la muerte de ellas, generando una alta proliferación de algas, reflejando niveles de eutrofización, lo cual representa un inadecuado tratamiento de las ARDs contenidas en las lagunas, que posteriormente son vertidas a los caños Blanquita y Piñalito. Debido a estas problemáticas en el sistema de tratamiento actual, se planteó llevar a cabo este proyecto, para comprobar a escala piloto la efectividad del uso de humedales flotantes, mediante

la biorremediación biológica por las especies ornamentales *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata*. Para evaluar su eficiencia se determinó la remoción de contaminantes (DBO₅, SST, P-PO₄ y NT) contenidos en las ARDs, provenientes de la comunidad del Cantón Militar de Apiay, en TRH de 4, 6 y 8 días.

1.1 Formulación en torno al problema

A partir de la problemática evidenciada anteriormente, se formula la siguiente pregunta problema: ¿Cuál es la capacidad de remoción de carga contaminante orgánica, caracterizada con diferentes parámetros fisicoquímicos (DBO, SST, P-PO₄, NT), usando un sistema de humedales flotantes con dos especies de plantas ornamentales, para tratar aguas residuales domésticas provenientes de la comunidad del Cantón Militar de Apiay?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de remoción de carga contaminante orgánica a partir de dos plantas ornamentales, para tratar aguas residuales domésticas provenientes de la comunidad del Cantón Militar de Apiay, mediante humedales flotantes a escala piloto.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los individuos de plantas ornamentales con mejor capacidad de adaptación, con el fin de ser implementados en los humedales flotantes, según sus características morfológicas: altura de planta, floración, y coloración de hojas y tallos.
- Desarrollar un prototipo de humedal flotante que permita la remoción de DBO, SST y nutrientes a partir de las plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Analizar los porcentajes de remoción de contaminantes a partir de los humedales flotantes a escala piloto, con las diferentes especies implementadas y diferentes tiempos de tratamiento.

3. Justificación

Los humedales artificiales son sistemas contruidos por el hombre que permiten una interacción entre plantas, sustrato, microorganismos y agua, de tal forma que los contaminantes son degradados a través de diversos procesos físicos, químicos y biológicos, siendo una solución a bajo costo para el tratamiento de ARDs e industriales, que son depuradas por plantas con capacidades de remoción de carga contaminante contenida en ARDs a causa del vertimiento de actividades antrópicas (Rodríguez, Gómez, Garavito, & López, 2010).

Una de las especies implementadas en el presente estudio para la remoción de carga contaminante orgánica, fue la *Heliconia psittacorum*, siendo una macrófita emergente que posee capacidades de fitorremediación, está presente generalmente en el neotrópico a un altitud de 0 a 1.400 metros sobre el nivel del mar (msnm), y crece en temperaturas entre 22 °C y 30 °C (Peña, Madera, Sánchez, & Medina, 2013). Esta especie es dominante en Colombia en las regiones de la Orinoquía y el Valle del Cauca, con presencia en áreas inundables y morichales, con una vida útil promedio de 10 meses (Vera Ospina, 1995). Estas plantas tienen la capacidad de eliminar DBO y SST con porcentajes superiores de 60% y disminuir nutrientes en el agua con porcentajes superiores al 80%, siendo incorporados en su biomasa. Esta planta es comercializada por incrementar el valor estético del entorno, aparte de su potencial para ser empleada en sistemas de humedales artificiales (Breen, 1990).

La otra especie utilizada, la *Alpinia purpurata*, conocida como “ginger roja”, es una planta ornamental comercializada en varias partes del mundo por la vistosa inflorescencia, crece en climas tropicales húmedos con temperaturas entre 20 y 30°C, con altura entre 0,8 a 2 m, sus raíces son de 20 a 35 cm de largo, también es utilizada en sistemas de humedales artificiales para tratar ARDs y prevenir algas (Leal, 2012). Según el estudio realizado por M. De Paula García en el 2015, el proceso de adaptabilidad de la planta en humedales artificiales se da en un período corto en óptimas condiciones, alcanzando porcentajes de remoción de SST con un 79,3%, de DBO₅ de 71,60%, Nitrógeno Total (NT) de 6,24% y ortofosfatos (P-PO₄) de 20,21%, siendo una alternativa para el tratamiento de ARDs en lugares de baja densidad poblacional (De Paula García, 2015).

La ciudad de Villavicencio tiene condiciones meteorológicas aptas para el adecuado desarrollo de las especies *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata* en humedales flotantes a escala piloto en el Cantón Militar de Apiay, debido a que se encuentra a una altitud de 467 msnm y cuenta con

una temperatura tropical promedio de 25,5 °C (Secretaría de Gobierno, 2019). La importancia de utilizar especies ornamentales en humedales artificiales, en áreas de campo abierto como el encontrado en las lagunas artificiales, contribuye a la mejora del paisaje y a la polinización de las plantas, siendo este último un proceso importante en el beneficio de la biodiversidad y seguridad alimentaria del mundo (Vidal & Hormazábal, 2018).

El Título J del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, propone a los sistemas de humedales artificiales como alternativas para el tratamiento de ARDs, por medio de especies con capacidades de remover los parámetros físico-químicos y biológicos de aguas contaminadas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010); es por esto la necesidad de realizar este estudio experimental debido a que estas plantas son de alto interés en el mundo académico y científico, por los aportes que contribuyen a beneficios ambientales en el tratamiento de ARDs que también pueden proveer beneficios económicos asociados (Peña, Madera, Sánchez, & Medina, 2013).

4. Alcance

La investigación abarca sistemas de tratamiento de ARDs por medio de humedales flotantes, en lugares de temperatura media tropical (25°C) como en la ciudad de Villavicencio, por lo cual la implementación de los humedales flotantes puede ser usado en cuerpos hídricos de flujo superficial de gran extensión con situaciones ambientales similares. El proyecto estuvo ubicado en el Cantón Militar de Apiay, que se encuentra en el kilómetro 7 vía Puerto López, Apiay, Meta, como se muestra en la *Figura 1*. Los humedales flotantes ocuparon un área estimada de 13 m² y el vivero de adaptación ocupó 10 m², para un área total de 23 m². El desarrollo de la presente investigación tuvo una duración aproximada de 5 meses.

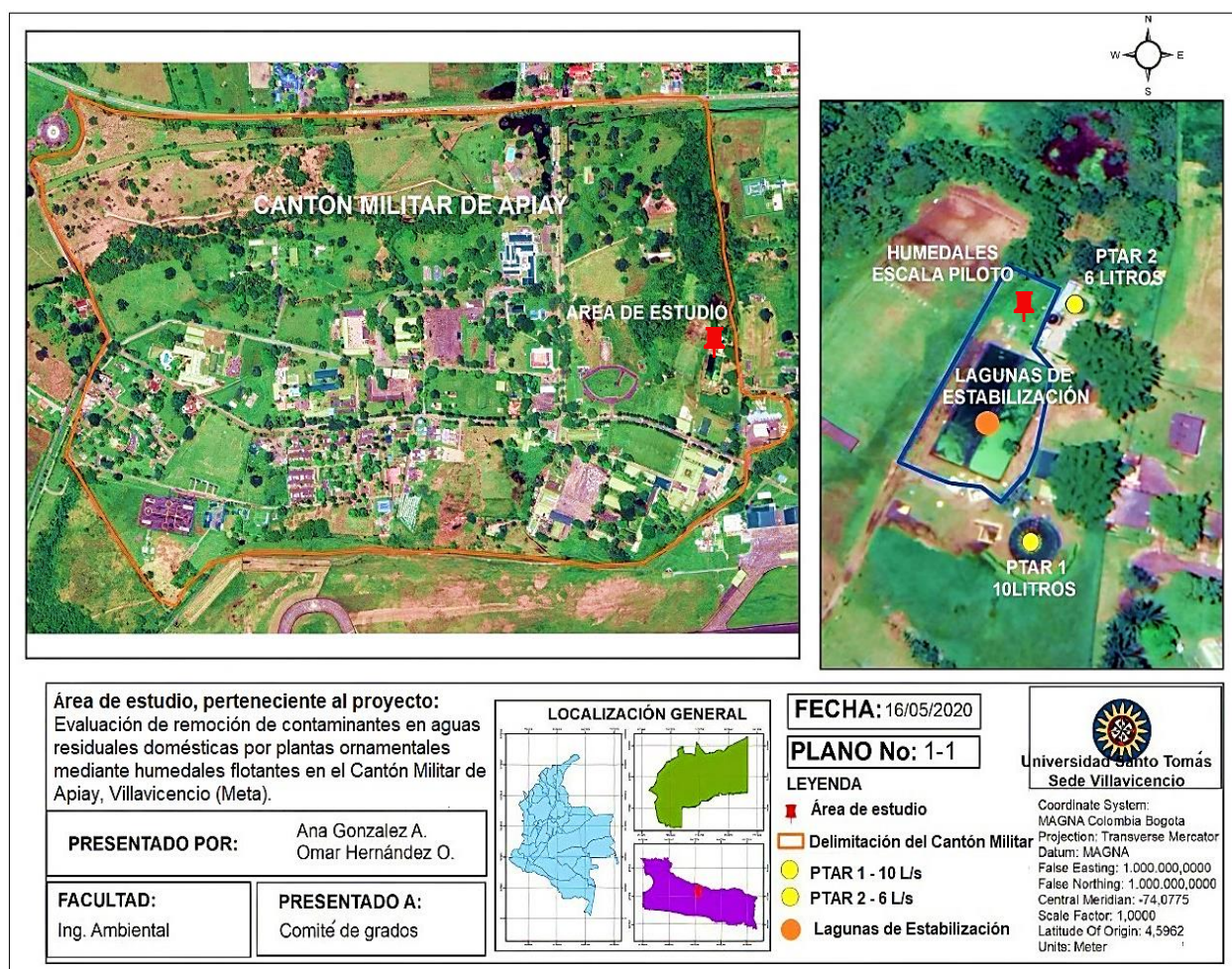


Figura 1. Ubicación de los seis humedales flotantes a escala piloto. Por González & Hernández, 2020, a partir del software ArcGIS Pro 10.3.

La presente investigación servirá a futuro como insumo para la comunidad del Cantón Militar de Apiay que cuenta con una población de 5000 personas, siendo base para generar recomendaciones técnicas de la especie con mayor remoción, para la posible implementación a escala real en las dos lagunas de estabilización; además se dará conceptos sobre el uso de los humedales flotantes en las lagunas, con el fin de tratar el caudal de exceso de ARD que es vertido por dicha comunidad, de esta manera disminuyendo las cargas contaminantes orgánicas vertidas al caño Blanquita y Piñalito, mitigando posibles impactos ambientales a estos cuerpos hídricos.

5. Antecedentes y marco referencial

5.1 Antecedentes

A partir de la base de datos Scopus, aplicando la palabra clave “Floating Wetlands” y “Macrophytes”, se publicaron 322 documentos sobre el tema, desde el año 2000 hasta 2020 (Ver Anexo 1), evidenciando a partir de la revisión bibliográfica, el interés y constante crecimiento de la producción científica sobre humedales, teniendo un pico máximo en el 2018 y 2019 con 33 documentos, y hasta la actual fecha del 2020 una producción de 18 documentos. No obstante, es a partir del 2006, donde los estudios de los humedales flotantes con macrófitas se han incrementado, ya que ha aumentado el interés por el estudio de estos sistemas para la eliminación de contaminantes presentes en ARDs mediante procesos físicos, biológicos y/o químicos con el fin de mitigar alteraciones en ecosistemas artificiales acuáticos con contenido de materia orgánica y nutrientes.

Entre los estudios que se destacan en la revisión bibliográfica, se menciona el de Tanner et al., 2011 en Nueva Zelanda, donde se demostró la eficiencia de los humedales flotantes estabilizando nutrientes y metales pesados, mediante la macrófita *Juncus edgariae*, obteniéndose porcentajes para la reducción de NT en un 92% y P-PO₄ en 82%, siendo resultados relevantes para el mejoramiento de la calidad en el agua. (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011).

En 2014, el Colegio de La Frontera Sur en Tapachula, Chiapas, México, desarrolló un estudio basado en la comparación de la eficiencia en el tratamiento de ARDs mediante plantas ornamentales *Heliconia stricta* y *Heliconia psittacorum*, plantadas en humedales artificiales de flujo subsuperficial. En este estudio, se obtuvieron porcentajes de remoción para *Heliconia psittacorum* de 57,38% para DBO₅, 61,88% de Demanda Química de Oxígeno (DQO), 39,88% de fósforo total (PT) y 34,65% de NT, para *Heliconia stricta* un 52,48% para DBO₅, 55,43% de DQO, 18,91% para PT y 34,82 de NT (Mendoza, 2014).

En la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, en el año 2015 se realizó un estudio de humedales flotantes para la mejora de la calidad del agua de escorrentía, en el edificio de parqueaderos de dicha institución mediante la planta *Juncos californianos*. Se analizó el contenido de DBO₅, NT, Zinc, Plomo y Cobre, registrándose una remoción de 31%, 53%, 42%, 87% y 77%, respectivamente, mientras que parámetros como fósforo y Carbono Orgánico Total (COT) tuvieron eficiencias de remoción bajas de 10% y 21% (Chavés & Mojica, 2015).

En el 2015 la Universidad Veracruzana en Veracruz-México, realizó un estudio del crecimiento de plantas ornamentales a partir de la remoción de materia orgánica y nutrientes. Las macrófitas fueron sembradas en humedales artificiales de flujo subsuperficial, obteniéndose mayores resultados de remoción mediante una operación continua durante 4 meses con un TRH de 3 días, para valores de remoción de DBO₅: 82,9%, 71,60% y 81,02% para *Typha sp.*, *Alpinia purpurata* y *Zantedeschia aethiopica* respectivamente; de Nitratos (N-NO₃) de 59,67%, 6,24% y 42,65% y P-PO₄ de 55,16%, 20,21% y 41,88%. Con base en este estudio, se demuestra el potencial de la especie *Alpinia purpurata* en la remoción de materia orgánica y nutrientes, con porcentajes considerables siendo una alternativa para la implementación en humedales artificiales (De Paula García, 2015).

Otro referente se puede encontrar en el trabajo realizado a mediados del 2017 en Tauramena, Casanare donde se realizó una investigación basada en la implementación de un humedal flotante con dos plantas ornamentales, *Heliconia psittacorum* y *Bambusa sp.*, con el fin de depurar materia orgánica y nutrientes contenidos en el agua residual, generados por la finca el Recreo en Tauramena. Los resultados de este estudio determinaron que la planta *Heliconia psittacorum* es la macrófita con más control ya que las eficiencias de remoción de DBO 94,6%, SST 63,3%, PT 83,4% y NT 86,3%, fueron mayores que los aportados por *Bambusa sp.* con porcentajes de DBO 58,3%, SST 60,4%, PT 82,4% y NT 35,5% (Carvajal, Ortiz, & Vega, 2017).

En el estudio realizado por Sara Rodríguez y Yudeimy Vargas de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio en el año 2018, se evaluó el potencial de remediación de la *Heliconia psittacorum* para los humedales artificiales en la región de la Orinoquía, bajo los parámetros de DBO, DQO y SST. La implementación de los humedales artificiales utilizados, permitió confirmar la gran proyección de esta tecnología en la remoción de la materia orgánica presente en ARDs mediante la especie *Heliconia psittacorum*, obteniendo porcentajes promedio para DBO de 86,5%, DQO de 76,1% y de 76,4% para SST. Los porcentajes de remoción de DBO fueron mayores en un 14% frente a otros estudios (Rodríguez & Vargas, 2018).

En lo que se refiere al sistema en estudio, en el año 2015 las lagunas de estabilización del sistema de tratamiento de ARDs del Cantón Militar de Apiay, contaban con la macrófita flotante conocida como “buchón de agua” (*Eichhornia crassipes*), sin embargo, el mantenimiento de dicha planta fue complejo generando una alta proliferación del buchón lo que ocasionó que las lagunas no fueran utilizadas en el proceso. En el año 2016 se da inicio a la optimización del sistema de

tratamiento de ARDs del Cantón Militar de Apiay, donde se realizan modificaciones estructurales a los humedales y se siembra la macrófitas *Chrysopogon zizanioides* conocido como “pasto vetiver” la cual termina su establecimiento y adaptación en el año 2017, sin embargo esta se evidencia que el funcionamiento de los humedales no es óptimo cuando se empieza a trabajar con ARDs, ya que se inicia un proceso de eutrofización del agua residual.

De igual manera se observó dificultad en la adaptación de la macrófitas, al presentar problemas de sostenibilidad y de crecimiento, siendo más susceptible en época de verano, donde se tuvo una mortalidad del 80% de plántulas sembradas el primer año. En el año 2018 se realizó resiembra, donde se observó que no hubo éxito en la adaptación, obligando la suspensión temporal de los humedales. En la actualidad, estos humedales se convirtieron en lagunas de estabilización que contienen la especie *Lemna sp.* y una sola laguna cuenta con pocas unidades de *Chrysopogon zizanioides* como resultado de la última resiembra, sin embargo, se sigue presentando una alta proliferación de algas, reflejando niveles de eutrofización.

5.2 Marco Teórico

Los humedales artificiales son tecnologías de bajo costo y de gran proyección para el tratamiento de ARDs en cuerpos hídricos con profundidades no superiores a 0,6 m, los constituyen los humedales construidos de flujo superficial dividido en superficial y flotante, y subsuperficial que pueden ser horizontal o vertical. Los humedales artificiales degradan materia orgánica y nutrientes, estos contienen agentes activos como lo son el agua, los microorganismos y plantas que interactúan entre sí, con el fin de realizar un tratamiento a los contaminantes que se encuentran dentro del sistema (Morales, López, Vera, & Vidal, 2013).

Los humedales flotantes se utilizan principalmente cuando el uso de humedales artificiales convencionales no es viable, se caracterizan por ser de flujo horizontal y de combinar ventajas de los humedales de flujo libre superficial y de sistemas acuáticos; su aplicación se basa en el tratamiento de aguas lluvias, ARDs y aguas con metales asociados. Esta tecnología consta en la implementación de macrófitas atadas a un sustrato, que se encuentra contenido en una balsa flotante en la parte superior de la lámina del agua a tratar (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011), permitiendo la fijación microbiana a las raíces, siendo el sustrato un soporte para las raíces de las macrófitas emergentes (CENTA, 2008).

La vegetación en los humedales artificiales son macrófitas sumergidas, flotantes y emergentes, esta última es la más preferida por su desarrollo en suelos anegados dulces y por su crecimiento ascendente (Zurita, De Anda, & White J, 2011). Los humedales flotantes, se caracterizan por la utilización de macrófitas emergentes que posean capacidades fitorremediadoras, las cuales permiten eliminar materia orgánica, elementos eutrofizantes y metales pesados. De esta forma, mediante sus raíces incorporaran a su biomasa la materia orgánica residual (Delgadillo, Pérez, Camacho, & Andrade, 2010).

Las macrófitas captan el oxígeno de la atmósfera a través de sus hojas y tallos hasta las raíces; estas a su vez desempeñan importantes funciones utilizando el oxígeno disponible, para la oxidación de materias orgánicas e inorgánicas, proporcionando un mejoramiento a la calidad del agua, ya sea originada por industrias o provenientes de sistemas de alcantarillados de poblaciones menores o igual a 2000 personas (Mulamoottil, McBean, & Rovers, 1997).

De acuerdo al estudio realizado por J. Mojica y C. Tequia en la ciudad de Bogotá en el 2015, se obtuvieron considerables resultados en la implementación de humedales flotantes debido a los porcentajes en la eliminación de SST con 47%, DBO₅ de 31%, metales pesados de 72,5 %, NT de 53% y P-PO₄ de 25%, lo cual convierte este tipo de humedal en una alternativa viable para el tratamiento de aguas lluvias y ARDs (Chavés & Mojica, 2015).

5.3 Marco Conceptual

5.3.1. Tipos de humedales.

Los sistemas de humedales artificiales se dividen de acuerdo a la especie vegetal y al tipo de circulación del agua, mediante diversos mecanismos para la depuración de las ARDs, permitiendo la interacción entre las plantas, el tipo de sustrato (si lo requiere), microorganismos y el agua a tratar (Martínez, 2014). Los tipos de humedales son los siguientes:

- Humedales artificiales de flujo superficial
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial

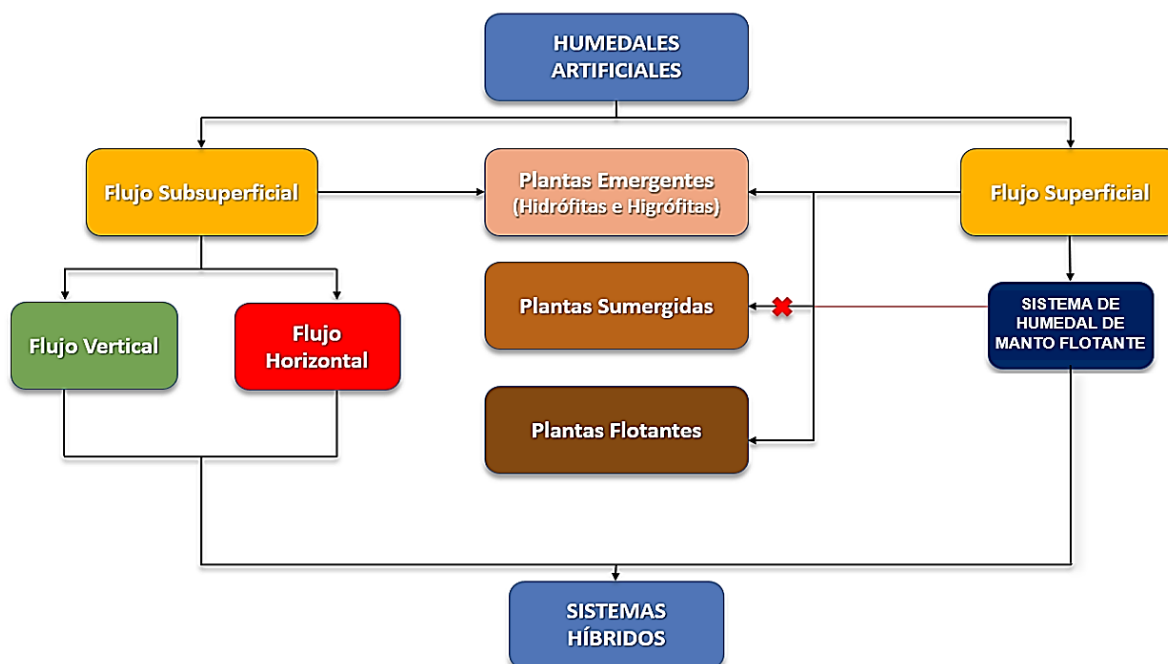


Figura 2. Tipos de humedales artificiales. Adaptado de: (Rabat Blázquez, 2016).

5.3.1.1 Humedales artificiales con diferentes plantas acuáticas.

5.3.1.1.1 Humedales artificiales con especies flotantes.

Son aquellos humedales que cuentan con plantas que se mantienen en flotación sobre la lámina de agua, y se caracterizan porque sus raíces no llegan a tocar el fondo del cuerpo hídrico, proliferan en condiciones de eutrofización y no requieren de un sustrato para el desarrollo de la especie. Algunas especies son la lenteja de agua (*Lemna sp.*), el buchón de agua (*Eirchornia crassipes*), oreja de elefante (*Salvinia auriculata*), entre otras (Kadlec & Wallace, 2009).

5.3.1.1.2 Humedales artificiales con especies sumergidas.

Estos humedales cuentan con plantas que sus tallos, raíces y hojas se encuentran sumergidas completamente por el agua, y sus raíces están enraizadas al suelo del humedal. Son pocas las especies utilizadas para la remediación de cuerpos hídricos, son utilizadas principalmente como especies ornamentales en acuarios o estanques. Algunas de estas especies son las mil hojas (*Ceratophyllum demersum*), miramar (*Hygrophila polysperma*), Hydrilla (*Hydrilla verticillata*), entre otras (Kadlec & Wallace, 2009).

5.3.1.1.3 Humedales artificiales con especies emergentes.

Son aquellos humedales que poseen plantas que se caracterizan por que sus raíces crecen en un sustrato total o parcialmente inundado, sus tallos pueden atravesar la lámina de agua y sus hojas emergen por encima de la superficie permitiendo el desarrollo de la fotosíntesis, floración, fructificación, entre otras funciones de los vegetales. Algunas especies de este tipo son los juncos (*Schoenoplectus californicus*, *Scirpus acutus*, *Scirpus lacustris*), heliconias (*Heliconia psittacorum*), alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*), la totora (*Thypha latifolia*), entre otras (Kadlec & Wallace, 2009).

Dentro de las especies emergentes utilizadas en los humedales artificiales se encuentran:

- Plantas emergentes de tipo hidrófitas: Es un subgrupo de las plantas emergentes que se caracterizan porque tiene condiciones acuáticas más avanzadas que las plantas emergentes de tipo higrófitas, lo cual sus raíces y rizomas están sumergidas en su totalidad, pero sus tallos atraviesan la lámina de agua desarrollando su estructura foliar por encima de ella. Comparten características similares a las plantas higrófitas, ya que sus raíces y rizomas pueden desarrollarse en suelos de alta humedad o con saturación de agua (Beascoechea, Muñoz, & Fernández, 2010).
- Plantas emergentes de tipo higrófitas: Estas plantas se caracterizan por tener condiciones acuáticas menos desarrolladas a comparación de las hidrófitas, las cuales, a diferencia de ellas, sus raíces y rizomas deben crecer en un el suelo de alta humedad o en un sustrato que se encuentre saturado de agua, pero no de total inmersión (Beascoechea, Muñoz, & Fernández, 2010).

5.3.1.2 Humedales artificiales subsuperficiales.

Estos tipos de humedales artificiales se caracterizan debido a que el flujo de agua a tratar, atraviesa un sustrato poroso que suele tener una profundidad entre 0,3 a 0,8 m, que a su vez permite el desarrollo de las plantas emergentes, donde las raíces y rizomas están en contacto con el agua, de modo que la lámina de agua este permanentemente por debajo del sustrato. Existen dos sistemas de humedales subsuperficial en función al flujo de agua: Sistema de flujo horizontal y sistema de flujo vertical (Martínez, 2014).

5.3.1.2.1 Humedales artificiales subsuperficiales con sistema de flujo horizontal.

Este sistema se caracteriza por que el flujo de agua atraviesa por gravedad de manera horizontal el sustrato y las raíces de las plantas, permitiendo la descontaminación del agua a tratar de manera biológica y a su vez, disminuir la materia orgánica y las distintas formas químicas de nitrógeno y fósforo, principalmente (García & Corzo, 2008).

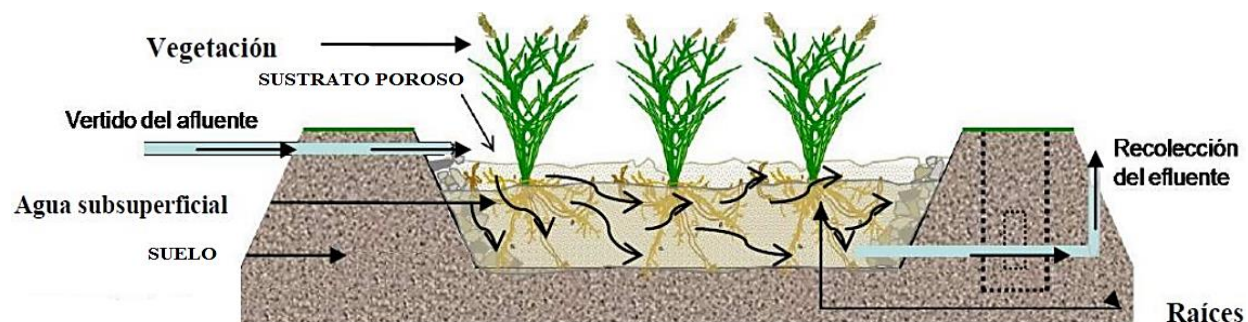


Figura 3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. Adaptado de: (García & Corzo, 2008).

5.3.1.2.2 Humedales artificiales subsuperficiales con sistema de flujo vertical.

Este sistema se caracteriza por recibir aguas residuales de manera homogénea en la superficie del sustrato poroso, y estas van infiltrándose con trayectoria más o menos vertical hasta ser captados en el fondo del humedal por una red de desagüe. El suministro del agua a tratar de manera vertical permite una considerable transferencia de oxígeno aún más el sustrato, mejorando los procesos aeróbicos y de nitrificación mediante tubos cribados de aireación. (García & Corzo, 2008)

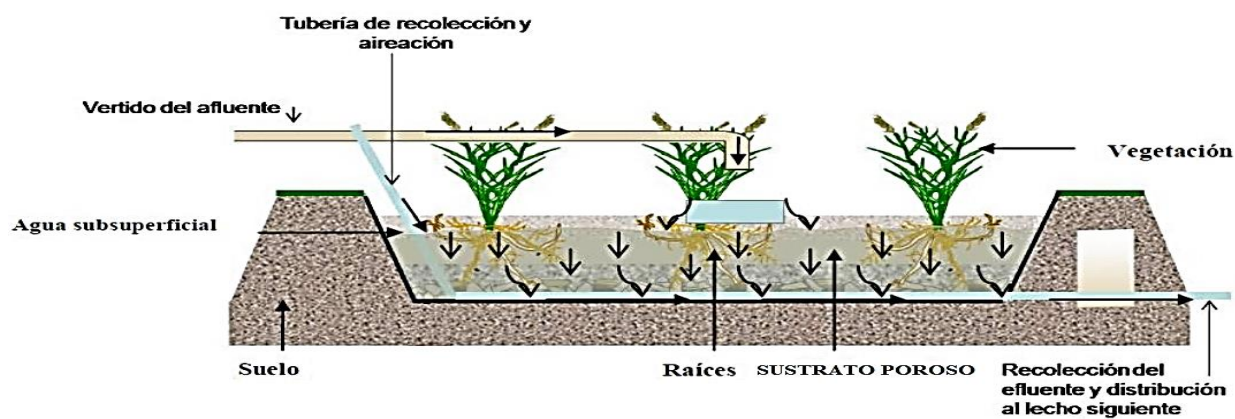


Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical. Adaptado de: (García & Corzo, 2008).

5.3.1.3 Humedales de flujo superficial.

Este tipo de sistema se caracterizan por que la lámina de aguas presente en el humedal, se encuentra a cielo abierto, en estos tipos de humedales se utilizan diversos tipos de plantas y diferentes mecanismos de depuración de acuerdo a la vegetación a implementar. El desarrollo de las plantas se da en condiciones de inundación total o parcial; en los humedales superficiales generalmente la profundidad oscila entre 0,3 a 0,7 metros (Martínez, 2014).

En estos humedales, la alimentación y el tránsito de las aguas tienen contacto con las raíces, en el cual las plantas están enraizadas en el sustrato que se encuentra en el fondo del cuerpo hídrico, o mediante diversos sistemas, el sustrato puede estar en flotación (para el caso de plantas emergentes); el uso de la vegetación flotante, las plantas se encuentran sobre la lámina del agua y no requieren de un sustrato, mientras en el caso de la vegetación sumergida sus raíces están cerca o plenamente enraizadas al suelo del humedal, sin embargo es la vegetación que menos se utiliza para la depuración de aguas residuales (Martínez, 2014).

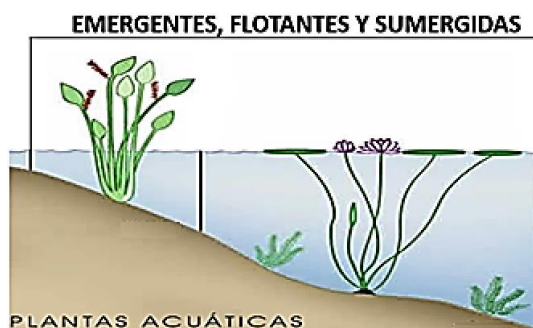


Figura 5. Plantas acuáticas para tratar ARDs. Adaptado de: (Tchobanoglous, G. 2005).

5.3.1.4 Sistemas de humedales de manto flotantes.

Los sistemas de humedales de manto flotante, es una tecnología innovadora para el tratamiento de cuerpos hídricos con bajo nivel de flujo de agua, estos involucran sistemas flotantes, de flujo superficial y generalmente de plantas emergentes y flotantes (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010). En el caso de las plantas flotantes, la implementación de las balsas o soportes flotantes, se utilizan principalmente para desarrollar un crecimiento controlado de las plantas, evitando una alta proliferación, lo cual permita realizar una depuración de los contaminantes presentes en aguas de un área específica; sin embargo, es más habitual encontrar sistemas de humedales flotantes con plantas emergentes, las cuales crecen en soportes flotantes de manera que las raíces germinan a

través de la estructura y de un sustrato, formando una cobertura vegetal, con el fin de remover contaminantes presentes en las ARDs (Morales, López, Vera, & Vidal, 2013).

Los humedales de manto flotantes, tienen ventajas sobre otros tipos de sistemas subsuperficiales lo cuales representan menores costos en la construcción y mantenimiento de estos, facilidad para la recolección de la biomasa y reflejan porcentajes de remoción similares a los de otros sistemas de humedales (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010). Los humedales artificiales de manto flotante, combinan las ventajas de los sistemas flotantes, de flujo superficial y los de la macrófitas emergentes de tipo higrófitas o hidrófitas, siendo transformadas en “plantas flotantes”, que sirven generalmente para realizar tratamientos terciarios y secundarios con previo pretratamiento, de las ARDs que circulan a través de canales de aguas lentas o que se encuentran estacadas en lagunas (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011).

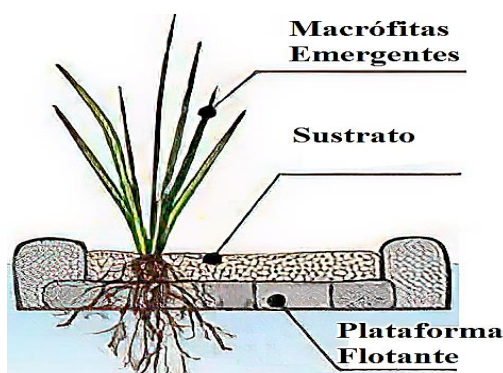


Figura 7. Humedal flotante con raíz parcialmente sumergida. Adaptado de: (Fernández, 2012).

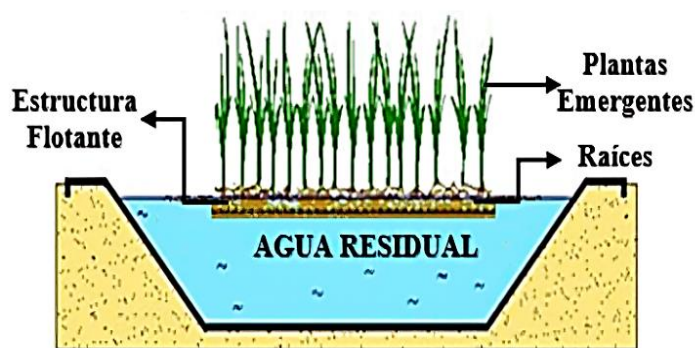


Figura 6. Humedal y raíz sumergida. Adaptado de: (Tanner, Sukias, Park, Yates & Headley, 2011).

Estos humedales están compuestos por una estructura flotante, que pueden ser de diversas formas geométricas y hechos de distintos materiales; este a su vez contiene un tapiz de vegetación de plantas, que preferiblemente estén adaptadas a la climatología del lugar, y su crecimiento morfológico se desarrolle mediante un sustrato, lo cual el tejido radicular de las plantas tiene pleno o parcial contacto con el agua a tratar (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011). Este es el sistema que se implementó en el presente estudio.

5.3.1.5 Sistemas híbridos.

Estos sistemas, son la combinación entre dos humedales contruidos que están separados por compartimientos secuencial, proporcionando mayor eficiencia de remoción de los contaminantes contenidos en aguas residuales. Los sistemas híbridos más habituales son los compuestos por

humedales subsuperficiales de flujo vertical, seguido de flujo horizontal, sin embargo, también se han implementado humedales subsuperficiales combinados con humedales superficial con macrófitas flotantes al final del tratamiento (Rabat Blázquez, 2016).

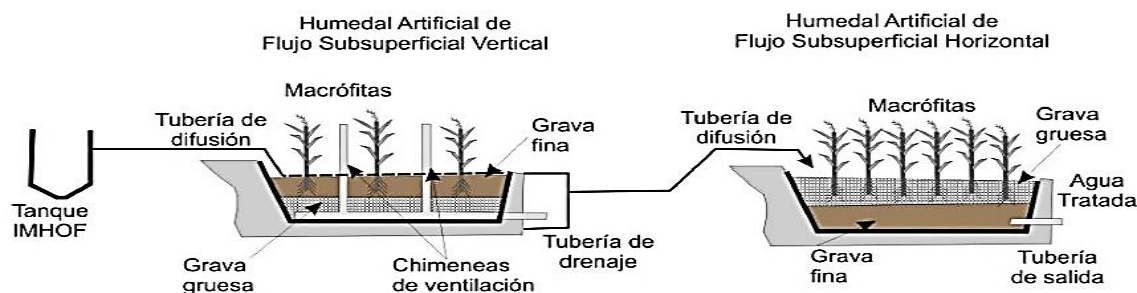


Figura 8. Sistema de humedales híbridos. Adaptado de: (Rabat Blázquez, 2016).

5.3.2 Principales componentes de un humedal artificial.

5.3.2.1 Agua residual doméstica (ARD).

El ARD al igual que otros tipos de aguas residuales, son aquellas que aportan los nutrientes para el crecimiento de la vegetación a implementar en los humedales artificiales (CENTA, 2008). De acuerdo a la normatividad colombiana Resolución 0631 del 2015, El ARD se define como la procedente de hogares, industrias, comercios o servicios, que corresponda a actividades como:

- Descarga de los retretes y servicios sanitarios.
- Descargas de los sistemas de aseo personal, cocinas, lavado de paredes, pisos y ropa. (No hacen parte los servicios de lavandería industrial).

A partir de lo anterior, se establecen valores permisibles para los vertimiento puntuales de ARD que corresponden a: DBO_5 : 90 mg/L O_2 ; DQO : 200 mg/L O_2 ; SST: 100 mg/L; pH: 6-9 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

5.3.2.2 Sustrato o medio poroso.

El sustrato es el medio de soporte que sirve para el enraizamiento de la vegetación, permite la fijación de microorganismos (biopelícula), y funciona como material filtrante durante procesos físicos y como material adsorbente en procesos químicos, reduciendo la carga contaminante presente en el agua a tratar (Rabat Blázquez, 2016). El sustrato está compuesto por capas de materiales como tierra negra o abono, grava, gravilla y arena (Pérez, Enciso, Del prado, & Castañón, 2017); para el caso de los humedales subsuperficiales el sustrato tiene una profundidad

entre 0,3 a 0,8 m (Kadlec & Wallace, 2009) y para los humedales de flujo libre con sistemas de flotación, la profundidad oscila entre 0,15 a 0,3 m (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010).

5.3.2.3 Vegetación.

Las plantas (macrófitas), son las encargadas de colonizar los humedales artificiales y de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de los tallos y hojas, hasta las raíces y rizomas, oxigenando el sustrato (si la planta lo requiere), además son el soporte de la población microbiana que a su vez interactúan con el sustrato y las raíces de las plantas, con el fin de reducir la materia orgánica y nutrientes presentes en el agua a tratar (Kadlec & Wallace, 2009).

5.3.2.4 Microorganismos.

Los microorganismos se albergan debajo del sustrato y de las raíces de las plantas, creándose una biopelícula, estos generan reacciones físicas, químicas y biológicas que reducen la carga contaminante contenida en el agua residual mejorando la calidad del agua, transformando los nutrientes y el material orgánico, en sustancias que son asimiladas por los mismos microorganismos para el desarrollo de procesos fisiológicos asociados a las plantas, tales como nutrición, fotosíntesis, metabolismo y transpiración, permitiendo un óptimo crecimiento de ambos actores (simbiosis) (Thangavel & Subhram, 2004).

5.3.3 Parámetros a estudiar.

5.3.3.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

La DBO es la cantidad de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para oxidar biológicamente la materia orgánica presente en el agua residual. Se determina generalmente por métodos como Oxitop y Winkler, después del transcurso de cinco días de la prueba, se consume aproximadamente el 70% de las sustancias biodegradables. (Martínez, 2014)

5.3.3.2 Sólidos Suspendedos Totales (SST).

Estos sólidos son material orgánico particulado que proviene de material coloidal que se mantiene en suspensión en una cierta cantidad de agua y a su vez causan turbidez; son medidos gravimétricamente después de la filtración y secado a 105 °C. Los SST que ingresan a los humedales artificiales, son degradados biológicamente mediante la actividad microbiana asociada al sustrato y a la vegetación. (Kadlec & Wallace, 2009)

5.3.3.3. Fosfatos ($P-PO_4$).

La presencia de los fosfatos dentro de los ecosistemas acuáticos, son calificados como contaminantes debido a que contribuyen a la proliferación de algas y plantas acuáticas, que a su vez aportan a la eutrofización y a la degradación microbiana, aumentando la DBO, afectando nocivamente la fauna y al cuerpo de agua (López & Echeverri, 2020). Los fosfatos son la formación de sales que componen el ácido fosfórico y se pueden encontrar como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos; la presencia de los anteriores se debe al uso de detergentes, residuos de alimentos, por escorrentía proveniente de jardines con abonos minerales, y por descomposición de pesticidas a base de fósforo. La ausencia de estos compuestos limita el crecimiento de la vegetación (Shaver, Horner, May, & Ridley, 2007) .

5.3.3.4 Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).

Es un indicador que determina la sumatoria de las concentraciones de nitrógeno orgánico (aminoácidos, aminos y proteínas) y nitrógeno amoniacal, dentro de una muestra de agua residual. El NTK se determina por medio de una digestión con ebullición dentro de un medio ácido y un catalizador, y mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitrógeno inorgánico (nitritos, nitratos y nitrógeno gaseoso) (IDEAM, 2007), puede ser cuantificado por métodos de colorimetría, espectrofotometría, electrometría. El estudio de este parámetro es importante para indicar el grado de eutrofización en cuerpos hídricos.

5.3.3.5 Nitritos (NO_2).

Los nitritos son el resultado de la actividad microbiana acuática, que oxida el nitrógeno amoniacal, y los transforma en NO_2 . La presencia de este compuesto al igual que el nitrato en ARDs, se debe a presencia de la materia fecal de animales o de seres humanos. En altas concentraciones es cancerígeno no solo para las personas sino también para la vida acuática (Tchobanoglous, Burton, & Inc. Staff Metcalf, 2003).

5.3.3.6 Nitratos (NO_3).

Los nitratos son el resultado de la actividad microbiana que oxida biológicamente los NO_2 que da lugar a la aparición de este compuesto, este proceso se llama nitrificación; a su vez transforman los NO_3 en materia orgánica y energía para el consumo de los microorganismos y para las plantas; parte de los NO_3 que se convierten en gas de nitrógeno, son liberados a la atmósfera y este proceso

se le denomina desnitrificación (Vidal & Hormazábal, 2018). Los NO_3 en exceso, al igual que los fosfatos pueden llegar a causar desequilibrios ecológicos aportando a la eutrofización y aumentando los niveles de oxígeno en el agua, además altas concentraciones de estos compuestos son tóxicas para la vida acuática (Martínez, 2014).

5.3.3.7 Nitrógeno Total (NT).

El nitrógeno total, es la sumatoria de todas las formas de nitrógeno que se encuentran dentro de una muestra de agua, pueden ser orgánicos como aminoácidos, aminos y proteínas, y los inorgánicos corresponden al nitrato, nitrito y amoníaco ionizado. El NT es importante para el desarrollo de la vida vegetal. (DANE, 2011)

5.3.3.8 pH.

Es la medida de concentración del ión de hidrógeno en el agua, determina el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Este parámetro tiene un rango entre 0 a 14, un valor 7 es un pH neutral, los valores inferiores a este presentan acidez y los superiores alcalinidad. El pH adecuado para la existencia de la mayoría de la vida biológica se da en rangos entre 6,5 a 8,5 (Romero, 2004).

5.3.3.9 Conductividad Eléctrica.

Es la medida de la capacidad del agua para transportar electricidad mediante iones presentes en la solución, lo cual, a mayores concentraciones de iones, mayor será el aumento de la conductividad, lo que indica la presencia de sales disueltas en la sustancia (Delgadillo, Pérez, Camacho, & Andrade, 2010).

5.3.3.10 Oxígeno disuelto (OD).

Es la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua que sirve para determinar la calidad del agua. Los valores de OD que se encuentren entre 5-12 mg/L, son característicos de una buena calidad del agua, permitiendo el desarrollo de la vida acuática, los valores inferiores son productos generalmente de eutrofización del cuerpo hídrico que causa asfixia o hasta la muerte de los seres vivos acuáticos, los superiores a 12 mg/L indica que el cuerpo hídrico está saturada, esto genera burbujas de gas dentro del torrente sanguíneo de los peces, causando diversas enfermedades que pueden conllevar hasta su muerte (González & Perilla, 2015).

5.4 Marco Legal

Para el desarrollo de la presente propuesta de investigación, se enmarcará en la normatividad colombiana que se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 1. *Marco Legal*.

Normatividad	Descripción
Constitución Política de Colombia 1991 (Asamblea Nacional Constituyente de Colombia, 1991).	Artículo 8: Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación. Derechos colectivos y del Ambiente. Artículo 79: Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Artículo 80: El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993)	Artículo 5º: El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, entre sus funciones, debe regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente, con el fin de controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional.
Resolución 631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)	Artículo 2º: Establece el término de ARDs, como las procedentes de los hogares, industriales, comerciales o de servicios, que correspondan a actividades como: Descarga de los retretes y servicios sanitarios; Descargas de los sistemas de aseo personal, cocinas, lavado de paredes, pisos y ropa. (No hacen parte los servicios de lavandería industrial). Artículo 8º: Se establecen los valores permisibles para el vertimiento de ARDs que corresponden a: DBO₅: 90 mg/L O₂; DQO: 200 mg/L O₂; SST: 100 mg/L; pH: 6-9
Resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)	La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño - construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueductos, alcantarillados y de aseo. Artículo 180: Sección 3, se describen las características de humedales artificiales que deberán tener en cuenta aspectos tales como: caudal, características del afluente, tipo de vegetación que se va a emplear y evapotranspiración. El TRH generalmente está en 5 días, las profundidades para sistemas de flujo superficial de 0,30 a 0,60 m y 0,1 a 0,45 m para flujo sumergido. Se deberá realizar impermeabilización del suelo mediante una capa de arcilla o empleando geomembranas.

Tabla 1. (Continuación).

Título J. Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural del - RAS (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010)	Propone distintas alternativas para el tratamiento de ARDs provenientes de viviendas dispersas o nucleadas, en los que se fijan los criterios básicos y las buenas prácticas de ingeniería que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, diseño, implementación, construcción, supervisión, operación, mantenimiento, entre otros, con el fin de aplicarlos en tecnologías costo efectivas y sostenibles, en los que se consideran los humedales artificiales como alternativas para el tratamiento de ARDs a bajo costo.
Norma Técnica Colombiana ISO 5667-3 (INCONTEC, 2012)	Directrices para la Preservación y Manejo de las Muestras: Esta norma suministra los pasos generales sobre las precauciones que se deben tomar para preservar y transportar muestras de agua. Son adecuadas para tipos de muestra puntual o compuesta, que por condiciones no se puede analizar en el sitio y tiene que ser transportada para analizarla en el laboratorio.
Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-10 (INCONTEC, 1995)	Muestreo de ARDs: Esta norma apunta a determinar el tipo y forma de muestreo con el fin de identificar mediante análisis fisicoquímicos, la concentración o carga de contaminantes en una corriente de ARDs, generalmente durante un período de tiempo prolongado, por ejemplo, para verificar el cumplimiento con una norma, proporcionar datos sobre la eficiencia del proceso de una unidad o suministrar datos sobre carga.

Nota. Normatividad aplicable al proyecto. Por González & Hernández, 2020.

6. Metodología

Este estudio contó con una metodología del tipo experimental de campo. El tiempo empleado para la realización del presente estudio fue de 5 meses, lo cual el primer mes se realizó la adaptación de las especies ornamentales; en el segundo mes se dio el inicio a la operación de los sistemas de humedales flotantes en el tratamiento de las ARDs, el tiempo restante fue dedicado en el análisis de los datos obtenidos y en la elaboración del documento final. Para llevar a cabo el estudio se construyeron seis humedales flotantes a escala piloto, con el fin de evaluar la remoción de la DBO_5 , SST y Nutrientes como P-PO_4 , NT (NTK, NO_3 y NO_2), usando dos plantas ornamentales como agentes de fitorremediación. Además de los anteriores parámetros se midió OD, pH, temperatura, conductividad y el crecimiento de las plantas, con el fin de observar el desempeño de las especies y generar recomendaciones técnicas sobre la posible implementación a escala real en las dos lagunas de estabilización presentes en el Cantón Militar de Apiay.

Para el análisis de los parámetros de estudio se tomó una muestra antes y después del tratamiento, como se expresa en la Tabla 3. A partir de los TRH y el tipo de especie, se desarrollaron 2 rondas divididas en 6 tratamientos por duplicado, por lo que se obtuvo un total de 18 muestras (se incluyeron dos muestras del ARD saliente de las lagunas de estabilización para comparar los sistemas); los procedimientos de muestreo, conservación y manejo de las muestras fueron de acuerdo a lo establecido en las NTC-ISO 5667-2, NTC-ISO 5667-3 NTC 5667-10.

6.1 Fase I: Identificación de individuos de plantas ornamentales para los humedales flotantes

6.1.1 Construcción de vivero.

En esta actividad se transportaron las plántulas al área de estudio con el fin de que estas se adapten. Se instalaron polisombras con el fin de evitar una insolación directa hacia las plantas ornamentales en etapa de crecimiento, a una altura de 2 metros y una cobertura de 15 m^2 . Para la protección del vivero contra animales, se encerró el área de estudio con cercas de plástico.



Figura 9. Vivero de adaptación. Por González & Hernández, 2020.

6.1.2 Adaptación.

Se adquirieron 14 plantas de la especie *Heliconia psittacorum* y 13 plantas de *Alpinia purpurata*, ambas especies con una edad aproximada de 4 meses (momento en el cual el desarrollo foliar permite una mayor resistencia a diversas condiciones), cada una con escasa o nula floración, con una altura entre 20 cm a 55 cm; estas fueron regadas día de por medio directamente al sustrato, con 1 L por planta de la solución de ARD con pretratamiento (Ver Anexo 2), proveniente de la comunidad del Cantón Militar de Apiay durante 4 semanas, de acuerdo en lo indicado en la Tabla 2. El aumento gradual del ARD contenida en solución, se realizó con el fin de adaptar progresivamente las plantas al ARD, evitando posibles impactos agresivos en el desarrollo de estas.

Tabla 2. *Aumento Gradual de ARD Contenida en Solución.*

Semana	Solución
1	30% ARD y 70% agua superficial
2	50% ARD y 50% agua superficial
3	70% ARD y 30% agua superficial
4	100% ARD

Nota. Porcentajes de riego del ARD. Por González & Hernández, 2020.

6.1.3 Medición de características morfológicas.

Inicialmente se enumeraron las plantas y se realizó la medición del crecimiento de las plantas mediante una cinta métrica, registrando los datos en planillas (Ver Anexo 3). Las variables que se tuvieron en cuenta fueron:

- 1) Altura promedio de los tallos por planta: Cada planta presentó entre 3 a 6 tallos para las dos especies desde el sustrato hasta la punta de los tallos.
- 2) Número de flores y estado general: Marchitamiento, verdes y amarillamiento.

Las mediciones se realizaron en el inicio de la adaptación, al inicio de la primera ronda de tratamientos/fin de adaptación y al final de la segunda ronda de tratamientos. Después de las 4 semanas de adaptación al clima y al riego del ARD, se identificaron las plantas con mayor desarrollo altura y de mejor estado; posteriormente se transfirieron en los humedales.

6.2 Fase II: Desarrollo del prototipo de humedal flotante

6.2.1 Construcción de los humedales flotantes a escala piloto.

Se construyeron seis humedales flotantes a escala piloto. La densidad fue de 4 plantas/0,8 m², para ello se siguió el diseño realizado en el estudio “Diseño y Construcción de Humedales para el Tratamiento de Aguas” realizado por (Arias, 2018), de la Universidad de Aarhus, en Dinamarca en el 2018.

6.2.1.1 Excavación.

Mediante una retroexcavadora se realizó la excavación para cada uno de los humedales y posteriormente se perfilaron los espacios que ocuparían los humedales flotantes (Ver Anexo 4).

6.2.1.2 Dimensiones.

Para cada uno de los seis humedales flotantes las dimensiones fueron de 1 m de largo, 0,8 m de ancho y 0,7 m de profundidad, con un volumen de 560 L para cada humedal artificial, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 10. Dimensiones de los humedales flotantes. Por González & Hernández, 2020.

6.2.1.3 Recubrimiento.

El recubrimiento de los humedales se realizó por medio de un geotextil calibre 8 mm, con el fin de evitar la infiltración del ARD en el suelo (Ver Anexo 5).

6.2.1.4 Construcción de balsas.

Las seis balsas sirvieron como soportes de las plantas ornamentales y del sustrato; se adquirieron en plástico con dimensiones de 0,53 m de largo, 0,35 m de ancho y 0,22 m de altura. En cada balsa se adaptó 10 botellas plásticas, cada una de 3 litros y con 0,12 m de ancho, siendo los “flotadores”, teniendo las balsas un área total de 0,31 m² cada una. En la parte interna de la base y los costados de la balsa, se adaptó un plástico con el fin de contener la grava, y evitar que el agua a tratar entre por los lados de la balsa. En el medio de la capa de arena arcillosa y grava, se instaló tela quirúrgica (como se muestra en la *Figura 11*), permitiendo la entrada del agua residual pero no la salida del sustrato.

6.2.1.4.1 Sustrato.

En la base de las balsas, el sustrato estuvo compuesto primeramente por una capa de grava $\frac{3}{4}$, luego una capa de arena arcillosa y por último tierra abonada.

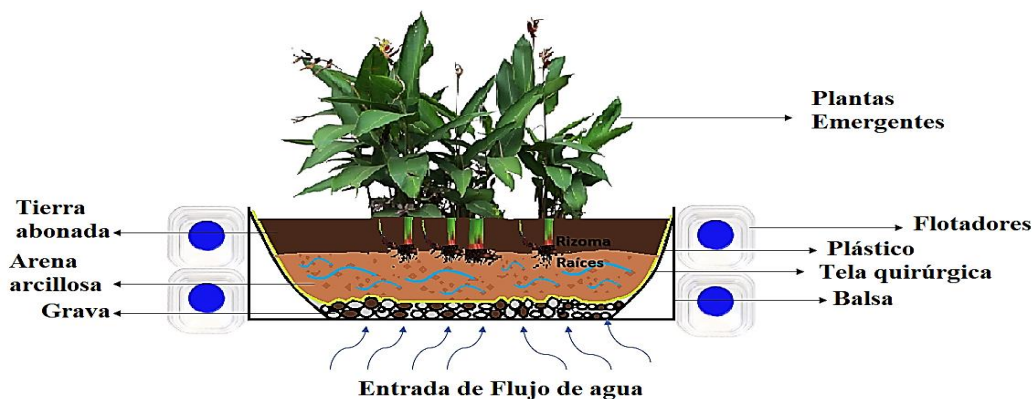


Figura 11. Montaje de la balsa flotante. Por González & Hernández, 2020.

6.2.1.5 Captación y vaciado del agua residual.

Para el llenado de los humedales, se captó el ARD tomada después del pretratamiento de la PTAR y fue almacenada en un tanque plástico, posteriormente transportada hacia los humedales a escala piloto para el inicio de los tratamientos, lo cual al final de cada TRH, se vació mediante una

electrobomba de $\frac{1}{2}$ Hp, y se volvió a llenar los humedales de inmediato para realizar el tratamiento duplicado al final de este, la manera del vaciado fue similar (Ver Anexo 6).

6.2.2 Tiempos de Retención Hidráulica (TRH).

Debido a la escasa información en la implementación de estas especies ornamentales en el tratamiento de ARDs mediante humedales flotantes en la ciudad de Villavicencio, se establecieron unos TRH de 4, 6 y 8 días, cada uno para dos humedales flotantes con diferente especie, con el fin de analizar en cuál tiempo se obtiene mayor remoción de DBO, SST y Nutrientes. (Ver Tabla 3).



Nota. Las que se encuentran al lado izq. *Alpinia purpurata* y al lado derecho *Heliconia psittacorum*.

Figura 12. Humedales superficiales con manto flotante. Por González & Hernández, 2020.

6.2.3 Toma de muestras.

Se realizaron jornadas de muestreo al inicio y al final de los tratamientos, lo cual corresponden a 16 muestras, y a la salida de cada una de las dos lagunas de estabilización, para un total de 18 muestras, durante 1 mes, con el fin de determinar la concentración de entrada y salida de cada parámetro, realizando una toma de 1 L de ARD. La toma de muestra se realizó a 15 cm de profundidad en cada humedal y se preservaron de acuerdo a lo indicado en la NTC-ISO 5667-3 (IDEAM, 2007).

Tabla 3. TRH para el tratamiento por cada humedal y tomas de muestras.

Medición y determinación de parámetros de Entrada	Rondas	Toma de muestra de Entrada (Se tomó 1 L de muestra para cada Entrada)	Humedal – Especie	TRH (días)	Toma de muestra de Salida (Se tomó 1 L de muestra para cada Salida)	Medición y determinación de parámetros de Salida
Temperatura, conductividad, OD, pH, NTK, NO ₂ , NO ₃ , NT, P-PO ₄ , DBO ₅ y SST	Primera ronda de tratamiento	Se consideró una entrada general de ARD para todos los HF	H1 <i>H.p.</i>	4	Al finalizar cada TRH de la primera ronda, se realiza la toma de muestras de salida de cada HF y se vacían	Temperatura, conductividad, OD, pH, NTK, NO ₂ , NO ₃ , NT, P-PO ₄ , DBO ₅ y SST
			H1 <i>A.p.</i>	6		
			H2 <i>H.p.</i> H2 <i>A.p.</i> H3 <i>H.p.</i>	8		
	Segunda ronda de tratamiento	Al culminar el vaciado, se llena de inmediato los HF, para lo cual cada HF con el mismo TRH tienen la misma C _e de acuerdo a la finalización de los TRH de 4, 6 y 8 días de la primera ronda.	H3 <i>A.p.</i>	4	Al finalizar cada TRH de la segunda ronda, se realiza la toma de muestra de cada salida y se vacían los HF	
			H1 <i>H.p.</i> H1 <i>A.p.</i> H2 <i>H.p.</i> H2 <i>A.p.</i>	6		
			H3 <i>H.p.</i> H3 <i>A.p.</i> Lagunas	8		

Nota. División de las actividades desarrolladas de acuerdo al TRH en los humedales flotantes. H# = Número de Humedal; *H.p.* = *Heliconia psittacorum*; *A.p.* = *Alpinia Purpurata*; HF = Humedal Flotante; C_e = Concentración de entrada. Por González & Hernández, 2020.

6.2.4 Determinación de Concentraciones.

Las concentraciones de entrada son de acuerdo a las que poseían el ARD proveniente del pretratamiento. En la entrada como en la salida se determinó concentraciones de DBO₅, SST, P-PO₄, NTK, NT, NO₃ y NO₂, de igual forma se realizaron mediciones de pH, OD y conductividad. Los métodos para las mediciones fueron los siguientes:

Tabla 4. *Métodos de Mediciones para los Parámetros.*

Método	Parámetro	Descripción
Winkler	DBO ₅ (mg/L)	Se realizaron 3 pruebas de DBO₅ para cada una de las muestras, se tomó 15 ml de ARD que posteriormente fue depositada a cada una de las botellas Winkler, junto la mezcla entre el agua destilada 1 L y las sustancias tampón (1 ml por cada sustancia). Se realizó la lectura de OD desde el momento en la realización de la prueba, y pasados 5 días. El valor de DBO₅ se determinó mediante la ecuación (IDEAM, 2020): $\left(\frac{OD_{\text{inicial}} - OD_{\text{pasados 5 días}}}{\text{Volumen de ARD}} \right) * \text{Volumen de la botella Winkler}$ La determinación de DBO₅ para cada humedal, se realizó mediante el promedio del resultado de DBO₅ de las 3 pruebas por muestra de ARD.
		
Gravimétrico	SST (mg/L)	Inicialmente se realizó el secado de las cápsulas con el papel filtro mediante el horno a 105 °C por 1 hora, después se pesaron dando como resultado los valores iniciales. Posteriormente se realizó el montaje del procedimiento y se realizó la mezcla de 25 ml de ARD y 75 ml de agua destilada. Se depositó 20 ml de la mezcla anterior sobre el papel filtro. Después de la filtración se llevó el papel filtro nuevamente al horno a 105°C. Pasados 24 horas se saca el papel filtro y es pesado nuevamente (Peso final). El valor a partir de la siguiente ecuación corresponde los SST de la muestra (IDEAM, 2020): $\frac{(\text{Peso final} - \text{Peso inicial})}{\text{Volumen de la muestra}}$
		
Test Espectrofotométrico	Nitratos (NO ₃) (mg/L)	Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrato HR 2, se esperó 20 minutos para la reacción de color. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.
		
Test Espectrofotométrico	Nitritos (NO ₂) (mg/L)	Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrito, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.

Tabla 4. (Continuación).

	Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) (mg/L)	Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrógeno total Kit HACH 2, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.
		
	Ortofosfatos (P-PO ₄) (mg/L)	Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Fosfato RGT. F10 ml, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 800 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.
Multiparámetro (Lectura directa)	Conductividad (s/m), pH, Oxígeno disuelto OD (mg/L), Temperatura (°C)	Se introdujeron las tres sondas del multiparámetro, al recipiente que contenía las muestras de agua residual. Se midieron antes de la prueba de DBO y pasados los 5 días.
		

Nota. La determinación de la concentración de NO₃, NO₂, NTK y P-PO₄, se realizó a partir de curvas patrón para cada compuesto (Ver Anexo 7). Para la determinación de Nitrógeno Total se realizó la sumatoria de las concentraciones de NO₃, NO₂ y NTK de cada muestra de ARD. Por González & Hernández, 2020.

6.3 Fase III: Análisis de Resultados

En esta fase se analizó los porcentajes de remoción de contaminantes a partir de los humedales flotantes a escala piloto, con las diferentes especies implementadas y diferentes TRH.

6.3.1 Análisis de remoción.

El porcentaje obtenido fue la concentración removida por las plantas ornamentales. Este porcentaje se obtuvo a partir de la siguiente ecuación, que es aplicada para la determinación de los parámetros de DBO₅, SST, P-PO₄ y NT.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_e - C_s)}{C_e} * 100$$

C_e = Concentración Entrada en mg/L; C_s = Concentración de salida en mg/L

Para la comparación proporcional de las eficiencias de remoción de los contaminantes removidos/m² entre las lagunas y los humedales flotantes, se determinó mediante la carga orgánica superficial (COS).

$$\text{COS} \left(\frac{\text{kg contaminante}}{\text{m}^2 * \text{d}} \right) = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) * \text{contaminante} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Área} (\text{m}^2)}$$

6.3.2 Tabulación y análisis estadístico de datos.

La base de datos de los resultados se realizó por medio de **Microsoft Excel** y posteriormente se realizó un análisis descriptivo y correlación de Pearson por medio de **SPSS statistics**, que permitió analizar y comparar el comportamiento de las variables en la remoción de contaminantes a partir de las plantas ornamentales.

7. Resultados y Análisis de Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos después del procesamiento de las muestras tomadas en las dos rondas de tratamientos, fue necesario analizar los parámetros fisicoquímicos del ARD con y sin tratamiento; adicional a esto se realizó un control del crecimiento de las plantas implementadas en el proyecto. La investigación en campo se realizó durante la época seca en la ciudad de Villavicencio, a partir de los 15 días de enero hasta mediados del mes de marzo, por consiguiente, la influencia de las precipitaciones sobre las plantas y la concentración del ARD, no afectaron los resultados y los análisis de estos. Las jornadas de toma de muestras de agua, se realizaron en un intervalo de 11:00 a.m. a 11:30 a.m., esto para evitar una variación significativa en los datos de remoción obtenidos.

7.1 Adaptación y control del crecimiento de las plantas.

Al inicio del período de adaptación, las 14 plantas de la especie *Heliconia psittacorum* presentaban una altura promedio de 37,35 cm; la menor altura fue de 30,75 cm y la mayor fue de 42,25 cm, con un total de 7 flores. En las 13 plantas de la especie *Alpinia purpurata*, la altura promedio general fue de 38,45 cm, donde la menor altura presentada fue de 30,64 cm y la mayor de 45,75 cm, con un total de 6 flores. Ambas especies estaban en buen estado (Hojas y tallos verdes).

Al final del período de adaptación, las plantas 5 y 12 de *Heliconia psittacorum* y la planta 8 de *Alpinia purpurata*, presentaron menor crecimiento a comparación de las otras plantas y fueron las mismas que se identificaron al inicio de tener menor altura, además se observó mayor número de hojas con manchas amarillas a comparación de los otros ejemplares que presentaron mayor crecimiento, siendo un indicio a que estas plantas no se adaptaron principalmente a las soluciones del agua residual, por lo cual fueron excluidas en la implementación a los humedales flotantes. Cabe resaltar que se usó un plaguicida durante las 4 semanas de adaptación, concluyendo que el amarillamiento no es atribuible a plagas.



Figura 13. Amarillamiento de hojas de la especie *Alpinia purpurata*. Por González & Hernández, 2020.

Tabla 5. Medición inicial de las plantas ornamentales.

Inicio de la Adaptación (<i>Heliconia psittacorum</i>)				Inicio de la Adaptación (<i>Alpinia purpurata</i>)			
Planta	Altura promedio de tallos por planta (cm)	Flores	Estado general de la planta	Planta	Altura promedio de tallos por planta (cm)	Flores	Estado general de la planta
1	37,25	1	Hojas y tallos verdes	1	44	0	Hojas y tallos verdes
2	38,00	1		2	45,25	3	
3	38,25	1		3	37	2	
4	38,50	0		4	37,25	1	
5	33,50	1		5	41,5	0	
6	41,00	0		6	42,45	0	
7	40,25	0		7	45,75	0	
8	36,75	0		8	30,64	0	
9	42,25	0		9	32,5	0	
10	35,75	2		10	33,75	0	
11	40,75	1		11	35,2	0	
12	30,75	0		12	43,25	0	
13	33,75	0		13	42,18	0	
14	36,25	0					
Promedio General (cm)	37,35	-	-	Promedio General (cm)	39,68	-	-
Total de flores	-	7		Total de flores	-	6	

Nota. Los valores que se encuentran en **negrita roja**, corresponden a los datos de las plantas que registraron menor altura al inicio del período de adaptación. Por González & Hernández, 2020.

Para la implementación de los dos tipos de macrófitas, se transfirieron las plantas con alturas promedio similares, con el fin de evitar incurrir en otra variable dentro de la experimentación. Los datos de la altura promedio general de las especies, corresponden únicamente a las plantas

seleccionadas e implementadas en los humedales flotantes, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Control del crecimiento y estado de las plantas implementadas en los humedales.

		Crecimiento de las plantas		
Tipo de Planta		Inicio de adaptación	Fin de adaptación/Inicio de tratamiento	Final de tratamiento
<i>Heliconia psittacorum</i>	Altura promedio general (cm)	37,49	39,46	40,86
	Número de flores	7,00	14,00	20,00
	Estado general	Hojas y tallos verdes	Amarillamiento de hojas en 3 plantas	Amarillamiento de hojas en 3 plantas
<i>Alpinia purpurata</i>	Altura promedio general (cm)	39,54	40,75	41,66
	Número de flores	6,00	12,00	15,00
	Estado general	Hojas y tallos verdes	Amarillamiento de hojas en 6 plantas	Amarillamiento de hojas en 5 plantas

Nota. Datos obtenidos en el control del crecimiento de la plata. Por González & Hernández, 2020.

La especie *Heliconia psittacorum* demostró un mejor estado general a diferencia de la *Alpinia purpurata*, debido a que tuvo menor cantidad de plantas con presencia de amarillamiento, de acuerdo a la Tabla 6. La *Alpinia purpurata* al final de la adaptación/inicio de tratamiento, presentó 6 plantas con ocurrencia de amarillamiento y al final de tratamiento se redujo a 5.

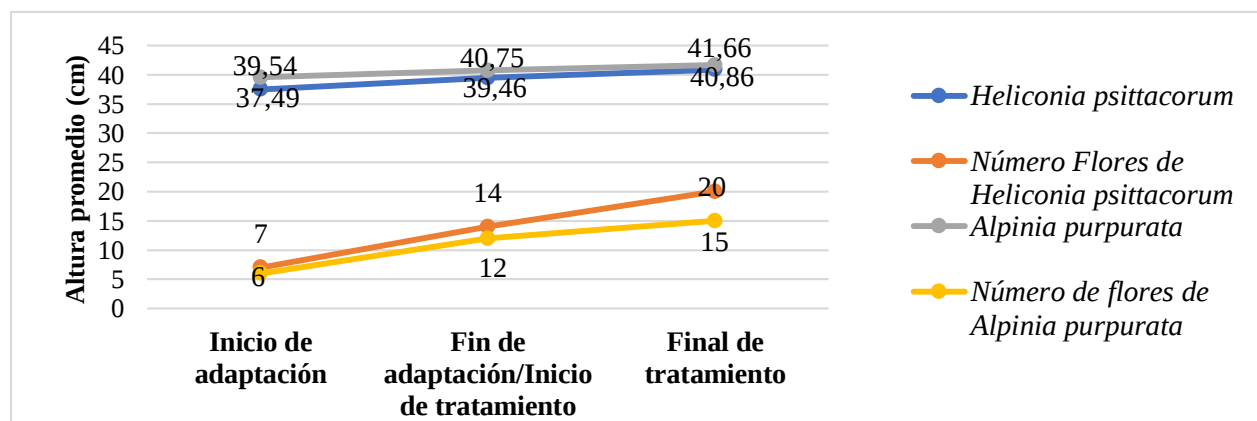


Figura 14. Gráfica del crecimiento promedio de las plantas de cada medición. Por González & Hernández, 2020.

En la Figura 14, se puede observar que la altura de la especie *Alpinia purpurata*, siempre fue mayor al de la *Heliconia psittacorum*, sin embargo, presentó menor rapidez en el crecimiento en comparación de la otra especie, debido a que la diferencia de altura promedio general desde el inicio de la adaptación hasta el fin del tratamiento para la ginger roja fue de 2,12 cm y para la

Heliconia psittacorum fue de 3,37 cm. De igual forma, a lo largo del período que comprende desde el inicio hasta el fin de los tratamientos, la *Heliconia psittacorum* presentó un mayor crecimiento promedio general de 1,4 cm, comparada con el crecimiento de 0,91 cm de la que la especie *Alpinia purpurata*, y presentó mayor número de flores con un total de 20 al final de tratamiento.

7.2 Influencia del pH, conductividad y temperatura en el ARD utilizada

Los valores de pH del agua residual obtenidos en las dos rondas de tratamientos, oscilan entre 7,4 a 7,9, así determinando con la escala de pH, que los resultados arrojados presentan un efluente ligeramente básico. En ARDs e industriales los rangos de pH están comprendidos entre 6,5 y 8,5 las variaciones de estos intervalos normalmente son debidos a vertidos incontrolados de origen industrial (Crombet, Abalos, Rodríguez, & Pérez, 2016). Tomando como referencia la normativa colombiana (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000), los resultados obtenidos se encuentran en los rangos óptimos para el desarrollo de los microorganismos, puesto que puede generar un aumento en el proceso de reproducción, y así tener un proceso de remoción más efectivo.

Las condiciones climáticas, principalmente la incidencia de luz solar y temperatura ambiente, influyen en la temperatura del agua. Algunos estudios muestran que los valores de temperatura en el agua residual son indicadores tanto para el crecimiento de las plantas como para la eficiencia de remoción y que el rango de temperatura que necesitan las bacterias para el desarrollo de la actividad metabólica para la degradación de la materia orgánica, oscila entre 20° a 30° C. Las 18 muestras tomadas durante la investigación, registraron un rango de temperatura de 20° a 26°C, en el cual durante la primera ronda de tratamiento la temperatura oscilo entre 20°C a 24°C y en la segunda ronda entre 23°C a 26°C, lo cual tiene una relación con los resultados de oxígeno disuelto; la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD), está íntimamente relacionada con la temperatura; si el agua se encuentra en temperaturas elevadas, es menor la presencia de oxígeno (Beltrán, 2013).

De acuerdo a la revisión bibliográfica, la conductividad para el vertimiento puntual de ARD sin fines de reúso, es una variable que no está regulada en la normatividad colombiana.

Tabla 7. Resultados de conductividad en la entrada y salida de los humedales flotantes.

	TRH (días)	Humedal-Especie	Promedio entrada	Promedio de salida
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	187,06	182,20
		H1 <i>A.p.</i>		185,11
	6	H2 <i>H.p.</i>		258,00
		H2 <i>A.p.</i>		261,70
	8	H3 <i>H.p.</i>		221,71
		H3 <i>A.p.</i>		213,30
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	175,06	211,01
		H1 <i>A.p.</i>		213,02
	6	H2 <i>H.p.</i>	275,66	285,70
		H2 <i>A.p.</i>		286,32
	8	H3 <i>H.p.</i>	212,33	330,31
		H3 <i>A.p.</i>		332,70

Nota. Conductividad de los Humedales flotantes. *H.p.* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

Los valores promedios de la conductividad en la primera ronda, se evidenciaron un promedio superior en las dos especies para el TRH de 6 días y en la segunda ronda se presentó un incremento notorio en el TRH de 8 días, esto suele suceder, ya que en el proceso fotosintético de las plantas abastecen gran cantidad de agua, haciendo que las sales presentes en el agua se concentren y así incrementen la conductividad (Monge, 2020), adicionalmente hay que considerar el período de verano en que se desarrolló el estudio.

7.3 Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En la siguiente tabla, se aprecia que los porcentajes de remoción de DBO₅ en la segunda ronda de tratamientos fueron mayores que los de la primera ronda, esto se relaciona al aumento de las concentraciones de entrada en la réplica, y que las balsas tuvieron más tiempo de permanecía en el agua residual, de acuerdo a lo indicado por el estudio realizado por (Thangavel & Subhram, 2004), esto permite una mayor fijación y crecimiento de los microorganismos (biopelícula) en la estructura de soporte, permitiendo un mayor consumo de oxígeno para la degradación de sustancias orgánicas.

Tabla 8. Resultados de DBO₅ en la entrada y salida de los humedales flotantes.

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada DBO ₅ mg/L	Concentración de Salida de DBO ₅ mg/L	% de remoción de DBO ₅
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	85,49	75,98	11,13
		H1 <i>A.p.</i>		71,87	15,93
	6	H2 <i>H.p.</i>		72,14	15,62
		H2 <i>A.p.</i>		55,76	34,78
	8	H3 <i>H.p.</i>		72,32	15,40
		H3 <i>A.p.</i>		68,04	31,83
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	101,22	86,63	14,42
		H1 <i>A.p.</i>		83,48	17,53
	6	H2 <i>H.p.</i>	95,00	79,63	16,18
		H2 <i>A.p.</i>		60,66	36,14
	8	H3 <i>H.p.</i>	116,42	89,40	23,21
		H3 <i>A.p.</i>		77,05	33,82

Nota. DBO₅ de los humedales flotantes a escala piloto. *H.p.* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

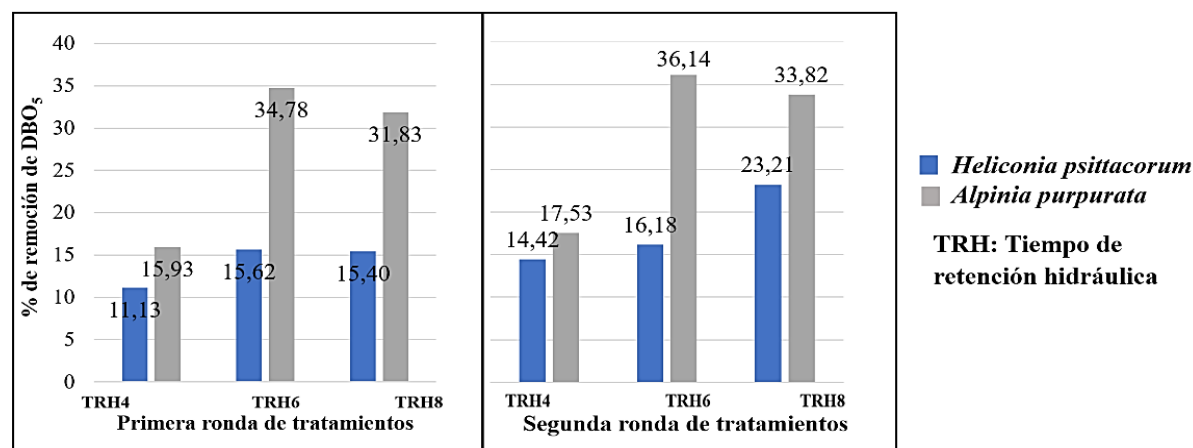


Figura 15. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de DBO₅ en los tratamientos. Por González & Hernández, 2020.

La especie *Alpinia purpurata* a comparación de la *Heliconia psittacorum*, demostró mayor remoción de DBO₅ en ambas rondas durante todos los TRH, cabe mencionar que, durante el trasplante de las plantas de las macetas a las balsas, se observó que la “ginger roja” contaba un sistema radicular más denso que la “Heliconia”, esto pudo influenciar las diferencias en remoción de DBO₅ y de los otros contaminantes en estudio. Los niveles más bajos de remoción se obtuvieron a los 4 días en ambas rondas y ambas especies. La remoción máxima tanto para la primera ronda y segunda ronda de tratamientos, fue de 34,78% y de 36,18% respectivamente, a los 6 días.

En el TRH de 8 días la especie *Alpinia purpurata* presentó una disminución con respecto a los 6 días en la primera y segunda ronda de tratamientos, de 2,95% y de 2,22%, correspondientemente. El decrecimiento puede indicar que durante este TRH los microorganismos en conjunto de las plantas, agotaron los nutrientes y el oxígeno disponible en el agua, por ende, tiende a disminuir el porcentaje de remoción (Brock, 1993) o existe la presencia de protozoos (considerados patógenos) que consumen el oxígeno para su crecimiento, sin embargo no tienen la capacidad de depurar materia orgánica (Martínez, 2014) .

Para el caso de la *Heliconia psittacorum*, en la primera ronda y segunda ronda de tratamientos, los resultados más bajos de remoción se dieron para un TRH de 4 días, con porcentajes de 11,13% y 14,42%, con una diferencia de 3,29%. En el TRH de 6 días, el porcentaje fue de 15,62% siendo el más alto durante la primera ronda, pero menor que los obtenidos por la *Alpinia purpurata*, por una diferencia de 19,16%; a los 8 días el porcentaje fue de 15,40% siendo menor al obtenido en los 6 días con una diferencia de 0,22%, y con respecto a la otra especie en comparación, fue de 16,43%. Para la segunda ronda de tratamientos, los valores de remoción de la *Heliconia psittacorum* tuvieron un crecimiento exponencial. Para esta ronda el TRH de 6 días no fue el de mayor remoción (16,18%) como el obtenido en la primera ronda, a diferencia de este, el porcentaje de más alta remoción se presentó en el día 8 con un 23,21%, esto indica que la planta tuvo una estabilización en su relación con los microorganismos e incorporo los nutrientes para el crecimiento de su biomasa y floración, a comparación de la *Alpinia purpurata*.

La razón del porque la segunda ronda de tratamiento obtuvo mayores porcentajes de remoción, se infiere a que a lo largo del período se presentó un mayor crecimiento conjunto entre las plantas y los microorganismos, siendo un indicativo que durante la primera ronda la estabilización de esta relación fue muy temprana, limitando que estos seres vivos desarrollen una simbiosis progresiva en cada uno de los humedales, dando como resultados menores resultados de consumo de oxígeno disuelto para la biodegradación de sustancias orgánicas, presentes en el ARD.

A partir de la experiencia en humedales flotantes, se encuentra el estudio con la especie *Juncus californianos* realizado por (Chavés & Mojica, 2015), donde el resultado de remoción de DBO₅ fue de 31%, lo cual son valores inferiores a comparación del máximo obtenido en el presente estudio a partir de la especie *Alpinia purpurata* con una eficiencia de 36,14% , pero fueron superiores a los obtenidos por la *Heliconia psittacorum* con un porcentaje de 23,21%; la diferencia

puede ser influenciada por la especie utilizada, y por el tipo de agua a tratar, lo cual en el estudio en comparación, el agua provenía de escorrentía urbana, presentando valores máximos de concentración de entrada de 4 mg/L de DBO₅, considerándose como bajos.

Existe otros estudios en humedales artificiales, como el realizado por (Rodríguez & Vargas, 2018), que consistió en la implementación de humedales subsuperficiales de flujo horizontal a partir de la especie *Heliconia psittacorum*, obteniendo porcentajes de remoción de DBO₅ de 86,50%, siendo mayor en un 50,36% al generado por la especie *Alpinia purpurata* y superior en un 63,21% por el obtenido por la *Heliconia psittacorum* en el presente estudio; esta superioridad se debe a que los humedales de flujo subsuperficial utilizan un volumen de sustrato mayor al utilizado en los humedales flotantes, lo cual permiten una mayor retención y degradación de contaminantes presentes en el agua residual, sin embargo el uso de esa biotecnología en cuerpos hídricos de grandes volúmenes, es muy costosa a comparación de los humedales flotantes debido al coste de mantenimiento del sistema, y de la compra y transporte de grandes cantidades de sustrato para rellenar el humedal a utilizar (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010).

De acuerdo a todos los tratamientos de este estudio, las concentraciones de salida de DBO que se obtuvieron se encuentran en un rango entre 40,44 mg/L hasta 89,40 mg/L, cumpliendo con los valores de límites permisibles expuestos en la resolución 0631 de 2015, ya que no se superan los 90 mg/L.

7.4 Comparación de porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En la siguiente tabla, se evidencia desde una comparación general, que los porcentajes de remoción de SST tienen un comportamiento similar a los obtenidos para la remoción de la DBO₅ observados en la Tabla 9, ya que los valores obtenidos en la segunda ronda de tratamientos fueron superiores a los de primera ronda, siendo directamente proporcional ambos parámetros, esto puede relacionarse de acuerdo a lo afirmado por (Martínez, 2014), que el crecimiento físico y químico de las plantas, efectúa la captura de oxígeno desde las hojas y tallos, hasta las raíces y sustrato, donde se encuentran los microorganismos que consumen el oxígeno atmosférico y el oxígeno disuelto en el agua, para la degradación de materia orgánica suspendida en el agua residual

Tabla 9. Resultados de la SST en la entrada y salida de los humedales flotantes.

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada SST mg/L	Concentración de Salida SST mg/L	% de remoción de SST
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	3000	1900	36,67
		H1 <i>A.p.</i>		1650	45,00
	6	H2 <i>H.p.</i>		1400	53,33
		H2 <i>A.p.</i>		1300	56,67
	8	H3 <i>H.p.</i>		1425	52,50
		H3 <i>A.p.</i>		1450	51,66
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	4000	2385	40,37
		H1 <i>A.p.</i>		2020	49,50
	6	H2 <i>H.p.</i>	6695	2500	62,66
		H2 <i>A.p.</i>		2550	61,91
	8	H3 <i>H.p.</i>	3230	1450	55,10
		H3 <i>A.p.</i>		1400	56,65

Nota. SST de los humedales flotantes a escala piloto. *H* (Humedal), *H.p* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

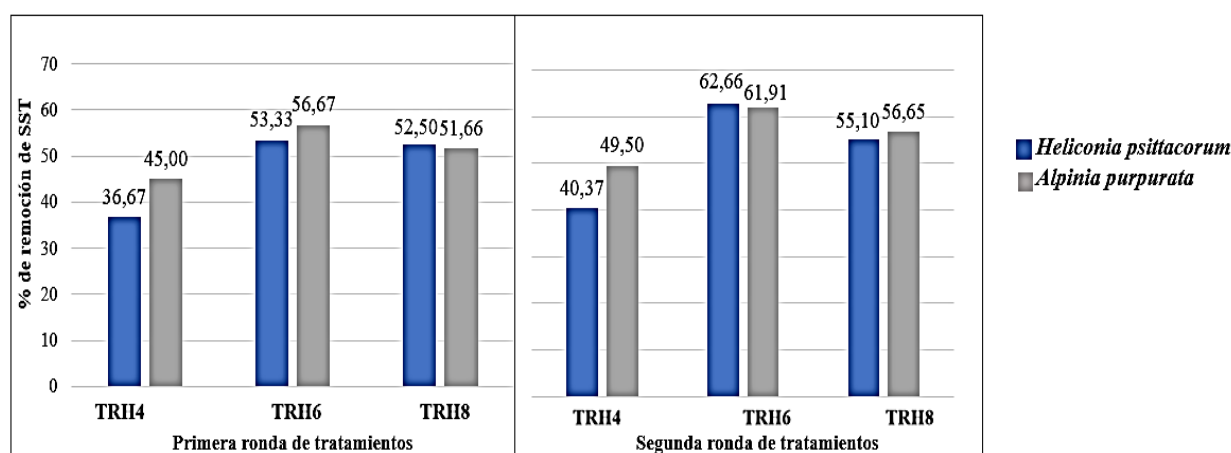


Figura 16. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de SST en los tratamientos. Por González & Hernández, 2020.

En la primera ronda de tratamientos en los TRH de 4 y 6 días, la especie *Alpinia purpurata* demostró mayor remoción de SST comparada con la *Heliconia psittacorum* con una diferencia de 8,33% y 3,34%, respectivamente a cada día de tratamiento; para el día 8, la *Heliconia psittacorum* tuvo un porcentaje de remoción superior al de *Alpinia purpurata*, con una diferencia de 0,84% y presentó una pérdida insignificante de eficiencia de 0,83% en relación al día 6 que fue el tratamiento con mayor remoción para ambas especies. Los porcentajes de remoción en la segunda ronda de tratamiento, tuvieron un comportamiento similar al de la primera ronda, indicando que en el día 6 se removió mayor materia orgánica por parte de las plantas y microorganismos, con valores de 62,66% y 61,91%, para *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata* respectivamente.

La variación en la eficiencia de remoción de los sólidos pudo verse influenciado por desprendimiento del sustrato, ya que la *Alpinia purpurata* demostró una mayor remoción de SST, pero se evidenció una alteración en el TRH 8 días de la primera ronda, y en el TRH de 6 días de la segunda ronda, la “*Heliconia*” presentó mayor remoción de SST.

Los altos valores de remoción en la segunda ronda esta netamente relacionado con la carga de materia orgánica encontrada en la concentración de entrada siendo superior a la analizada en la primera ronda, esto indica a partir de acuerdo al artículo científico realizado por (Zurita, De Anda, & White J, 2011), que la materia tiene una relación con los nutrientes, lo cual beneficia el crecimiento de las plantas ya que permite incorporar materia a su biomasa y promueve el crecimiento de la biopelícula, mejorando la eficiencia en la degradación de contaminantes. A partir de la revisión bibliográfica sobre estudios experimentales con sistemas de humedales flotantes maduros, los porcentajes de remoción de SST oscilan entre el 54% al 92% (Floating Island International®, 2011). Los porcentajes de mayor remoción obtenidos en los tratamientos de los humedales flotantes en el TRH de 6 días en la primera ronda por la especie *Alpinia purpurata* y en el TRH 6 y 8 días en la segunda ronda por ambas especies, se encuentran dentro este rango, resaltando la efectividad e importancia del sistema en la mejora de la calidad del agua residual.

Las concentraciones obtenidas de SST después de los tratamientos en los humedales flotantes, se encuentra en un rango entre 1300 mg/L y 2500 mg/L, los cuales superan el límite permisible de vertimiento de ARDs (100 mg/L) establecido en la Resolución 0631 de 2015, considerándose los valores por encima de este límite como peligrosos para la conservación de ecosistemas.

7.5 Determinación de la Concentración de Entrada de los Nutrientes

Para la determinación de las concentraciones de NTK y P-PO₄ de las muestras de entrada de la segunda ronda de tratamientos, se presentaron algunas complicaciones en el procesamiento de las muestras en el laboratorio, debido a la contingencia a consecuencia de la pandemia de COVID-19, por ende se procedió a la determinación de una sola muestra de entrada para la segunda ronda de tratamientos; para esto se realizó la variación y desviación estándar o típica entre los valores de concentración de entrada DBO₅ de esta ronda.

σ^2 = Varianza poblacional; σ = Desviación estándar; x = dato; $\bar{x}$ = media (104,21)

N = tamaño de la muestra

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}$$

$$\sigma^2 = \frac{(101,22 - 104,21)^2 + (95,00 - 104,21)^2 + (116,21 - 104,21)^2}{3}$$

$$\sigma^2 = 80,94; \sigma = 8,99$$

El resultado de la desviación estándar de 8,99 indica que los datos de concentración de DBO₅ no están tan dispersos de la media, este procedimiento permite simular un comportamiento similar a la concentración de entrada de los nutrientes de la segunda ronda de tratamientos.

7.6 Comparación de porcentajes de remoción de P-PO₄

En la siguiente tabla se aprecia que los porcentajes de remoción de P-PO₄ en la segunda ronda de tratamientos fueron mayores que los de la primera ronda, esto se debe a un mayor crecimiento de la biopelícula en la estructura de soporte, permitiendo un mayor consumo de oxígeno para la degradación de P-PO₄, sin embargo, si se mantiene los humedales flotantes en períodos prolongados con la misma concentración de entrada del ARD, la remoción será menor.

Tabla 10. Resultados de P-PO₄ en la entrada y salida de los humedales flotantes.

	TRH (días)	Humedal- Especie	Concentración de Entrada (P-PO ₄) mg/L	Concentración de Salida (P-PO ₄) mg/L	% de remoción de (P-PO ₄)
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	2,64 *	2,56 *	39,56
		H1 <i>A.p.</i>		2,52 *	32,96
	6	H2 <i>H.p.</i>		3,54 *	-8,72
		H2 <i>A.p.</i>		3,36 *	-2,34
	8	H3 <i>H.p.</i>		1,62 *	29,14
		H3 <i>A.p.</i>		1,92 *	27,44
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	3,23 *	0,36	88,77
		H1 <i>A.p.</i>		1,74	46,35
	6	H2 <i>H.p.</i>		2,82 *	12,87
		H2 <i>A.p.</i>		2,49 *	22,95
	8	H3 <i>H.p.</i>		2,29 *	39,64
		H3 <i>A.p.</i>		2,27 *	29,90

Nota. P-PO₄ de los humedales flotantes a escala piloto. *H* (Humedal), *H.p* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*); (*) son las concentraciones que tuvieron que ser diluidas al 50% para poder ser determinadas por la curva patrón. Por González & Hernández, 2020.

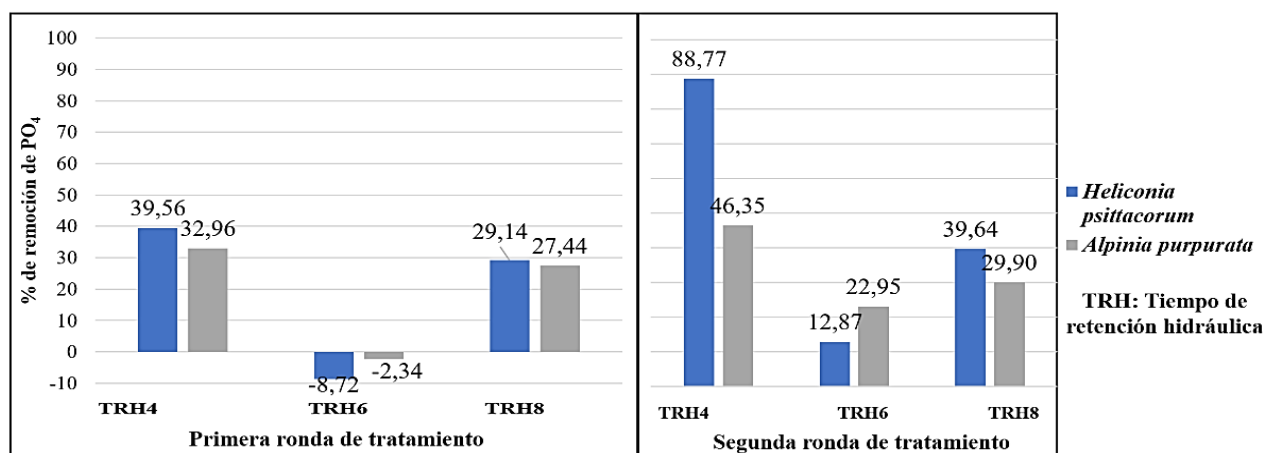


Figura 17. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción $P-PO_4$ en los tratamientos. Por González & Hernández, 2020.

El humedal que presentó mayor remoción fue el de TRH de 4 días en la segunda ronda de tratamientos con la *Heliconia psittacorum* alcanzado una eficiencia de 88,77%, en comparación a la otra especie (*Alpinia purpurata*) que obtuvo menor remoción (46,35%), siendo inferior en un 42,42%. La alta remoción a los 4 días se debe a que el $P-PO_4$, a menor TRH se presenta una mayor concentración en suspensión en el ARD, lo cual es más eficiente la degradación y absorción de este compuesto, a partir de la vegetación y la biopelícula. Los porcentajes de remoción más bajos se presentaron en los humedales con TRH de 6 días en ambas rondas de tratamiento, de los cuales la *Heliconia psittacorum* presentó la eficiencia más baja de -8,72%, seguidamente por la *Alpinia purpurata* con -2,34%, ambos resultados ocurrieron en la primera ronda de tratamiento. Los valores negativos indican un aumento de la concentración de los ortofosfatos en el ARD, esto puede ser influenciado por diversas causas como: desprendimiento del sustrato que pudo aumentar la concentración del compuesto en el ARD o la muerte de las especies en los humedales, liberando fósforo; sin embargo, estas mismas especies durante el TRH de 6 días en la segunda ronda, evidenciaron una mejoría en la remoción llegando a 12,87% para la *Heliconia psittacorum* y 22,95% para la *Alpinia purpurata*, indicando que estas plantas presentaron complicaciones en la asimilación de los fosfatos durante la primera ronda, afectando la remoción de este nutriente, que los presentaron en el TRH de 8 días por ambas especies durante las dos rondas de tratamiento.

De acuerdo al estudio realizado por (Pérez M. E., 2009), se evidenció que los humedales con TRH muy largos, tendrá menor remoción debido a que los compuestos fosfatados se sedimentan, lo cual corresponde a lo evidenciado en este estudio. También indica que los humedales con TRH

entre 5 a 10 días, la remoción del fósforo rara vez excederá de 1 a 3 mg/L, lo cual de acuerdo a las concentraciones de salida evidenciadas en la Tabla 13, se mantienen dentro de este rango a excepción de los humedales con TRH de 6 días de la primera ronda que presentaron un aumento de la concentración de P-PO₄ de 0,54 mg/L para *Heliconia psittacorum* y 0,36 mg/L para la especie *Alpinia purpurata* por encima del rango establecido por (Pérez M. E., 2009).

7.7 Comparación de porcentajes de remoción de NT

Las concentraciones que se encuentran en la siguiente tabla, corresponden a la sumatoria entre el NTK, nitritos y nitratos, para dar como resultado el nitrógeno total para cada muestra de ARD. La concentración de entrada de la segunda ronda de tratamiento para este caso, a diferencia de los procedimientos de DBO₅ y SST, se utilizó una sola concentración para todos los humedales en dicha ronda. Los porcentajes en la mayoría fueron negativos, indicando un aumento del NT en el ARD tratada por los humedales flotantes. Los resultados de cada compuesto de NT, se pueden evidenciar en el Anexo 9.

Tabla 11. Resultados de NT en la entrada y salida de los humedales flotantes.

	TRH (días)	Humedal- Especie	Σ Concentración de Entrada de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	Σ Concentración de Salida de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	(%) Porcentaje de remoción
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	90,27	93,93	-4,04
		H1 <i>A.p.</i>		96,37	-6,76
	6	H2 <i>H.p.</i>		105,07	-16,39
		H2 <i>A.p.</i>		93,78	-3,88
	8	H3 <i>H.p.</i>		140,53	-55,67
		H3 <i>A.p.</i>		170,26	-88,61
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	114,56	93,13	18,71
		H1 <i>A.p.</i>		137,41	-19,95
	6	H2 <i>H.p.</i>		116,38	-1,59
		H2 <i>A.p.</i>		148,32	-29,47
	8	H3 <i>H.p.</i>		77,67	32,20
		H3 <i>A.p.</i>		142,34	-24,26

Nota. NT de los humedales flotantes a escala piloto. *H* (Humedal), *H.p* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

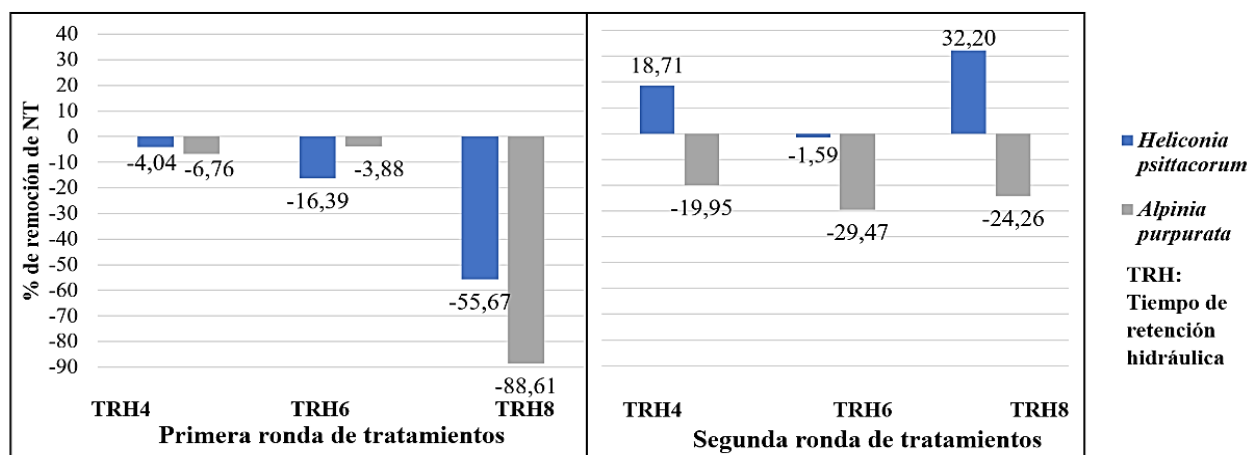


Figura 18. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de NT en los tratamientos. Por González & Hernández, 2020.

A partir de la anterior gráfica se aprecia que, durante la primera ronda de tratamientos, todos los resultados de remoción fueron negativos siendo el TRH de 8 días el de menor remoción, con -55,67% para *Heliconia psittacorum* y -88,61% de *Alpinia purpurata*; de igual forma, también se puede apreciar que a mayor TRH, así mismo aumentó la concentración de NT en el ARD. En la segunda ronda de tratamientos se presentó, mejoría en la remoción del contaminante en comparación a la primera ronda por parte de los humedales que contenían la especie *Heliconia psittacorum*, que obtuvo una remoción máxima de 32,20% en el TRH de 8 días; para la especie *Alpinia purpurata* durante la segunda ronda los porcentajes de remoción se mantuvieron negativos, aumentando la concentración de NT para los TRH de 4 y 6 días con respecto a la primera ronda, sin embargo, en el humedal con TRH de 8 días, disminuyó 64,35%.

La mayoría de los resultados presentados indicaron una deficiente remoción del NT, lo cual el aumento inusual de la concentración de salida con respecto a la concentración de entrada del nutriente NT, indica que la presencia de los humedales aumentaron las concentraciones iniciales, siendo atribuido posiblemente al nitrógeno que contenía el sustrato y que fue liberado en el ARD al momento de la operación de los tratamientos, sin embargo, también es importante mencionar que en los sistemas de humedales se pueden encontrar bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, siendo otra posible causa de que el nitrógeno fuera mayor al final de cada TRH, lo cual este nitrógeno es asimilado después por plantas para su crecimiento.

A partir del NTK obtenido, se pudo observar el nitrógeno capaz de ser nitrificado, en el cual durante la primera ronda se evidenció de acuerdo al Anexo 9, una nitrificación promedio general

por parte de la especie *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata* de 13,92% y 8,62%, respectivamente, en el que se destaca una mayor nitrificación en el TRH de 8 días en un 29,43% para la “*Heliconia*” y para “ginger roja” de 13,05% en el TRH de 4 días. Durante la segunda ronda de tratamiento la nitrificación promedio para *Heliconia psittacorum* fue de 17,79% y para *Alpinia purpurata* de 15,16%, se resalta los mayores porcentajes de nitrificación en el TRH de 6 días con valores de 36,37% y 25,58%, correspondientemente; en ambas rondas se refleja la superioridad de nitrificación que corresponde a la *Heliconia psittacorum*, esto se debe posiblemente que esta especie permite una mayor fijación de microorganismos en su sistema radicular, efectuando una alta nitrificación a diferencia de la especie *Alpinia purpurata*, además en general, los valores más altos de nitrificación corresponden a los períodos más largos de TRH.

En la remoción de NT, la especie *Heliconia psittacorum* en la segunda ronda y la *Alpinia purpurata* en el TRH de 8 días de la misma ronda, demostraron una mejoría en la remoción del NT, indicando que el nitrógeno presente en el sustrato puede ser estabilizado en períodos más largos, debido a que la biopelícula requiere de altos valores de TRH para el crecimiento y asimilación del compuesto (You, Hsu, Chuang, & Ouyang, 2003). En casos de estudio en la remoción de NT, se ha encontrado que la depuración en lugares de climas tropicales con plantas emergentes, las eficiencias pueden alcanzar valores superiores de 30% ya que en temperaturas tropicales se facilita el crecimiento microbiano para la degradación y asimilación de contaminantes, y varía la eficiencia de acuerdo al tipo de macrófita (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011), lo cual el único porcentaje que se encuentra en este rango fue el obtenido por la especie *Heliconia psittacorum*.

Los altos porcentajes de remoción del NT obtenidos por la *Heliconia psittacorum*, se debe a que permiten una mejor absorción de este nutriente, ya que se ve reflejado en su crecimiento y floración evidenciado en la Tabla 7, siendo mayores que los alcanzados por la especie *Alpinia purpurata*. Es importante resaltar que el nitrógeno es un compuesto importante para el desarrollo de la vida vegetal, desde el crecimiento de los rizomas hasta la floración y depende de la capacidad de absorción de cada planta para asimilarlo, sin embargo, en exceso puede convertirse en contaminante, disminuyendo la capacidad depuradora del sistema y disminuyendo el OD presente en el agua, produciendo un impacto negativo en la vida acuática (Kadlec & Wallace, 2009).

7.8 Comparación de eficiencias en la remoción de contaminantes entre los humedales flotantes y las lagunas de estabilización en un TRH de 8 días

Para la comparación de eficiencias entre los humedales flotantes que contenían las macrófitas consideradas en el presente estudio, y las lagunas de estabilización que contenían la especie de tipo flotante *Lemma sp.* (Laguna A) y solo una de ellas (Laguna B) poseía 8 unidades de pasto vetiver, se relacionaron los contaminantes removidos por m^2 en la segunda ronda de tratamientos (a excepción de los SST para ambos sistemas y el NT para la especie *Alpinia purpurata*) en el TRH de 8 días; es importante recalcar que las concentraciones de los nutrientes tanto de entrada como de salida de las lagunas, se realizaron de manera general sin especificar el tipo de laguna. Para la comparación de la eficiencia de remoción de manera proporcional, fue necesario relacionar el caudal, las concentraciones de los contaminantes de entrada y salida, y las áreas de cada sistema con el fin de hallar las cargas orgánicas superficiales (COS) permitiendo una comparación directa de los porcentajes de contaminante removido por área (m^2); los cálculos pertinentes se encuentran en el Anexo 10.

7.8.1 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de DBO_5 .

En la siguiente tabla, se puede observar que las lagunas presentan una mayor COS, es decir mayor cantidad de contaminante en el ARD por área (m^2) que los evidenciados en los humedales flotantes. El valor de las concentraciones de entrada de DBO_5 para las lagunas de estabilización fue de ($0,116 \text{ kg}/m^3$), siendo el mismo que se utilizó en la entrada de los humedales flotantes en la segunda ronda con TRH de 8 días, debido a que se tomó la muestra de agua de entrada al mismo tiempo del llenado de ambas lagunas.

Tabla 12. Porcentajes de remoción de DBO_5 por m^2 en el TRH de 8 días.

	TRH (días)	Especie	COS Entrada (Kg DBO_5 / m^2 . día)	COS Salida (Kg DBO_5 / m^2 . día)	% de remoción de DBO_5/m^2
Segunda ronda	8	H3 H.p.	0,010	0,0077	23,00
		H3 A.p.		0,0067	33,00
Laguna (A)	8	<i>Lemma sp</i>	0,028	0,014	50,00
Laguna (B)		<i>Lemma sp</i> - 8 unidades de Pasto vetiver		0,010	64,28

Nota. DBO_5 / m^2 *día, de los sistemas acuáticos. H (Humedal), H.p (*Heliconia psittacorum*), A.p. (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

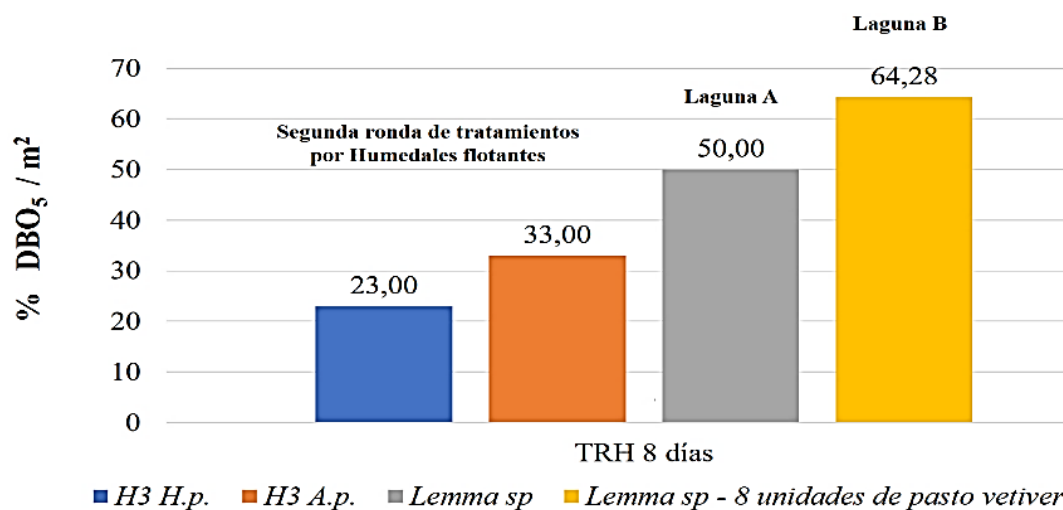


Figura 19. Gráfica de Porcentaje de remoción DBO_5/m^2 en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes. Por González & Hernández, 2020.

Los resultados de remoción observados en la anterior gráfica, corresponden a la DBO_5 removida por m^2 de cada sistema; de acuerdo a lo anterior, se evidencia que la Laguna B presenta mayor porcentaje de remoción que la Laguna A, con una diferencia de 14,28%, esto se debe a que además de compartir la misma especie *Lemma sp*. con la Laguna A, poseía unidades de pasto vetiver lo cual se atribuye al aumento en la remoción de la DBO_5 . La Laguna A con presencia de *Lemma sp*., presentó una mayor remoción comparada con los tratamientos de humedales flotantes en el TRH

de 8 días, sin embargo, en teoría, el uso de esta especie con *Alpinia purpurata* o con *Heliconia psittacorum*, alcanzarían remociones hasta de 83,00% y 73,00%, siendo mayor en un 18,72% y 8,72% respectivamente, en comparación a la remoción obtenida en la Laguna B con presencia de pasto vetiver en la remoción de DBO₅.

7.8.2 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de SST.

Los resultados obtenidos en la remoción de SST por las lagunas de estabilización fueron deficientes debido a que se encontró altas concentraciones de SST después del tratamiento, por ende, los porcentajes de remoción fueron negativos, lo cual no fue necesario calcular los SST removidos por m².

Tabla 13. Porcentajes de remoción de SST por m² en el TRH de 8 días.

	TRH (días)	Humedal- Especie	Concentración de Entrada SST mg/L	Concentración de Salida SST mg/L	% de remoción de SST
Segunda ronda Laguna A	8	H3 <i>H.p.</i>	3230	1450	55,10
		H3 <i>A.p.</i>		1400	56,65
		<i>Lemma sp.</i>		401050	-12316,40
		<i>Lemma sp.</i> - 8			
Laguna B		unidades de pasto vetiver		353150	-10833,40

Nota. SST /m² *día, de los sistemas acuáticos. *H* (Humedal), *H.p* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

La deficiencia demostrada en la remoción por las especies contenidas en las lagunas supera en un 12416,40% (Laguna A) y 10933,43% (Laguna B) la concentración de entrada, esto se debe a que durante el procesamiento de las muestras para la realización de las pruebas de SST que corresponden a las lagunas, se encontró que las muestras de aguas contenían microalgas que daba tonalidad verde al agua residual (*Figura 20*), generando la deficiencia del sistema en la remoción de SST, lo cual indica que hay una alta presencia de esta microalga, aludiéndose a un exceso de nutrientes en las lagunas que pueden reducir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, afectando la actividad microbiana para la degradación de materia orgánica (Diersing, 2009). El resultado porcentual en la remoción de SST obtenido en el tratamiento en la Laguna B, fue superior al de la Laguna A esto puede verse influenciado por la presencia de las 8 unidades de vegetación emergente (pasto vetiver), ya que la sombra que genera permite una reducción del crecimiento de algas, tal como lo afirma (Martínez, 2014) en su estudio.



Figura 20. Tonalidad verde por presencia de algas; muestras tomadas de las lagunas de estabilización. Por González & Hernández, 2020.

En los humedales flotantes, durante los tratamientos no se encontró presencia de algas, esto debido a que las balsas ocupan gran parte del área del humedal, impidiendo en mayor medida la entrada de los rayos del sol que incentivan el desarrollo de la fotosíntesis y su crecimiento en los cuerpos hídricos; por lo que los resultados de remoción de SST en los humedales flotantes fueron superiores al obtenido en las lagunas de estabilización.

7.8.3 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de P-PO₄.

La siguiente tabla se observa que las lagunas presentan una mayor COS por m² tanto en la entrada como en la salida, a diferencia que la obtenida por los humedales flotantes. El valor de las concentraciones de entrada de P-PO₄ para las lagunas de estabilización fue de (0,00323 kg/m³), siendo el mismo que se utilizó en la entrada de los humedales flotantes en la segunda ronda en todos los TRH.

Tabla 14. Porcentajes de remoción de P-PO₄ por m² en el TRH de 8 días.

	TRH (días)	Especie	COS Entrada (Kg P-PO ₄ / m ² . día)	COS Salida (Kg P-PO ₄ / m ² . día)	% de remoción de P-PO ₄ /m ²
Segunda ronda	8	H3 H.p.	0,00028	0,00016	42,85
		H3 A.p.		0,00019	32,14
Lagunas	8	<i>Lemma sp</i>	0,00079	0,00054	31,64
		<i>Lemma sp</i> - 8 unidades de pasto vetiver			

Nota. P-PO₄ /m² *día, de los sistemas acuáticos. H (Humedal), H.p (*Heliconia psittacorum*), A.p. (*Alpinia purpurata*). Por González & Hernández, 2020.

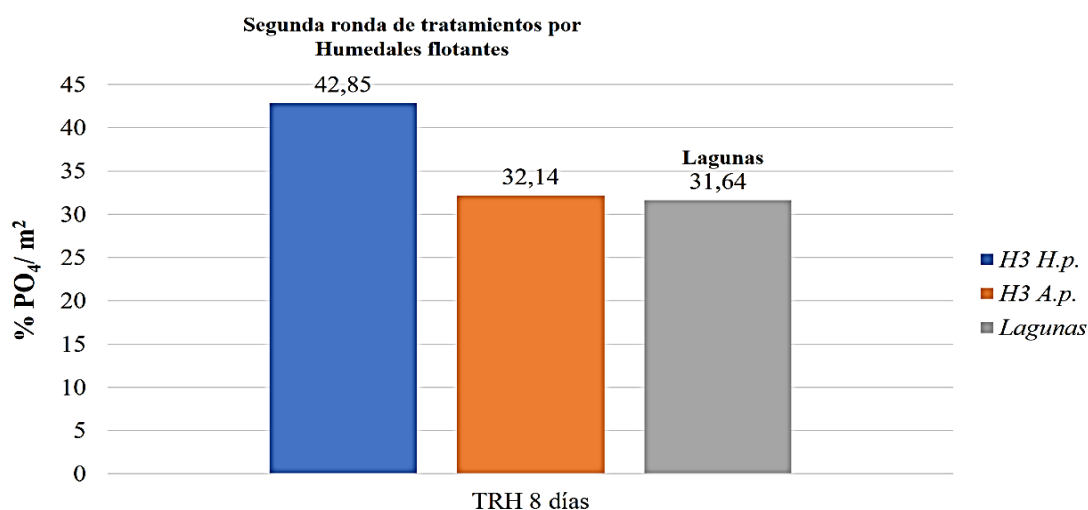


Figura 21. Porcentaje de remoción de P-PO₄/m² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes. Por González & Hernández, 2020.

A partir de la Figura 21, se aprecia que el humedal con la especie *Heliconia psittacorum* obtuvo la mayor remoción de P-PO₄/m² en el TRH de 8 días, en comparación al humedal de la especie *Alpinia purpurata* y de las lagunas, siendo superior en un 10,71% y 11,21%, respectivamente. El porcentaje de salida de las lagunas, corresponden a las dos lagunas de estabilización (Laguna A y Laguna B), ya que para los casos de los nutrientes, por diversos limitantes se determinó una sola salida de ARD para estas dos lagunas, que poseen la especie *Lemma sp.* y sola una de ellas posee

8 unidades de pasto vetiver, siendo irrealizable la comparación específica entre la remoción influenciada por el pasto vetiver y la de los humedales con las especies vegetales, por ende en términos generales, ambas especies consideradas en los humedales flotantes, obtuvieron una remoción superior a la realizada por las lagunas de estabilización.

7.8.4 Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de NT

Para esta comparación no se tuvo en cuenta las concentraciones de salida proveniente del tratamiento realizado por la especie *Alpinia purpurata*, debido a que los resultados fueron negativos lo cual no es factible comparar con los obtenidos por la laguna, ya que este sistema si se obtuvo una remoción positiva.

Tabla 15. Porcentajes de remoción de NT por m² en el TRH de 8 días.

	TRH (días)	Especie	COS Entrada (Kg NT/ m ² . día)	COS Salida (Kg NT/ m ² . día)	% de remoción de NT/m ²
Segunda ronda	8	H3 H.p.	0,0099	0,0067	32,32
Lagunas	8	<i>Lemma sp</i> - <i>Lemma sp</i> - 8 unidades de <i>Pasto vetiver</i>	y0,028	0,021	25,00

Nota. NT /m² *día, de los sistemas acuáticos H (Humedal), H.p (Heliconia psittacorum). Por González & Hernández, 2020.

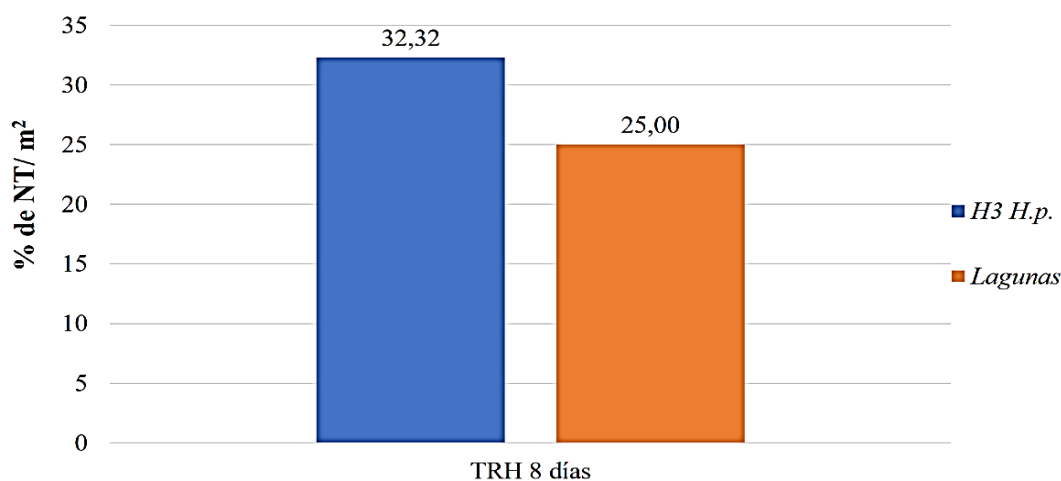


Figura 22. Porcentaje de remoción de NT/m² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedal flotante. Por González & Hernández, 2020.

El humedal flotante con la especie *Heliconia psittacorum* presentó mayor remoción que lagunas de estabilización, siendo superior en 7,32%, esto puede indicar que los humedales flotantes en condiciones similares, obtengan mayor remoción de NT/m², debido a que las raíces de las macrófitas, el sustrato y la estructura flotante, permiten una mayor fijación de la biopelícula a comparación de los sistemas no plantados, lo cual el uso de humedales flotantes hace más eficiente la degradación y consumo de materia orgánica tanto para la vegetación como para las bacterias del humedal, a diferencia de los microorganismos que están contenidos en materia en suspensión y no están dentro de una comunidad de microorganismos.

Los porcentajes de remoción de nutrientes por m² (P-PO₄ y NT) obtenidos por las lagunas de estabilización, fueron inferiores a comparación de los resultados alcanzados por los humedales flotantes, de acuerdo a lo evidenciado en la práctica de campo, las lagunas presentan una alta proliferación de microalgas, ya que estas crecen más rápido y consumen gran parte de los nutrientes disminuyendo la remoción para las especies vegetales (Núñez, y otros, 2011), sin embargo, esta microalga tiene una vida muy corta y en su descomposición liberan gran parte de los nutrientes ya consumidos, incorporándolos nuevamente al sistema y saturando la capacidad de depuración, aumentando la concentración de estos compuestos (Lathrop, Carpenter, Panuska, & Craig, 1998).

Para la posible implementación de los humedales flotantes en las lagunas de estabilización, existen estudios como el realizado por (INECOL, 2016) y (Carvajal, Zapattini, & Quintero, 2018), que demuestran la viabilidad en la optimización de las eficiencias en la depuración de volúmenes significativos de agua ARD, a partir de la implementación entre lagunas de estabilización y humedales artificiales superficiales. De igual forma, el uso híbrido entre dos especies diferentes, tipo flotante y de tipo emergente, también es óptimo en la remoción de contaminantes, lo cual no afecta la absorción de ninguna planta ni la disponibilidad de nutrientes tal como ocurrió en el estudio realizado por (Núñez, y otros, 2011).

7.9 Análisis estadístico

Para este análisis se tuvo en cuenta los porcentajes de remoción de los cuatro contaminantes considerados en el presente estudio, a partir de los humedales flotantes con su respectiva especie.

Tabla 16. *Estadísticos descriptivos Heliconia psittacorum*.

<i>Heliconia psittacorum</i>		% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT
Primera Ronda	Varianza	6,42	88,14	645,40	726,78
	Desviación	2,53	9,39	25,40	26,96
	Media	14,05	47,50	19,99	-25,37
Segunda Ronda	Varianza	21,64	128,50	1482,01	289,31
	Desviación	4,65	11,34	38,50	17,01
	Media	17,94	52,71	47,09	16,44

Nota. Análisis descriptivo *Heliconia psittacorum*. Por González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics

Como se aprecia en la tabla, al considerar la variación de los distintos porcentajes de remoción correspondientes a *Heliconia psittacorum* y teniendo en cuenta los promedios, se considera que tanto para DBO₅ y SST la variación no es tan alta; sin embargo, sí aumenta de la primera ronda a la segunda. Por otro lado, para los porcentajes de remoción P-PO₄ y NT, la variación es alta para ambas rondas.

Tabla 17. *Estadísticos descriptivos Alpinia purpurata*.

<i>Alpinia purpurata</i>		% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT
Primera Ronda	Varianza	102,80	34,27	360,58	2314,58
	Desviación	10,14	5,85	18,99	48,11
	Media	27,51	51,11	19,35	-33,08
Segunda Ronda	Varianza	102,82	38,80	144,41	22,73
	Desviación	10,14	6,23	12,02	4,77
	Media	29,16	56,02	33,07	-24,56

Nota. Análisis descriptivo *Alpinia purpurata*. Por González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics

Al igual que en la tabla anterior, se puede apreciar que para la *Alpinia purpurata*, los porcentajes de remoción DBO₅ y SST son bajos en ambas rondas, manteniéndose estables, en cambio para P-PO₄ y NT, la variación baja de la primera a la segunda ronda. Mediante los gráficos de dispersión por cada una de las rondas tanto para *Heliconia psittacorum* como *Alpinia purpurata*, permiten notar, qué relación guardan los porcentajes de remoción con respecto al TRH, asimismo se presentan las tablas que recopilan los resultados de las correlaciones entre las diferentes variables y TRH; con lo ya mencionado anteriormente se establece que el humedal con mayor eficiencia en la remoción de los cuatro contaminantes estudiados, es el que contiene la especie *Heliconia psittacorum* en el TRH de 4 días de la segunda ronda de tratamiento, con un porcentaje de remoción

de 40,56%, seguidamente del TRH de 8 días de la misma ronda, con un porcentaje de remoción de 37,53% (Ver Anexo 11).

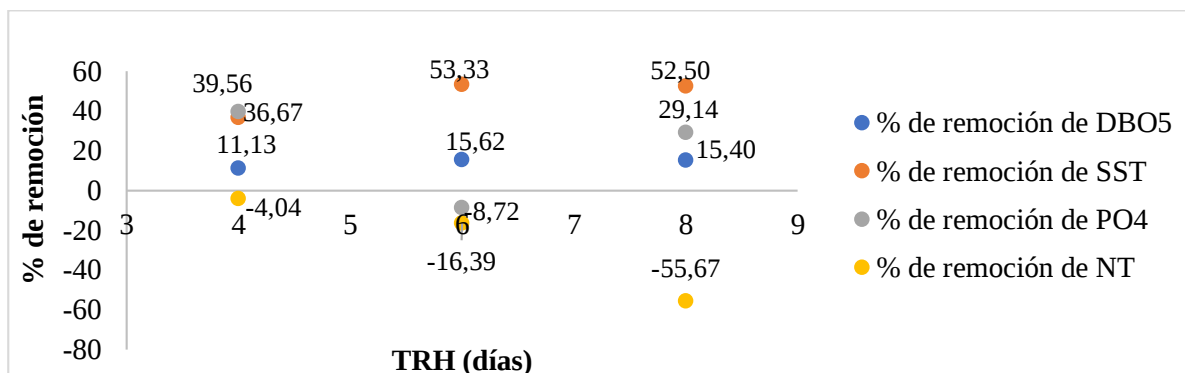


Figura 23. Diagrama de dispersión % de remoción *Heliconia psittacorum* primera ronda. Por González & Hernández, 2020.

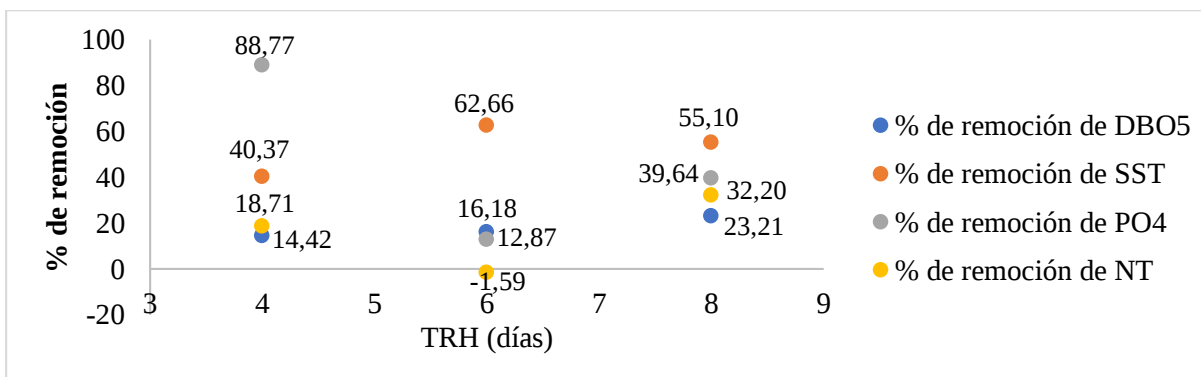


Figura 24. Diagrama de dispersión % de remoción *Heliconia psittacorum* segunda ronda. Por González & Hernández, 2020.

Tabla 18. Correlaciones para *Heliconia psittacorum*.

Primera ronda- <i>Heliconia psittacorum</i>			TRH (días)	Segunda ronda- <i>Heliconia psittacorum</i>			TRH (días)
TRH (días)	Correlación de Pearson	de	1	TRH (días)	Correlación de Pearson	de	1
% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	de	0,843	% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	de	0,945
% de remoción de SST	Correlación de Pearson	de	0,843	% de remoción de SST	Correlación de Pearson	de	0,65
% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	de	-0,205	% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	de	-0,638
% de remoción de NT	Correlación de Pearson	de	-0,958	% de remoción de NT	Correlación de Pearson	de	0,397

Nota. Correlación de Pearson a partir de los TRH y contaminantes en la especie *Heliconia psittacorum*. Por González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics.

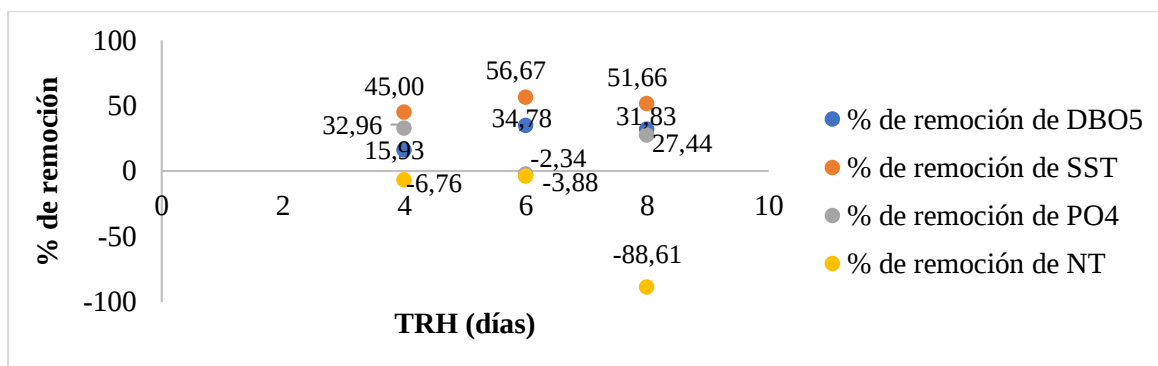


Figura 25. Diagrama de dispersión % de remoción *Alpinia purpurata* primera ronda. Por González & Hernández, 2020.

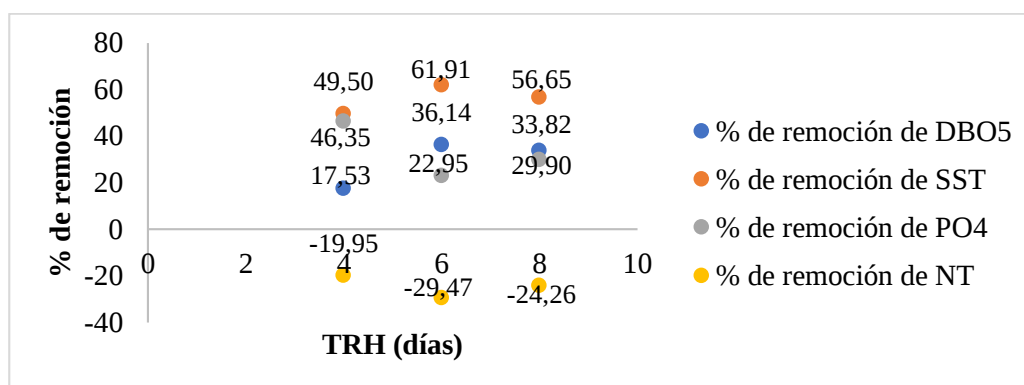


Figura 26. Diagrama de dispersión % de remoción *Alpinia purpurata* segunda ronda. Por González & Hernández, 2020.

Tabla 19. Correlaciones para *Alpinia purpurata*.

Primera ronda- <i>Alpinia purpurata</i>			Segunda ronda- <i>Alpinia purpurata</i>		
TRH (días)	Correlación de Pearson	TRH (días)	TRH (días)	Correlación de Pearson	TRH (días)
TRH (días)	Correlación de Pearson	1	TRH (días)	Correlación de Pearson	1
% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,784	% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,803
% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,569	% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,574
% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,145	% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,684
% de remoción de NT	Correlación de Pearson	-0,851	% de remoción de NT	Correlación de Pearson	-0,452

Nota. Correlación de Pearson a partir de los TRH y contaminantes en la especie *Alpinia purpurata*. Por González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics.

Para una interpretación rápida y eficiente de los coeficientes de correlación presentados en estas tablas, es importante señalar que se analizó la relación entre TRH (X) y cada uno de los porcentajes de remoción (Y_i), por lo tanto, se aprecian cuatro índices de correlación de Pearson, tanto para *Heliconia psittacorum* como para *Alpinia purpurata* por cada una de las rondas. Teniendo en cuenta los porcentajes obtenidos en las interpretaciones de las correlaciones de Pearson, se evidencio altos valores para los porcentajes de remoción DBO₅, SST en los TRH de las dos especies, donde varían entre 0,7 y 0,9, esto quiere decir que hay una relación positiva entre las variables mencionadas anteriormente, ya que a mayor TRH se tendrá una mayor remoción de materia orgánica, como se observó en los resultados experimentales, por lo contrario los valores negativos en PO₄, NT, no tienen relación, puesto que no hay un incremento en la remoción al aumentar el TRH.

8. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se pudo concluir lo siguiente:

- La especie *Heliconia psittacorum* demostró mejor adaptación al ARD con pretratamiento, a comparación de la especie *Alpinia purpurata*, ya que esta última demostró indicios, aunque mínimos, de amarillamiento en las hojas y tallos.
- La especie *Alpinia purpurata* en el TRH de 6 días obtuvo una mejor remoción de DBO₅ y SST, sin embargo, en la remoción de nutrientes, la especie *Heliconia psittacorum* tuvo una remoción superior en el TRH de 4 días para P-PO₄ y en el TRH de 8 días para NT, esto puede aludirse a que la *Heliconia psittacorum* permite una mayor absorción de los nutrientes a su biomasa, a diferencia de la otra especie en comparación.
- La presencia de los humedales flotantes es importante para el mejoramiento de la calidad del agua y para la reducción de la proliferación de microalgas, esto evitando el aumento de los SST en ARD, ya que las especies emergentes ofrecen cobertura de sombra disminuyendo los rayos solares que favorecen al desarrollo de las microalgas, lo cual estas también se ven reducidas en su cantidad, permitiendo una mayor disponibilidad de nutrientes generando un mayor crecimiento de *Lemna sp* y de la especie emergente, ya que esta especie en diversos estudios reflejan una alta remoción de los nutrientes por su rápido crecimiento.
- La eficiencia de las lagunas de estabilización con la especie *Lemna sp* en la remoción de DBO₅/m² fue superior a los obtenidos por los humedales flotantes, sin embargo, la presencia del pasto vetiver en la remoción de DBO, es inferior a los obtenidos por la especie *Alpinia purpurata* y *Heliconia psittacorum*, esto indicando que el uso híbrido entre la especies consideradas en el presente estudio con la *Lemna sp*. en las lagunas de estabilización, conllevaría a mejorar las eficiencias de remoción alcanzando 83,00% para *Alpinia purpurata* y 73,00% *Heliconia psittacorum*.
- Las lagunas de estabilización demostraron menor remoción de nutrientes/m² a comparación de los humedales flotantes, esto debido a la influencia de la proliferación de las algas que se encuentran en las lagunas, reduciendo la disponibilidad de los nutrientes.

- La remoción de DBO_5 obtenida por las dos especies ornamentales en todos los TRH, cumplen con el límite permisible expuesta resolución 0631 de 2015, ya que no superan la concentración fijada de 90 mg/L.
- El TRH que obtuvo mayor porcentaje de remoción de contaminantes, fue el de 4 y 8 días durante la segunda ronda de tratamiento, mediante la especie *Heliconia psittacorum*. La alta remoción obtenida en el TRH de 4 días se debe a la influencia de la remoción de P-PO_4 , ya que fue bastante significativa, sin embargo, la remoción de DBO_5 y SST fue inferior a diferencia del TRH de 8 días de segunda ronda, esto debido a que mayor TRH, mayor será la influencia de la biopelícula en la asimilación y degradación de los contaminantes.
- A mayor TRH, menor será la remoción de P-PO_4 debido a que el compuesto se sedimenta, siendo esto una complicación para la remoción del nutriente a partir de la interacción entre las plantas y la biopelícula para la degradación de este compuesto en períodos largos.
- El prototipo experimental de humedal flotante que se realizó, obtuvo porcentajes de remoción significativos en relación a los parámetros fisicoquímicos estudiados en la presente investigación, no obstante, permitió una adaptación viable a las especies vegetales utilizadas para la posible implementación en las lagunas de estabilización ya existentes, sin alterar la estructura de los cuerpos hídricos.

9. Recomendaciones

Para el análisis de ARD con presencia de microalgas, se recomienda en la determinación de P-PO₄, NTK, NO₃ y NO₂, filtrar las muestras de agua hasta notar un color traslucido en el agua residual, ya que la influencia del coloramiento verdoso a causa de las microalgas puede causar interferencias en la determinación de los nutrientes.

A pesar que los humedales flotantes demostraron alta remoción de los SST, no cumplen con el límite permisible de (100 mg/L) expuesto en la resolución 0631 de 2015, por lo cual se recomienda para la posible ejecución de los humedales flotantes sobre las lagunas de estabilización, la implementación de filtros o sedimentador en la salida del ARD de las lagunas de estabilización.

Para la implementación de humedales flotantes, se recomienda el mantenimiento de las plantas emergentes cortando las hojas y tallos en mal estado con el fin de evitar que se vuelvan vulnerables a plagas, asimismo eliminar plantas parasitas que puedan influir en la reducción de nutrientes para el crecimiento de las plantas emergentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos entre la dos especies ornamentales, la *Heliconia psittacorum* presentó mayor porcentaje de remoción durante la segunda ronda de tratamientos en el TRH de 4 días seguidamente el de 8 días, con una diferencia no tan significativa, sin embargo, se recomienda desde un concepto ambiental para la posible implementación a escala real, el uso del humedal flotante con la especie *Heliconia psittacorum* en un TRH de 8 días, ya que permite una mayor fijación de la biopelícula al humedal flotante y un mejor porcentaje de remoción de SST y DBO₅.

Bibliografía

- Alcaldía de Villavicencio. (13 de Noviembre de 2018). *El BID financiará los diseños de la PTAR para Villavicencio*. Obtenido de Alcaldía de Villavicencio: [http://villavicencio.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/"El-BID-financiará-los-diseños-de-la-Planta-de-Aguas-Residuales-para-Villavicencio"-alcalde-Wilmar-Barbosa.aspx](http://villavicencio.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/)
- Alfaro Salazar, D. M. (2015). *Estudio del Impacto Ambiental generado por vertimientos provenientes de un establecimiento penitenciario de orden nacional al recurso hídrico. "Estudio de Caso."* Tesis de postgrado. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6463/ARTICULO%20ESPECIALIZACION%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arias, C. (2018). Capítulo II: Diseño y Construcción de Humedales para el Tratamiento de Aguas. En G. Vidal, & S. Hormazába, *Humedales Construidos: Diseño y Operación* (pág. 59). Aarhus, Dinamarca: Universidad de Concepción. Obtenido de http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/09/HUMEDALES-CONSTRUIDOS-_DISE%C3%91O-Y-OPERACI%C3%93N.pdf
- Asamblea Nacional Constituyente de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia 1991*. Bogotá: Asamblea Nacional Constituyente de Colombia.
- Beascoechea, E., Muñoz, J., & Fernández, D. (2010). *Manual de Fitodepuración: Nuevos filtros verdes de macrófitas en flotación para la Cuenca del Mediterránea*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid-EDITA. Obtenido de https://issuu.com/eriborri/docs/manual_depuracion_macrofitas/7
- Beltrán, R. (2013). *Guía de Métodos de Biorremediación para la recuperación de suelos contaminados con Hidrocarburos*. Tesis de postgrado. Bogotá: Universidad Libre. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>
- Breen, P. F. (1990). A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment. *Water Research*, 24(6), 689-697. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004313549090024Z>
- Brock, T. &. (1993). *Microbiología* (Sexta ed. ed.). Ciudad de México, México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Carvajal, A., Zapattini, C., & Quintero, C. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *DisTecD. Diseño y*

- Tecnología para el Desarrollo*, 88-108. Obtenido de <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/3744/3830>
- Carvajal, C. E., Ortiz, P., & Vega, 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. doi:<https://doi.org/10.18270/rt.v16i1.2317>
- CENTA. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. El Salvador: Secretariado Alianza por el Agua, Ideasmares. Obtenido de <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/manual-de-depuracion-de-aguas-residuales-urbanas>
- CEPAL & BID. (2018). *Proceso Regional de las Américas: Informe Regional de América Latina y el Caribe*. América Latina y el Caribe: Comisión Económica para América Latina y el Caribe; Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/informe_regional_america_latina_y_caribe.pdf
- Chavés, C. A., & Mojica, J. P. (2015). *Estudio de humedales flotantes para la mejora de calidad de agua de escorrentía. caso: edificio de parqueaderos de la Pontificia Universidad Javeriana. Tesis de pregrado*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21397/ChavesTequiaCamiloAndres2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Congreso de Colombia. (22 de Diciembre de 1993). *Función Pública: Gestor Normativo*. Recuperado el 11 de Mayo de 2020, de Ley 99 de 1993: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Crombet, S., Abalos, A., Rodríguez, S., & Pérez, N. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 49-56. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/57715/56573>
- DANE. (2011). *Ficha Técnica: Sistema de Información del Medio Ambiente; Nitrógeno Total*. Bogotá: DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Nitrogenos_totales_13.pdf
- De Paula García, M. C. (2015). *Estudio de crecimiento de plantas y evaluación de la capacidad de remoción de contaminantes en aguas residuales mediante microcosmos de humedales artificiales. Tesis de pregrado*. Xalapa: Universidad Veracruzana Facultad de Ciencias Químicas. Obtenido de <https://studylib.es/doc/7806588/universidad-veracruzana>
- Delgadillo, O., Pérez, L., Camacho, A., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión

- y Uso del Agua (Centro AGUA). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Diersing, N. (Mayo de 2009). NOAA. Recuperado el 29 de Mayo de 2020, de Phytoplankton Blooms: The Basics: <https://projects.iq.harvard.edu/files/climate/files/phytoplankton.pdf>
- Floating Island International ®. (Agosto de 2011). *Floating Treatment Wetlands to Mitigate Lake Eutrophication: Enhanced Circulation and Nutrient Uptake Expand Fish Habitat*. Obtenido de <http://midwestfloatingisland.com/wp-content/uploads/2015/05/Floating-Treatment-Wetlands-to-Mitigate-Lake-Eutrophication-Enhanced-Circulation-and-Nutrient-Uptake-Expand-Fish-Habitat.pdf>
- García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y exploración de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/2474>
- González, Á. J., & Perilla, L. (2015). *El humedal artificial como un espacio para la sensibilización en torno a las prácticas de uso de los recursos hídricos y sus posibilidades de reutilización. Tesis de pregrado*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Obtenido de <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/1756/TE-18886.pdf?sequence=1>
- IDEAM. (2007). *Nitrógeno Total en agua por el método Semi-Cromo*. Bogotá: Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. Obtenido de ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrógeno+Total+en+agua+Método+Kjeldahl+Electrodo+de+Amoniaco.pdf/6eac7192-9d88-41cf-b4f0-7b5332467901
- IDEAM. (2007). *Protocolo de muestreo extraído de apartes de: Toma de muestras de aguas superficiales*. República de Colombia: IDEAM. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/PROTOCOLO_MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf
- IDEAM. (2016). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante*. Bogotá: IDEAM. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021117/Carga_Organica.pdf
- IDEAM. (14 de Mayo de 2020). *Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Electrometría*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>
- IDEAM. (24 de Mayo de 2020). *Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- INCONTEC. (1995). *Norma Técnica colombiana NTC-ISO 5667-10*. Bogotá: INCONTEC. Obtenido de <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC-ISO5667-10.pdf>

- INCONTEC. (2012). *Norma Técnica Colombiana ISO 5667-3 Calidad del Agua. Directrices para la Preservación y Manejo de las Muestras*. Bogotá: INCONTEC. Obtenido de <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000140-e3b67e5121/NTC-ISO%205667-03-2004.%20Directrices%20para%20la%20preservacion%20y%20manejo%20de%20muestras.pdf>
- INECOL. (10 de Octubre de 2016). Humedales flotantes, una solución para la descontaminación de los lagos mexicanos. *iagua*, págs. <https://www.iagua.es/noticias/mexico/conacyt/16/10/28/humedales-flotantes-solucion-descontaminacion-lagos-mexicanos>.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* (Vol. 2). Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press, Taylor & Francies Group. Obtenido de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Lathrop, R., Carpenter, J., Panuska, P., & Craig, S. (1998). Phosphorus loading reductions needed to control blue-green algal blooms in Lake Mendota. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(5), 1169-1178. Obtenido de <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/f97-317>
- Leal, R. (2012). *Plantas exóticas: Heliconias Comunidad Bogotá Cachivera; Mitú, Vaupés*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Mitú, Vaupés, Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Recuperado el 2 de Octubre de 2019, de <https://hdl.handle.net/11404/2632>
- López, J., & Echeverri, J. (25 de marzo de 2020). *Protocolo de análisis de detergentes*. Obtenido de Sistema de gestión integral de Cornare: http://www.cornare.gov.co/sgi/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1147&Itemid=2
- Martelo, J., & Lara Borrero, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales, una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, ing. cienc*, 8(15), 221-243.
- Martínez, P. A. (2014). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas. Tesis doctoral*. Murcia, España: Universidad de Murcia. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/286327/TPAM.pdf;sequence=1>
- Mendoza, A. S. (2014). *Uso de plantas ornamentales en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de postgrado*. El Colegio de la Frontera Sur, Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. Tapachula: El Colegio de la Frontera Sur. Obtenido de <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000053552>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (2015). *Resolución 631 de 2015: "Por lo cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se*

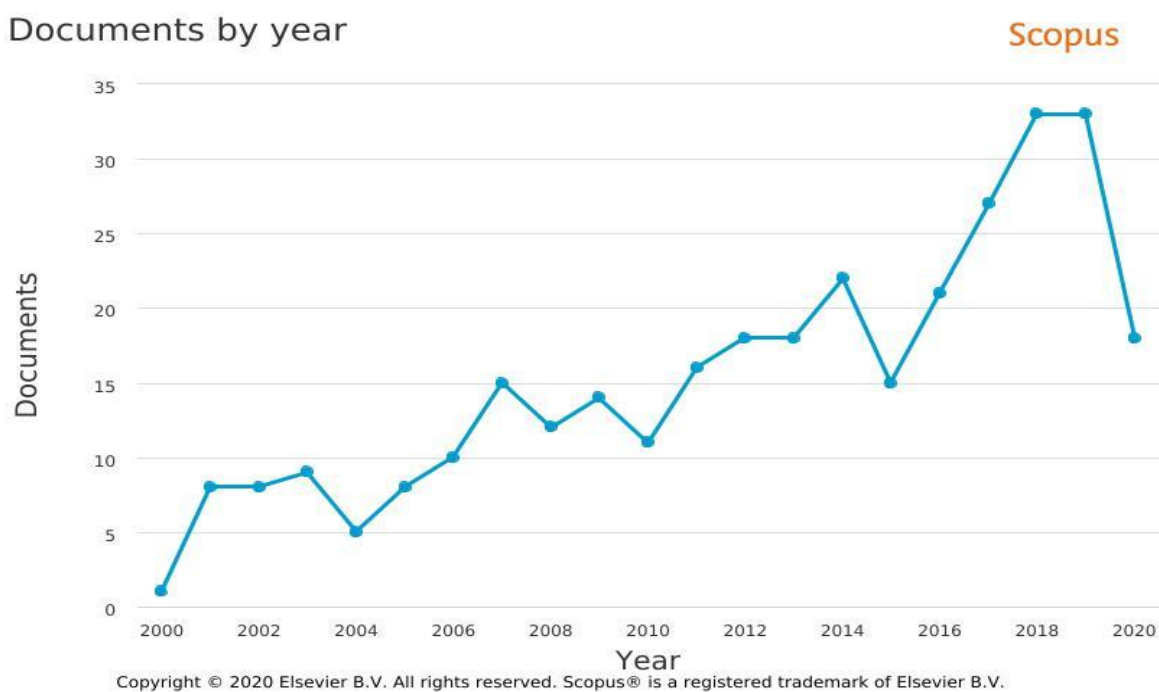
- dictan otras disposiciones.}''*. Colombia: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. (15 de Julio de 2002). *Ministerio de Vivienda y Desarrollo territorial*. Obtenido de Acciones prioritarias y formulación del plan de nacional de manejo de aguas residuales: <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3177%20-%202002.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO J. Alternativas tecnológicas en agua. En V. y. Ministerio de Ambiente, *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO J. Alternativas tecnológicas en agua* (pág. 284). Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/100811_titulo_j_ras%20_.pdf
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Dirección de Agua potable y Saneamiento Básico - RAS: Título E: Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá D.C.: Ministerio de Desarrollo Económico. Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017: Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009*. Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-agua/reglamento-tecnico-del-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable>
- Monge, M. (14 de Abril de 2020). *iagua*. Obtenido de Interpretación de un análisis de agua: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46. Obtenido de [http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22\(1\)-2013.pdf](http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22(1)-2013.pdf)
- Mulamoottil, G., McBean, E. A., & Rovers, F. (1997). *Constructed Wetlands for the Treatment of Lanfill Leachates*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Núñez, M., Cárdenas, C., Ramírez, Y., Rincón, S., Saules, L., & Morales, E. (2011). Removal of nitrogen and phosphorus by *Typha dominguensis* and *Lemna* sp. in laboratory scale constructed wetlands. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34(3). Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702011000300007

- OMS. (21 de Noviembre de 2014). *Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la Salud*. (Organización Mundial de la Salud) Recuperado el 28 de Septiembre de 2019, de http://www.who.int/water_sanitation_health/facts2004/
- Peña, E. J., Madera, C. A., Sánchez, J. M., & Medina, J. (Diciembre de 2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia Psittacorum*. *Académica Colombiana de Ciencia*, 37(145), 469-481. Obtenido de http://scihub.tw/http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000400004
- Pérez, G., Enciso, S., Del prado, M., & Castañón, J. (2017). *Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio*. Tesis de postgrado. Tuxtla, México: Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Obtenido de https://www.academia.edu/4139814/DISE%C3%91O_HIDR%C3%81ULICO_DE_UN_HUMEDAL_ARTIFICIAL_A_NIVEL_LABORATORIO
- Pérez, M. E. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*. Tesis Doctoral. Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua: CIMAR. Obtenido de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma.%20Elena%20P%C3%A9rez%20L%C3%B3pez.pdf>
- Rabat Blázquez, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseños de los sistemas naturales de depuración*. Tesis de postgrado. Alicante, España: Universidad de Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseno_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf
- Ríos, D. (2017). *Inventario de los sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Tesis de postgrado. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/593/2/Rey%20R%C3%ADos%20C%20Diana%20Elenith%20-%202017.pdf>
- Rodríguez, J., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (25 de Mayo de 2010). Estudio de comparación de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 1(1), 59-68. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222010000100005&lng=es&nrm=iso
- Rodríguez, S. D., & Vargas, Y. (2018). *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*. Tesis de pregrado. Villavicencio: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16743/2019sararodriguez.pdf?sequence=13&isAllowed=y>
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño* (Cuarta edición ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.

- Secretaría de Gobierno. (24 de Abril de 2019). *Municipios del Meta*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2019, de <https://www.datos.gov.co/Ordenamiento-Territorial/MUNICIPIOS-DEL-META/qun2-biqc>
- Shaver, E., Horner, R., May, C., & Ridley, G. (2007). *Fundamentals of Urban Runoff: Technical and Institutional Issues*. (2007 ed., Vol. 2). North American : NALMS. Obtenido de http://www.ilmalakes.org/PDF/Fundamentals_full_manual_lowres.pdf.
- Tanner, C., Sukias, J., Park, J., Yates, C., & Headley, T. (2011). Floating treatment wetlands: a new tool for nutrient management in lakes and waterways. *Helmholtz Centre for Environmental Research*, 1(1), 11-115. Obtenido de http://tur-www1.massey.ac.nz/~flrc/workshops/11/Manuscripts/Tanner_2011.pdf
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Inc. Staff Metcalf, E. (2003). *Wastewater engineering: Treatment, Disposal and Reuse* (4º Edición ed.). New York: McGraw-Hill.
- Thangavel, P., & Subhram, C. (2004). Phytoextraction: Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Indian National Science Academy*, 1, 109-130. Obtenido de https://insa.nic.in/writereaddata/UploadedFiles/PINSA/Vol70B_2004_1_Art07.pdf
- Vera Ospina, A. (1995). *Flora y vegetación acuática en áreas de la Orinoquía. Tesis de postgrado*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/7325/1/FLORA_ORINOQUENSE.pdf
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Humedales construidos: Diseño y operación*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Obtenido de http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/09/HUMEDALES-CONSTRUIDOS-_DISE%C3%91O-Y-OPERACI%C3%93N.pdf
- You, S., Hsu, C., Chuang, S., & Ouyang, C. (2003). Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS RBC and A20 systems. *Water Research*, 37, 2281-2290. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313540200636X?via%3Dihub>
- Zurita, F. B., De Anda, M., & White J, J. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, 63(4), 654-659. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/49845097_Seeking_a_way_to_promote_the_use_of_constructed_wetlands_for_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries

ANEXOS

Anexo 1. Línea de tiempo de los documentos encontrados con las palabras de búsqueda "Floating wetlands" y "Macrophytes"



Anexo 2. Fotografía del riego de las plantas ornamentales a partir de las soluciones de ARD y agua potable, con fines de adaptación



Anexo 3. Planilla Control de Crecimiento de las Plantas Ornamentales

Tabla No. ____	Control de Crecimiento de las Plantas Ornamentales			
Canasta	Altura de los tallos (cm)	Número de Flores	Coloración	Fecha
Maceta # Especie				
Maceta # Especie				
Maceta # Especie				

Anexo 4. Excavación de los humedales



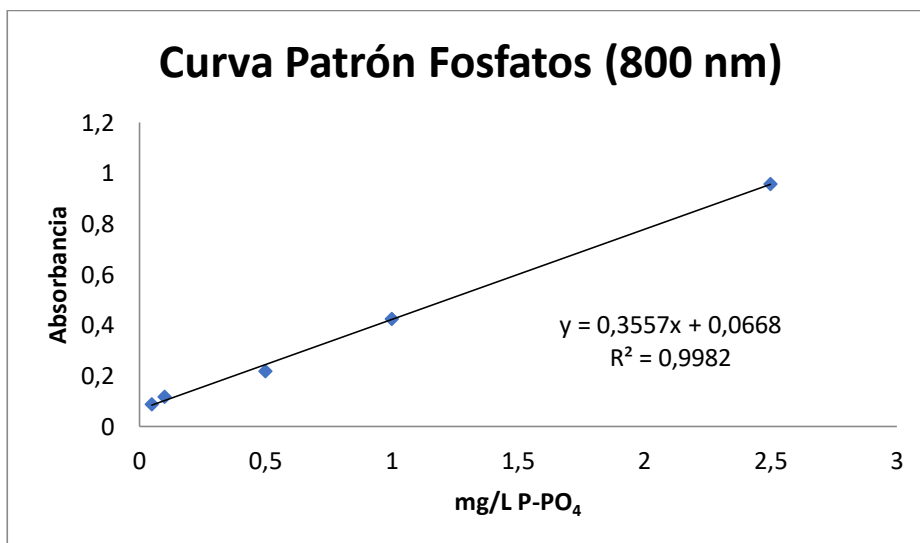
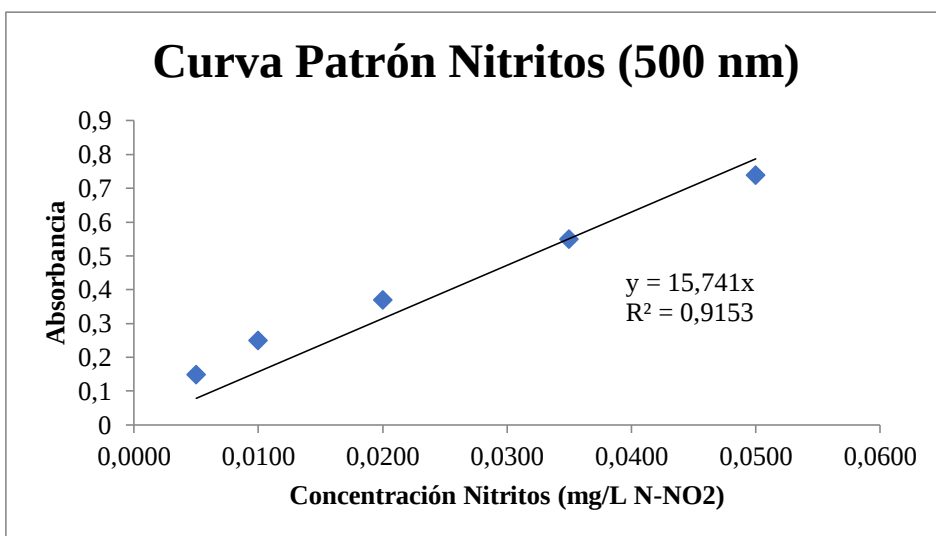
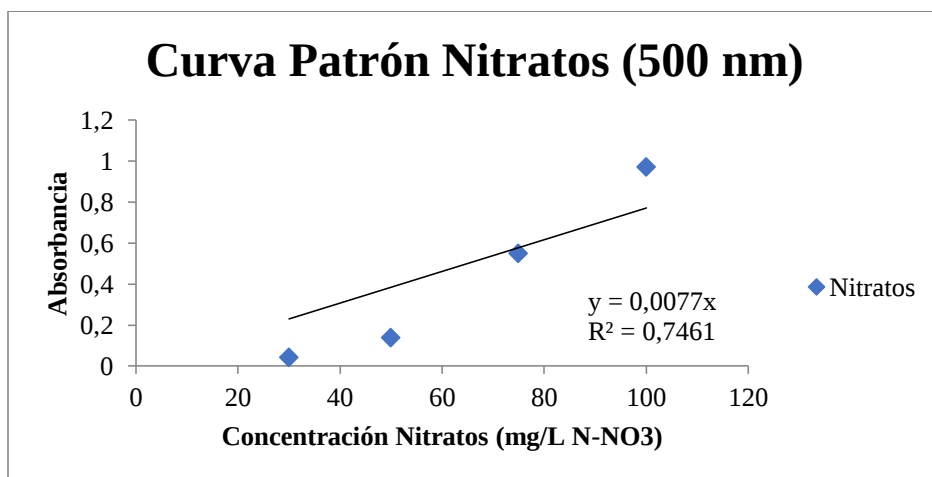
Anexo 5. Recubrimiento de los humedales artificiales

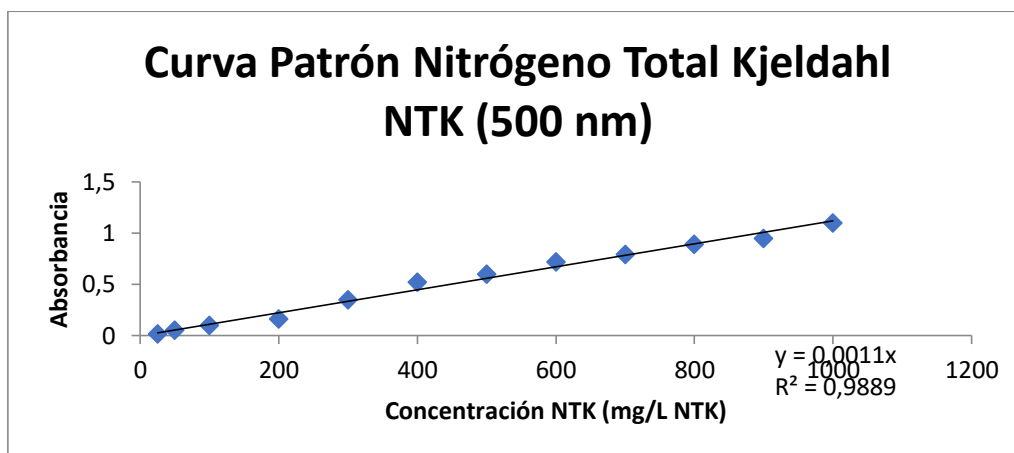


Anexo 6. Transporte del ARD y vaciado de los humedales



Anexo 7. Curvas patrón para la determinación de las concentraciones de cada nutriente



Anexo 8. Tabla de concentraciones de DBO₅ y SST

	TRH (días)	Humedal- Especie	Promedio de Concentración Entrada DBO ₅ mg/L	Concentración Salida DBO ₅ mg/L	% de remoción de DBO ₅	Concentración Entrada SST mg/L	Concentración Salida de SST	% de remoción de SST
Primer tratamiento	4	H1 <i>H.p.</i>	85,49	75,98	11,13	3000	1900	36,67
		H1A.p.		71,87	15,93		1650	45,00
	6	H2 <i>H.p.</i>		72,14	15,62		1400	53,33
		H2A.p.		55,76	34,78		1300	56,67
	8	H3 <i>H.p.</i>		72,32	15,40		1425	52,50
		H3A.p.		68,04	31,83		1450	51,67
Segundo tratamiento	4	H1 <i>H.p.</i>	101,22	86,63	14,42	4000	2385	40,37
		H1A.p.		83,48	17,53		2020	49,50
	6	H2 <i>H.p.</i>	95,00	79,63	16,18	6695	2500	62,66
		H2A.p.		60,60	36,14		2550	61,91
	8	H3 <i>H.p.</i>	116,42	89,40	23,21	3230	1450	55,10
		H3A.p.		77,05	33,82		1400	56,65

Anexo 9. Resultados de NT, NTK, NO₃, NO₂

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración inicial (NTK) mg/L	Concentración final (NTK) mg/L	Concentración inicial (NO ₂) mg/L	Concentración final (NO ₂) mg/L	Concentración inicial (NO ₃) mg/L	Concentración final (NO ₃) mg/L	Σ Concentración Inicial de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	Σ Concentración Final de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	Porcentaje de remoción
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	83,64	87,27	0,015	0,029	6,62	6,62	90,27	93,93	-4,04
		H1 <i>A.p.</i>		85,45		0,011		10,91		96,37	-6,76
	6	H2 <i>H.p.</i>		94,55		0,004		10,52		105,07	-16,39
		H2 <i>A.p.</i>		85,45		0,010		8,31		93,78	-3,88
	8	H3 <i>H.p.</i>		116,36		0,010		24,16		140,53	-55,67
		H3 <i>A.p.</i>		163,64		0,004		6,62		170,26	-88,61
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	103,64	81,82	0,010	0,010	10,90	11,30	114,56	93,13	18,71
		H1 <i>A.p.</i>		126,36		0,008		11,04		137,41	-19,95
	6	H2 <i>H.p.</i>		80,00		0,013		36,36		116,38	-1,59
		H2 <i>A.p.</i>		122,73		0,007		25,58		148,32	-29,47
	8	H3 <i>H.p.</i>		70,00		0,005		7,66		77,67	32,20
		H3 <i>A.p.</i>		131,82		0,004		10,52		142,34	-24,26

Anexo 10. Cálculo para comparar proporcionalmente las eficiencias de los humedales flotantes y las lagunas de estabilización

Características de las Lagunas de Estabilización:

Caudal: $Q = 4 \text{ L/s} = ((345,60 \frac{\text{m}^3}{\text{d}})/2 \text{ Lagunas}) = 172,80 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ de cada laguna; Área= 700 m²

Cálculo para la remoción de DBO₅/m²Cálculos para las lagunas de estabilización

$\text{DBO}_{\text{Entrada}} = 0,116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\text{DBO}_{\text{SalidaLagunaA}} = 0,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\text{DBO}_{\text{SalidaLagunaB}} = 0,043 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Carga orgánica superficial (COS) Entrada: $\frac{\text{Caudal} * \text{DBO}}{\text{Área}} = \frac{(172,80 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,028 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^2 * \text{d}}$

$\text{COS Salida Laguna A} = \frac{(172,80 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,014 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^2 * \text{d}}$

$\text{COS Salida Laguna B} = \frac{(172,80 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,043 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,010 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^2 * \text{d}}$

$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{\text{Concentracion entrada} - \text{Concentracion salida}}{\text{Concentracion entrada}} \right) * 100$

$$\% \text{ Remoción Laguna A} = \left(\frac{0,028 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d} - 0,014 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}}{0,028 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 50,00\%$$

$$\% \text{ Remoción Laguna B} = \left(\frac{0,028 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d} - 0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}}{0,028 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 64,28\%$$

Cálculos para los Humedales Flotantes:

$$\text{Caudal} = 0,07 \frac{m^3}{d}; \text{Área} = 0,8 \text{ m}^2; \text{DBO}_{\text{Entrada}} = 0,116 \frac{kg}{m^3}; \text{DBO}_{\text{Salida H3 H.p.}} = 0,089 \frac{kg}{m^3};$$

$$\text{DBO}_{\text{Salida H3 A.p.}} = 0,077$$

$$\text{COS Entrada: } \frac{\text{Caudal} * \text{DBO}}{\text{Área}} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,116 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida H3 H.p.} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,089 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,0077 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida H3 A.p.} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,077 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,0067 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}$$

$$\% \text{ Remoción H3 H.p.} = \left(\frac{0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d} - 0,0077 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}}{0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 23,00 \%$$

$$\% \text{ Remoción H3 A.p.} = \left(\frac{0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d} - 0,0067 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}}{0,010 \frac{kg \text{ DBO}}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 33,00 \%$$

Cálculo para la remoción de P-PO₄/m²

Cálculos para las lagunas de estabilización

$$\text{P-PO}_{4\text{Entrada}} = 0,00323 \frac{kg}{m^3}; \text{P-PO}_{4\text{Salida Lagunas}} = 0,0022 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{COS Entrada} = \frac{(172,80 \frac{m^3}{d} * 0,00323 \frac{kg}{m^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,00079 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida Lagunas} = \frac{(172,80 \frac{m^3}{d} * 0,0022 \frac{kg}{m^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,00054 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}$$

$$\% \text{ Remoción Lagunas} = \left(\frac{0,00079 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d} - 0,00054 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}}{0,00079 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 31,64 \%$$

Cálculos para los Humedales Flotantes:

$$\text{Caudal} = 0,07 \frac{m^3}{d}; \text{Área} = 0,8 \text{ m}^2; \text{P-PO}_4\text{Entrada} = 0,00323 \frac{kg}{m^3}; \text{P-PO}_4\text{SalidaH3H.p.} = 0,0019 \frac{kg}{m^3}; \text{P-}$$

$$\text{PO}_4\text{SalidaH3A.p.} = 0,0022 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{COS Entrada} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,00323 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,00028 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida H3 H.p.} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,0019 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,00016 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida H3 A.p.} = \frac{(0,07 \frac{m^3}{d} * 0,0022 \frac{kg}{m^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,00019 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}$$

$$\% \text{ Remoción H3 H.p.} = \left(\frac{0,00028 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d} - 0,00016 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}}{0,00028 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 42,85\%$$

$$\% \text{ Remoción H3 A.p.} = \left(\frac{0,00028 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d} - 0,00019 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}}{0,00028 \frac{kg \text{ P-PO}_4}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 32,14\%$$

Cálculo para la remoción de NT/m²Cálculos para las lagunas de estabilización

$$\text{Caudal lagunas} = 172,80 \frac{m^3}{d}; \text{NT}_{\text{Entrada}} = 0,114 \frac{kg}{m^3}; \text{NT}_{\text{SalidaLagunas}} = 0,0878 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{COS Entrada} = \frac{(172,80 \frac{m^3}{d} * 0,114 \frac{kg}{m^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,028 \frac{kg \text{ NT}}{m^2 * d}$$

$$\text{COS Salida Lagunas} = \frac{(172,80 \frac{m^3}{d} * 0,0878 \frac{kg}{m^3})}{700 \text{ m}^2} = 0,021 \frac{kg \text{ NT}}{m^2 * d}$$

$$\% \text{ Remoción Lagunas} = \left(\frac{0,028 \frac{kg \text{ NT}}{m^2 * d} - 0,021 \frac{kg \text{ NT}}{m^2 * d}}{0,028 \frac{kg \text{ NT}}{m^2 * d}} \right) * 100 \% = 25,00 \%$$

Cálculos para los Humedales Flotantes:

$$\text{Caudal} = 0,07 \frac{m^3}{d}; \text{Área} = 0,8 \text{ m}^2; \text{NT}_{\text{Entrada}} = 0,114 \frac{kg}{m^3}; \text{NT}_{\text{SalidaH3H.p.}} = 0,077 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{COS Entrada} = \frac{(0,07 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,0099 \frac{\text{kg NT}}{\text{m}^2 * \text{d}}$$

$$\text{COS Salida H3 H.p.} = \frac{(0,07 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,077 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{0,8 \text{ m}^2} = 0,0067 \frac{\text{kg NT}}{\text{m}^2 * \text{d}}$$

$$\% \text{ Remoción H3 H.p.} = \left(\frac{0,0099 \frac{\text{kg NT}}{\text{m}^2 * \text{d}} - 0,0067 \frac{\text{kg NT}}{\text{m}^2 * \text{d}}}{0,0099 \frac{\text{kg NT}}{\text{m}^2 * \text{d}}} \right) * 100 \% = 32,32\%$$

Anexo 11. Porcentajes de remoción de contaminantes

	TRH (días)	Humedal- Especie	% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT	Eficiencia de remoción de contaminantes
Primera ronda	4	H1 H.p.	11,13	36,67	39,56	-4,04	20,83
		H1 A.p.	15,93	45,00	32,96	-6,76	21,78
	6	H2 H.p.	15,62	53,33	-8,72	-16,39	10,96
		H2 A.p.	34,78	56,67	-2,34	-3,88	21,31
	8	H3 H.p.	15,40	52,50	29,14	-55,67	10,34
		H3 A.p.	31,83	51,66	27,44	-88,61	5,58
Segunda ronda	4	H1 H.p.	14,42	40,37	88,77	18,71	40,57
		H1 A.p.	17,53	49,50	46,35	-19,95	23,36
	6	H2 H.p.	16,18	62,66	12,87	-1,59	22,53
		H2 A.p.	36,14	61,91	22,95	-29,47	22,88
	8	H3 H.p.	23,21	55,10	39,64	32,20	37,54
		H3 A.p.	33,82	56,65	29,90	-24,26	24,03