

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS,
EN LA CORPORACIÓN MAESTRA VIDA, EN EL MUNICIPIO DEL TAMBO, CAUCA**



**HAROLD ANDRES ORTEGA MONCAYO
RICARDO ANDRES ROSERO GARCES**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA
ABRIL 2019**

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, EN LA
CORPORACIÓN MAESTRA VIDA, EN EL MUNICIPIO DEL TAMBO, CAUCA**

**HAROLD ANDRES ORTEGA MONCAYO
Cod. 104914010445**

**RICARDO ANDRES ROSERO GARCES
Cod 104914011882**

**Informe final de trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**DIRECTOR
PhD. JUAN CARLOS CASAS ZAPATA**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN GCISA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA
ABRIL 2019**

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, 24 de abril de 2019

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2. JUSTIFICACIÓN	6
3. OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos.....	9
4. MARCO TEORICO.....	10
4.1 Componentes del humedal	14
4.1.1 Agua	14
4.1.2 Vegetación.....	14
4.1.3 Sustrato o medio de soporte	15
4.1.4 Microorganismos.....	16
4.2 Mecanismos de Remoción.....	16
4.2.1 Remoción de Sólidos Suspendidos.....	16
4.2.2 Remoción de Materia Orgánica.....	17
4.2.3 Remoción de Nitrógeno.....	17
4.2.4 Remoción de Fósforo	18
4.2.5 Remoción de patógenos.....	19
5. METODOLOGÍA	21
5.1 Área de estudio	21
5.2 Humedal horizontal de flujo subsuperficial	22
5.3 Siembra de las plantas	23
5.4 Arranque del sistema	23
5.5 Toma de muestras.....	23
5.6 Análisis de datos.....	24
6. RESULTADOS Y ANALISIS.....	26
6.1 Remoción de Demanda Química De Oxígeno (DQO).....	29
6.2 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	34

6.3 Remoción de Nitrógeno.....	37
6.4 Remoción de Fósforo	40
6.5 Remoción de Patógenos	43
CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS	50
ANEXOS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del humedal artificial de flujo subsuperficial.....	11
Figura 2. <i>Heliconia. psittacorum</i>	13
Figura 3. Municipio de El Tambo – Cauca.	21
Figura 4. Sistema de tratamiento de aguas residuales de la Corporación Maestra Vida	22
Figura 5. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de DQO a. Análisis Entrada— Salida. b. Análisis Testigo-Salida	33
Figura 6. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de DQO a la entrada del humedal y la salida del testigo	34
Figura 7. Ubicación del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Corporación Maestra Vida.	36
Figura 8. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de SST a la entrada y a la salida del humedal	37
Figura 9. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de NO_3^- a la entrada y a la salida del humedal	40
Figura 10. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de PO_4^- a la entrada y a la salida del humedal	43
Figura 11. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de Coliformes fecales a la entrada y a la salida del humedal	46

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Fluctuación de los caudales de muestreo a lo largo del tiempo.	26
Grafica 2. Fluctuación del pH de muestreo a lo largo del tiempo.....	27
Grafica 3. Fluctuación de la temperatura de muestreo a lo largo del tiempo.....	28
Grafica 4. Fluctuación de los valores de DQO en los puntos de muestreo del humedal.	30
Grafica 5. Fluctuación de los porcentajes de remoción de materia orgánica a lo largo del tiempo.....	31
Grafica 6. Fluctuación de los valores de SST en los puntos de muestreo del humedal.	35
Grafica 7. Fluctuación de los porcentajes de remoción de sólidos a lo largo del tiempo. ...	36
Grafica 8. Fluctuación de los valores de NO_3^- en los puntos de muestreo del humedal.	39
Grafica 9. Fluctuación de los valores de Fósforo en los puntos de muestreo del humedal.	42
Grafica 10. Fluctuación de los porcentajes de remoción de fosfatos a lo largo del tiempo.	42
Grafica 11. Fluctuación de los valores de Coliformes Totales en los puntos de muestreo del humedal.	44
Grafica 12. Fluctuación de los valores de Coliformes Fecales en los puntos de muestreo del humedal.	45

INTRODUCCIÓN

La fuente de agua es importante para la vida de los humanos y otros organismos en los ecosistemas. Sin embargo, en los países en desarrollo, el tratamiento de aguas residuales es menos preocupante en comparación con otros desarrollos, como la economía y la sociedad (Konnerup *et al.*, 2011). Solo el 2-30% de las aguas residuales domésticas y municipales son tratadas, mientras que en algunas áreas rurales pequeñas tienen pocas o ninguna planta de tratamiento de aguas residuales (Qadir *et al.*, 2010). En las zonas urbanas, el 75-80% de las aguas residuales domésticas se tratan preliminarmente mediante fosas sépticas y luego se descargan en cuerpos de agua como lagos, ríos y arroyos (Cao *et al.*, 2016). Este efluente contaminado afecta seriamente la salud humana. Las enfermedades relacionadas con las vías transportadas por el agua, como el dengue, la malaria o la tripanosomiasis, son problemas graves en todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo. En consecuencia, alrededor de 3900 niños mueren a diario por enfermedades transmitidas por el agua (Shannon *et al.*, 2008).

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que no sería apta para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Rodríguez–Monroy y Duran de Bazúa 2006).

En Colombia se generan más de 4.5 millones de m³ mensuales de aguas residuales en actividades domésticas, agropecuarias e industriales. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de este país, cerca del 90 % de estas aguas son vertidas directamente en los ríos, convirtiéndose en la principal fuente de contaminación de aguas superficiales (MAVDT 2004, MAVDT 2010b). Asimismo, en el país, a pesar de los logros de los últimos años, solo 48,2% del total de municipios cuentan con Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Solo 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Dane) cuentan con algún tipo de planta de tratamiento de aguas residuales. En Colombia sólo existen 237 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, al igual que en el caso de los residuos sólidos, el número real de PTAR en buen estado es desconocido.

Cabe resaltar que según la Corporación Regional del Cauca en 2017 el departamento del Cauca, de las 90 plantas construidas no hay 10 plantas funcionando eficientemente y las otras 80 no funcionan. Algunas están abandonadas otras están destruidas, lo que refleja una gran problemática en cuanto al diseño, construcción y control de estos sistemas.

En las últimas décadas diversos estudios realizados alrededor del mundo se han centrado en el desarrollo de sistemas de tratamiento que sean eficientes en la remoción o transformación de contaminantes y que además sean viables en términos económicos, técnicos y sociales. Producto de esta dinámica, en la actualidad existen diferentes métodos para el tratamiento de aguas residuales, entre los que los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HFSS, por sus siglas en inglés), sobresalen como un método eficaz y económico para el tratamiento de diferentes tipos de efluentes (Bedoya *et al.*, 2014). A pesar de que los HFSS han sido

ampliamente utilizados y desarrollados en diferentes regiones del mundo, en Colombia - donde cerca de un 50 % de los sistemas de tratamiento corresponden a lagunas de estabilización (MAVDT 2010b)- es un campo desconocido, poco apreciado y prácticamente inutilizado.

Con la información anterior y por el hecho de que la mayoría de las investigaciones reportadas en la literatura resaltan la aplicabilidad y viabilidad de utilizar estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales, se realizó un estudio en la Corporación Maestra Vida ubicada en el municipio del Tambo, Cauca con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de carga contaminante presente en agua residual de dicha Corporación a través de la implementación de humedal de flujo subsuperficial horizontal, evaluando también la calidad del afluente, con el fin de darle un uso posterior para los riegos de cultivos presentes en la zona.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actividades humanas y el desarrollo de sus poblaciones han generado un continuo detrimento de los ecosistemas y de manera general de la calidad del ambiente, especialmente sobre los cuerpos de agua debido al manejo inadecuado de las aguas residuales de origen industrial, agrícola y urbano, además de las actividades mineras legales e ilegales (Ramalho *et al.*, 1996). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en casi la totalidad de los países de América Latina están muy distantes de lo requerido en materia ambiental (Montoya *et al.*, 2010). Estos sistemas de tratamiento en su mayoría incumplen con los niveles establecidos en materia ambiental, esto es debido a la poca inversión en infraestructura y mantenimiento junto con la falta de educación ambiental y la falta de apropiación de estos sistemas por parte de la comunidad; en Colombia en 989 localidades, con población menor a 30.000 habitantes, el 78% no tiene tratamiento alguno de aguas residuales (Lizarazo y Orjuela, 2013). Además, la mayoría de los municipios del territorio nacional carecen de infraestructuras aptas para el tratamiento de las aguas residuales, debido, por una parte, a la falta de conciencia ambiental y a los altos costos de operación y mantenimiento (Villegas y Vidal, 2009).

El vertimiento de estas aguas residuales a cuerpos de agua ha generado condiciones anóxicas y eutrofización en las corrientes hídricas ubicadas en el perímetro urbano, lo cual disminuye la oferta hídrica debido al contenido de sustancias tóxicas, patógenas y abrasivas (Bedoya *et al.*, 2014).

En busca de soluciones se han implementado el uso de sistemas o plantas de tratamiento de aguas residuales, muchas de las plantas de tratamiento convencionales operan por períodos

limitados (y otras son abandonadas), debido a diferentes razones, entre ellas a elevados costos de operación y mantenimiento (MAVDT 2004). Varios de los sistemas desarrollados de tratamiento tipo humedal construido se caracterizan por ser relativamente económicos y sencillos de elaborar, realizan los complejos procesos naturales de depuración, físicos, químicos y biológicos, son versátiles y estables ante diferentes concentraciones y tipo de contaminantes, presentan menos disipación de energía, baja producción de residuos, bajo impacto ambiental y son más bien simples de operar (Montoya *et al.*, 2010), no obstante, estas tecnologías de purificación de aguas residuales no se han difundido e implementado en las comunidades tanto rurales como urbanas, lo que ha limitado su importancia.

Para el caso de estudio, la Corporación Maestra Vida y sus alrededores por ser una zona rural no se cuenta con un sistema de alcantarillado, las aguas residuales son vertidas directamente al suelo, sin ningún tipo de tratamiento, dicha situación afecta y contamina los suelos, aguas subterráneas y fuentes hídricas que puedan estar cerca de los vertimientos. De igual forma, la consecuencia del cambio climático obliga a implementar un sistema de reciclaje de estas aguas residuales para ser utilizada en otras actividades que no requieran un agua de alta calidad.

Con relación a lo anterior y teniendo en cuenta que en el municipio del Tambo en su zona rural no se cuenta con ningún sistema de tratamiento de aguas residuales o de algún sistema que permita reutilizar el líquido vital, se presenta la siguiente pregunta de investigación:

¿Constituye un humedal construido un sistema eficiente de depuración de aguas residuales domésticas de la comunidad rural de la corporación Maestra Vida?

2. JUSTIFICACIÓN

La ineficacia en el tratamiento de vertidos domésticos ha motivado a la ingeniería a desarrollar alternativas eficientes. Entre estas soluciones las ecotecnologías han causado alto impacto puesto que simulan y optimizan fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza, son técnicas basadas en la fitoremediación, con una tecnología simple y un bajo costo operacional, que se han implementado en diversos sistemas de tratamientos y han demostrado ser efectivos en la obtención de efluentes con alta higiene. Una de estas ecotecnologías supone los humedales construidos, los cuales presentan una mayor ventaja en la remoción de materia orgánica, transformación de nutrientes y eliminación de sustancias tóxicas de aguas residuales. Estos sistemas pueden adoptar diferentes diseños entre ellos, flujo del agua, lecho filtrante frecuencia de alimentación y tipo de vegetación, con los que se obtienen resultados de calidad específicos (Gilón, 2014).

Numerosas investigaciones han informado sobre la aplicación de humedales como una opción eficaz de bajo costo para el tratamiento secundario y terciario de aguas residuales, considerándolas una opción adecuada para la depuración de aguas residuales de pequeños núcleos en áreas rurales (Rodríguez *et al.*, 2013). En los últimos años, el tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas ha despertado un gran interés por el potencial que han presentado para la depuración de estas. Estos sistemas han logrado proporcionar un tratamiento integral, en donde no solamente se remueven eficientemente materia orgánica y sólidos en suspensión, sino que también se logran reducir nutrientes, sales disueltas y microorganismos patógenos (Arango, 2007).

En este sentido los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en macrófitas o aquellas plantas que crecen en suelos saturados de agua, constituyen una alternativa eficiente y económica para la depuración o disminución de los contaminantes, para que de esta manera mejorar la calidad del efluente y pueda ser reusado o vertido en cuerpos de agua que pueden tolerar esos niveles de carga contaminante, por ello la importancia de darle un tratamiento adecuado a las aguas residuales proveniente de la Corporación Maestra Vida con un sistema de bajo costo y en armonía con el ambiente como lo son los humedales construidos, todo esto cumpliendo las normatividades vigentes.

En este tipo de sistemas naturales se han realizado diferentes investigaciones, en la cuales se han modificado variables como el tiempo de retención, porcentaje de carga orgánica removida, tipo de materiales utilizados, y en especial el tipo de especie macrófita a ser sembrada, se observa la utilización muy común de las especies como *Heliconia psittacorum*, por lo que ofrecen una alta eficiencia de remoción de carga contaminante, además de que son ampliamente distribuidas a nivel mundial, lo que supone un fácil acceso con costos reducidos.

En cuanto a la absorción de nitrógeno (N) y fósforo (P) muchos estudios en los climas templados han demostrado que la cantidad que puede ser eliminado por la cosecha es generalmente insignificante. Sin embargo, en climas tropicales, donde las plantas crecen más rápido y durante todo el año, la absorción de nutrientes probablemente puede contribuir a significativamente mayores extracciones de nutrientes (Konnerup *et al.*, 2008).

Las plantas que crecen en humedales construidos son la característica visual más obvia de estos sistemas, muchos estudios han demostrado que las plantas contribuyen al tratamiento

del agua a través de ambos mecanismos directos e indirectos y por lo tanto son una parte esencial de los humedales. Las funciones más importantes de las plantas se relacionan con sus efectos físicos en los humedales. Las raíces proporcionan una gran área superficial para el crecimiento microbiano adjunto, las plantas también pueden facilitar la degradación aeróbica mediante la liberación de oxígeno a la rizósfera.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica del agua residual doméstica proveniente de la Corporación Maestra Vida mediante la implementación de un humedal horizontal de flujo subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum*.

3.2 Objetivos específicos

Determinar la calidad del agua depurada por el sistema de tratamiento tipo humedal, mediante análisis fisicoquímicos (Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Fósforo (P-PO₄⁻) y Nitrógeno (N-NO₃⁻)) y microbiológicos (Coliformes fecales y totales).

Analizar la capacidad de adaptación y desarrollo del cultivo de *Heliconia psittacorum* en el humedal de flujo subsuperficial horizontal construido para la depuración de aguas residuales en la Corporación Maestra Vida.

4. MARCO TEORICO

La acelerada contaminación del recurso hídrico en Colombia y el convencimiento de agotabilidad del mismo, llevan a plantear soluciones para la consecución de un buen estado ecológico de las aguas y de los ecosistemas acuáticos, como mejor garantía de cantidad y calidad del recurso (enfoque ecológico para el uso sostenible del agua), para lograr este objetivo. Diseñar y construir biosistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo costo es una alternativa adecuada ya que además de ser una solución eficiente es novedosa (Arango, 2007).

La tecnología de humedales construidos (figura 1), han venido proporcionando buenos resultados además de los bajos costos que ejecutarlos requiere. Por mencionar algunas de las ventajas, se encuentra la nula generación de lodos, el bajo costo de la construcción y mantenimiento teniendo en cuenta un constante seguimiento; además son sistemas flexibles y poco susceptibles a cambios de caudal y carga del efluente. Es relevante así mismo, mencionar no solo las ventajas sino también las desventajas, entre algunas, figura el poco conocimiento en tema de diseño y funcionamiento, la pérdida de volumen por efecto de la evapotranspiración y el aumento de la salinidad del efluente (Dávila, 2013).

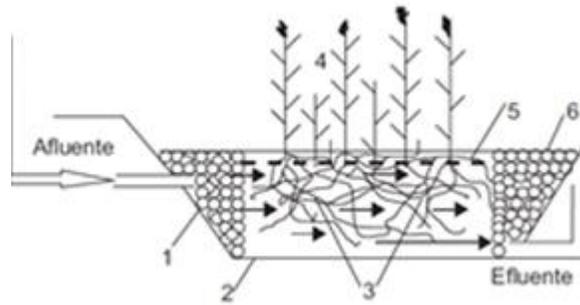


Figura 1. Esquema general del humedal artificial de flujo subsuperficial. 1. zona de distribución llena de rocas grandes, 2. Zona de tratamiento, 3. Medio de filtración con grava, 4. Vegetación, 5. Nivel de agua, 6. Zona de colección. (Tomado de Bedoya *et al.*, 2014)

Los procesos utilizados principalmente son físicos, químicos y biológicos. Dentro de estos últimos, los Humedales Construidos son utilizados para aguas residuales de tipo doméstico, aunque también han funcionado para aguas de origen industrial. Su utilización fue desarrollada en Europa hace aproximadamente veinte años, donde siguen operando con éxito. Los Humedales Construidos se definen como sistemas que simulan una zona de transición entre el ambiente terrestre y el acuático, pero que son específicamente construidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento. Entre las ventajas de este sistema se encuentra el bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, así como la generación de un paisaje agradable. Los HC correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las aguas municipales, industriales y las de lluvia, y son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales. Son una tecnología

efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente (Romero *et al.*, 2009).

La filtración natural en el sustrato también ayuda a la eliminación de muchos contaminantes y microorganismos patógenos (Wolverton, Barlow, y McDonald, 1976). Por esto las macrófitas juegan un papel fundamental en las aguas residuales objeto de estudio Corporación Maestra Vida. Puesto que actúan como filtro de microorganismos y partículas contaminantes para la salud humana. Se puede utilizar la capacidad que tienen las macrófitas de absorber grandes cantidades de nutrientes y sustancias tóxicas, para que dentro de los humedales artificiales participen en los procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de mejorar la calidad hídrica (Prystay, 1998).

En este caso se pretende utilizar en el humedal la macrófita *Heliconia psittacorum* debido a que es una planta neotropical de uso comercial que desde los años 70's se ha cultivado, debido en gran parte, a su valor ornamental (figura 2). La mayoría de las plantas del género *Heliconia*, se distribuyen en el Neotrópico, desde el sur de México hasta el norte de Argentina, incluyendo las islas del Caribe. Colombia es considerada el país más diverso en *Heliconias* con 94 plantas que equivalen a aproximadamente el 50% del total de plantas descritas. En el país, las plantas de este género alcanzan la mayor diversidad entre los 500 y los 1500 m.s.n.m. y tienen dos sitios altamente diversos: la vertiente Pacífica y los Andes. Recientemente, estudios han evaluado el papel de esta especie en la remediación de aguas residuales encontrando efectos positivos en la biorremediación, estas evidencias muestran una cierta tolerancia de *H. psittacorum* a un amplio espectro de condiciones ambientales, por

lo que la hace una especie atractiva para su uso en sistemas naturales como los humedales construidos subsuperficiales (HC) para el tratamiento de aguas residuales (Peña *et al.*, 2013).



Figura 2. *H. psittacorum* tomado de <http://www.photomazza.com>

En estudios realizados sobre tratamiento de aguas residuales, utilizando humedales artificiales, con el fin de remover cargas orgánicas se han planteado diversos conceptos y definiciones que pretendan establecer las ideas y finalidades del proceso investigativo. Las aguas residuales domésticas son los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales, también son llamadas aguas servidas, aguas fecales o aguas negras, es decir, aquellas que transportan fósforo, grasas, excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación, ya que habiendo sido usada el agua, no sirve para el usuario directo, por lo tanto son residuos que contienen todos los organismos patógenos que afectan al hombre (Paredes, 2014).

4.1 Componentes del humedal

4.1.1 Agua: La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial por que reúne todas las funciones del humedal y por qué a menudo es el factor primario en el éxito o fracaso del sistema. Algunas consideraciones importantes acerca de la hidrología de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales son (Salazar y Morales, 2003).

- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero obstruyendo los caminos de flujo siendo quebrado el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas y segundo bloqueando la exposición al sol y al viento.

4.1.2 Vegetación: Las macrófitas que crecen en humedales construidos son un componente esencial en el diseño de plantas para el tratamiento de aguas residuales ya que tienen grandes propiedades con relación a los procesos de remoción.

Uno de los más importantes efectos tiene que ver con los efectos físicos que las plantas ocasionan: efecto de filtración, control de erosión, área superficial para el crecimiento bacterial. De otra parte, el metabolismo de las plantas (adsorción de elementos, liberación de oxígeno, etc.) afecta los procesos de tratamiento en diferentes formas dependiendo del diseño, por ultimo las plantas tienen otras funciones como habitad de fauna silvestre, brinda una estética que pocos sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden tener (Paredes y

Kuschik, 2001). Un tipo especial de macrófitos son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra área emergente (Lahora A, 2001).

Lo más importante en los humedales (SFS) es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que luego sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija la que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre (Lara, 1999).

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja (Delgadillo *et al.*, 2010).

4.1.3 Sustrato o medio de soporte: El medio filtrante de los humedales de flujo subsuperficial horizontal puede ser cascajo de piedra, grava, diferentes tipos de suelo o sustratos enriquecidos, que soportan el crecimiento de vegetación emergente. El agua fluye horizontalmente a través de las raíces de las plantas y el medio filtrante, luego el efluente tratado es recolectado en un canal de salida o tubería. (Peña *et al.*, 2003).

En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. El medio granular debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula, donde los diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. Una característica muy

importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él, por lo cual durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo (García y Corzo, 2008).

4.1.4 Microorganismos: Según Davis (1994) y Kushck y Paredes (2001) los microorganismos se constituyen en el mayor sumidero de carbono orgánico y de muchos nutrientes ya que transforman gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas, influyen en las condiciones de oxido-reducción del sustrato y por ende en la capacidad de procesamiento del humedal y se involucran en el reciclaje de nutrientes.

4.2 Mecanismos de Remoción

4.2.1 Remoción de Sólidos Suspendidos

La remoción de los sólidos suspendidos y sedimentables presentes en las aguas residuales ocurre fundamentalmente en las unidades de pre-tratamiento, las cuales usualmente se instalan delante de los humedales. Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual después del pre-tratamiento son removidos por sedimentación y filtración. Estos procesos que son puramente físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes presentes en las aguas residuales (DBO, nutrientes, patógenos). La remoción de los sólidos suspendidos es muy efectiva, tanto en los humedales con flujo libre como con flujo subsuperficial (Rodríguez, 2003). El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal (Delgadillo *et al.*, 2010).

4.2.2 Remoción de Materia Orgánica

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Delgadillo *et al.*, 2010).

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad en los sistemas de humedales de flujo superficial y a la deposición y filtración en los humedales de flujo subsuperficial, donde cerca del 50% de la DBO aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible; el resto de la DBO se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema (Lara, 1999).

4.2.3 Remoción de Nitrógeno

El nitrógeno influente en los humedales se encuentra básicamente como nitrógeno orgánico o amoniacal, con escasas cantidades de nitratos (Lahora, 2002). La remoción del nitrógeno puede ser muy efectiva en ambos tipos de humedales artificiales y los principales mecanismos de eliminación son similares para los dos casos. Aunque ocurre la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminada por esta vía (Lara, 1999). El cosechado frecuente de la vegetación incrementa el

rendimiento en eliminación de nitrógeno, sin embargo esta operación aumenta los costos de mantenimiento (Lahora, 2002).

La mejor forma para remover nitrógeno en los humedales de flujo subsuperficial es la nitrificación biológica seguida por desnitrificación. La oportunidad de nitrificar existe cuando se tienen condiciones aeróbicas, se tiene la suficiente alcalinidad y la temperatura adecuada, y después de que la mayoría de la DBO ha sido removida, para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible (García y Leal, 2006). La reacción de la desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gas. Esta reacción sólo ocurre en condiciones de anóxia y en presencia de materia orgánica, ya que es realizada por bacterias heterotróficas (García y Corzo, 2008).

4.2.4 Remoción de Fósforo

El fósforo está normalmente presente en aguas residuales en forma de ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La oxidación biológica de cómo resultado que la mayoría del fósforo sea convertido a ortofosfatos. Los mecanismos de remoción de fósforo son principalmente adsorción, absorción por plantas, formación de complejos y precipitación. El mayor mecanismo de remoción (95%) está en la sedimentación y acumulación de fósforo en el suelo orgánico de los humedales, sin embargo los valores de acumulación alcanzados son inferiores a los ecosistemas terrestres. La adsorción y retención del fósforo en los ecosistemas terrestres es controlado por la interacción de potencial redox, pH, concentraciones de hierro, aluminio, minerales de calcio y la cantidad de fósforo presente en los suelos nativos.

Ciertas reacciones que ocurren para la remoción de fósforo son reversibles y puede presentarse una disolución de fósforo dependiendo de cambios de pH, la alcalinidad y el potencial redox. Si el fósforo absorbido no ha sido difundido hacia el interior de los absorbentes, su disolución puede ser más fácil, mientras que si el fósforo se ha difundido hacia el interior, su disolución será más difícil. Las plantas absorben fósforo a través de sus raíces y lo transportan a sus tejidos en crecimiento, sin embargo su capacidad de absorción es baja si se compara con el nitrógeno, pues el contenido de fósforo en los tejidos es mucho menor (Paredes y Kuschik, 2001)

4.2.5 Remoción de patógenos

En cuanto a los principales mecanismos que intervienen en la remoción de patógenos en los humedales construidos, en general se cree que la mayor parte de éstos tienen lugar en la zona denominada rizoplaneo (Elliott *et al.*, 1984), que es la región en donde hacen contacto la zona radicular de las plantas con el agua y con la superficie.

Los mecanismos más importantes para la remoción de microorganismos patógenos (Ottová *et al.*, 1997) en humedales construidos pueden agruparse en físicos (incluyendo filtración, sedimentación, adsorción y agregación), biológicos (especialmente depredación por protozoos y lisis bacteriana) y químicos (por deterioro oxidativo e influencia de toxinas provenientes de la actividad metabólica de otros microorganismos y de algunas plantas).

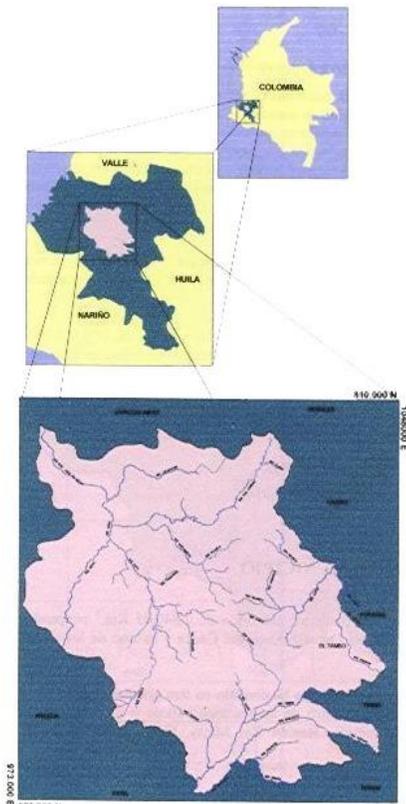
Aunque en los primeros trabajos realizados a inicios de la década de los 70, para determinar cuál era el principal mecanismo de remoción, se mencionaba el efecto bactericida de las plantas (Stottmeister *et al.*, 2003), la dificultad para explicarlos motivó a varios

investigadores a discutir otros mecanismos directos e indirectos asociados a las plantas para la remoción de microorganismos patógenos, como la filtración, la adsorción y la agregación, así como el efecto de los protozoos (Kadlec and Knight, 1996). El rol exacto de estos últimos en la remoción de microorganismos patógenos por los humedales construidos es todavía un tópico abierto de investigación. Depredación por protozoarios y bacteriófagos ha sido identificado como el principal mecanismo de remoción de organismos patógenos en humedales construidos; sin embargo, el papel de los bacteriófagos como competidor de los protozoarios es todavía desconocido (Wand *et al.*, 2007).

5. METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

La Corporación Maestra Vida es una Organización no gubernamental (ONG), sin ánimo de lucro, cuya sede se encuentra en las coordenadas $2^{\circ}27'22,1''N$, $76^{\circ}46'34,2''O$, ubicada a 6 kilómetros de la cabecera municipal de El Tambo, al sur occidente de Popayán, distante de la capital del departamento en 35 km., en la vereda Puente Alta, corregimiento de Piagua.



Zona de Estudio: Corporación Maestra Vida, Vereda Puente Alta, El Tambo – Cauca.

Figura 3. Municipio de El Tambo – Cauca. (Google Maps, s.f.)

5.2 Humedal horizontal de flujo subsuperficial

El humedal construido para la depuración de las aguas residuales de la corporación Maestra Vida, funciona como un tratamiento secundario, esta precedido por dos tanques sépticos (figura 4). En cuanto a dimensiones, el humedal tiene 5m de longitud, 3m de ancho y una profundidad de 1 metro, se cuenta además con una lámina de agua de 0,6m, la grava del sistema es de 2" y el nivel de esta es de 0,7 m. adicionalmente se cuenta con un humedal testigo de 0,5 metros tanto de largo, ancho y de profundidad, una lámina de agua de 0,3 metros, dicho humedal tan solo cuenta con la misma grava del humedal principal, y permitirá evaluar el efecto que hacen las plantas en la depuración de las aguas residuales de la Corporación Maestra Vida.



Figura 4. Sistema de tratamiento de aguas residuales de la Corporación Maestra Vida (fuente propia)

5.3 Siembra de las plantas

Las plantas antes de ser sembradas en el sistema de humedales fueron sometidas a un proceso de adaptación al agua residual, se retiraron de su medio (vivero), después se traspasaron a un medio de soporte el cual contenía una mezcla suelo/grava (S/G) en una proporción 50/50 (con el fin de aclimatar las plantas al medio de soporte en los humedales), posteriormente se inició el regado de 4 semanas con diferente disolución, de la siguiente manera: primeras 2 semanas disolución 75/25 agua potable/agua residual, las siguientes 2 semanas una disolución de 50/50, para finalmente, ser sembradas en el lecho de grava del humedal. Se sembraron 6 plantas/ m² (Bécares, 2004) de *H. psittacorum* en el humedal construido para el tratamiento del agua residual de la Corporación Maestra Vida.

5.4 Arranque del sistema

Para el inicio del sistema, fue necesario primero colocarlo en modo Batch, es decir cargar el sistema e impedir el flujo de entrada y de salida, para luego proceder con la siembra y estabilización de las plantas en el humedales, es por eso que el arranque del sistema se inició 2 semanas antes de la siembra de las plantas, para ello se llenó el humedal con una dilución equiproporcional de agua/agua residual, después de la siembra de las plantas se dejó circular el agua residual por el humedal, controlando entrada y salida de el mismo (Kadlec y Wallace, 2009). En el periodo de estudio se realizaron aforos de caudal de entrada, en el humedal testigo y a la salida del sistema en cada una de la toma de muestras.

5.5 Toma de muestras

Es importante considerar las variables típicas para la caracterización de aguas residuales, por lo tanto se tomaron parámetros de medición Demanda Bioquímica de Oxígeno, Solidos

Suspendidos Totales, Fósforo (P-PO₄⁻) y Nitrógeno (N-NO₃⁻) a la salida del testigo, antes y después del tratamiento a través de la configuración de siembra de macrófitas, además se midieron parámetros microbiológicos como la presencia de patógenos (coliformes totales y fecales) y variables complementarias como pH, temperatura para determinar su incidencia en la efectividad del tratamiento, dichas mediciones se realizaron aproximadamente cada 15 días durante un periodo de 5 meses. La evaluación de los parámetros del agua residual se realizó en el laboratorio certificado de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) en la ciudad de Popayán, y las variables complementarias se midieron mediante una sonda multiparamétrica. Los métodos para cada prueba se describen en la tabla a continuación:

Tabla 1. Técnicas de medición de variables estudiadas.

VARIABLE DE RESPUESTA	SITIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	CÓDIGO Standard Methods
DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO)	Laboratorio	Reflujo Cerrado	SM 5220 C
SST(SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES)	Laboratorio	Secado a 103-105°C.	SM 2540 D
N-NO₃⁻ (NITRATOS)	Laboratorio	Espectrofotometría	SM 4500-NO ₃ ⁻ B
P-PO₄³⁻ (FOSFATOS)	Laboratorio	Espectrofotometría	SM 4500-P
COLIFORMES TOTALES	Laboratorio	Filtración de membrana	SM 9222-B
COLIFORMES FECALES	Laboratorio	Filtración de membrana	SM 9222-D

5.6 Análisis de datos

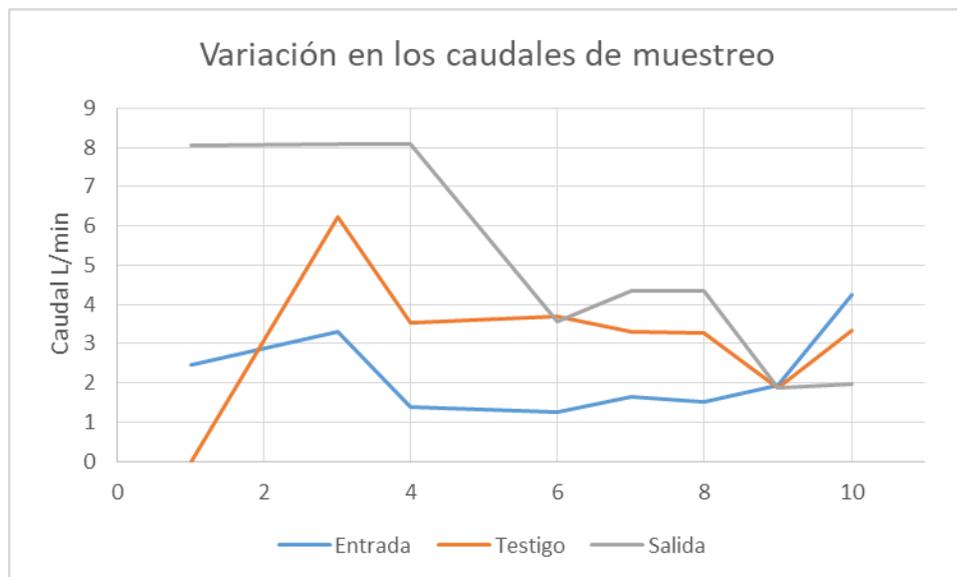
Los análisis estadísticos se realizaron mediante el software estadístico BIOSTAT, y el paquete de Office de Microsoft Excel, realizando un análisis descriptivo de los porcentajes

de remoción, además se estableció la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro Wilk. Debido a que los datos no se ajustaron a una distribución normal, aun después de realizar una transformación de los mismos, y sumado al bajo número de repeticiones no fue posible aplicar una prueba paramétrica para el análisis de los resultados, las cuales exigen una serie de condiciones para ser aplicadas, dichas condiciones se refieren al uso de variables cuantitativas continuas, distribución normal de las muestras, varianzas similares y tamaño de las muestras, mayor a 30 repeticiones (Berlanga y Rubio, 2012). Sin embargo fue posible aplicar una prueba no paramétrica análoga como lo es el test de Wilcoxon con el fin de comparar las medias y establecer si hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos estableciendo un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$).

6. RESULTADOS Y ANALISIS

Los diferentes muestreos a lo largo de los meses, permitieron evidenciar una marcada fluctuación de los caudales tanto a la entrada como a la salida, se pudo observar que el flujo de agua residual no era constante, y presentaba picos altos cuando eran utilizados lavamanos y lavaplatos, ya que el humedal está diseñado para tratar aguas grises, que provienen principalmente de la cocina del establecimiento. En promedio, en un momento de máximo uso de grifos, los caudales a la entrada, salida y salida del testigo fueron 2,217, 3,226 y 4,675 l/min respectivamente; en la gráfica 1, se puede evidenciar las variaciones en el tiempo de los diferentes caudales medidos.

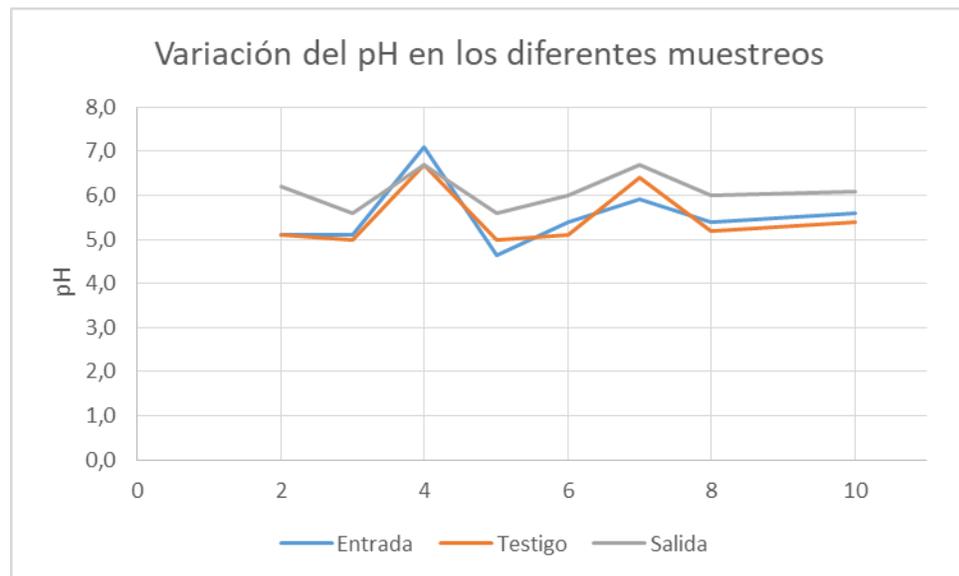
Grafica 1. Fluctuación de los caudales de muestreo a lo largo del tiempo.



Otra de las variables de ayuda medidas fue el pH, en este caso se obtuvo un pH promedio de 5,5, 5,5 y 6,1 en la entrada, salida del testigo y salida del humedal respectivamente, estos

valores bajos pueden estar asociados con la liberación de iones hidrogeno (H^+) durante la nitrificación, así como con la formación de mayores cantidades de ácido carbónico (H_2CO_3) en el agua residual, producto de la degradación de compuestos orgánicos por microorganismos aerobios, los cuales se ven favorecidos por la liberación de oxígeno por parte de la rizósfera (Gutiérrez y Peña, 2011). En la gráfica 2, se puede evidenciar las variaciones en el tiempo del pH en los puntos de medición.

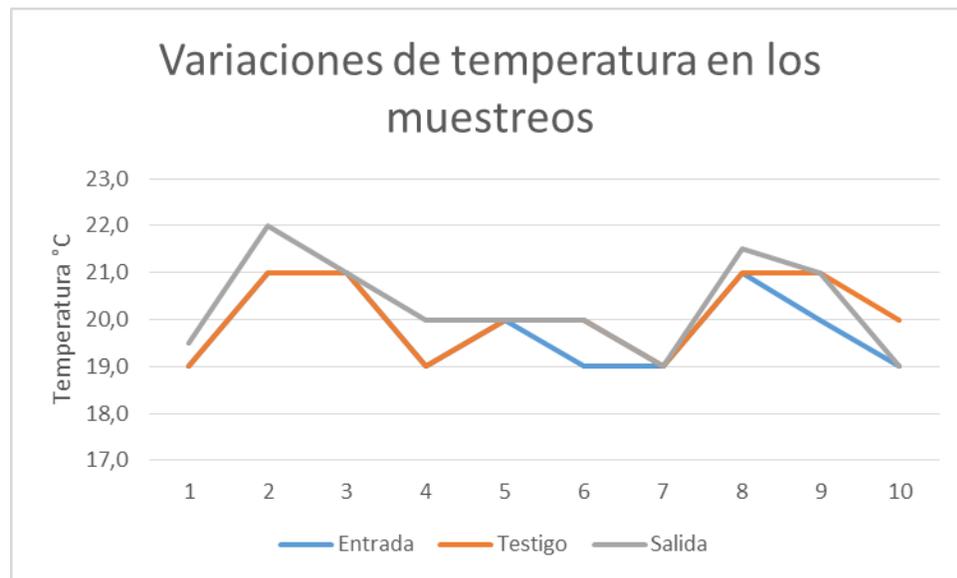
Grafica 2. Fluctuación del pH de muestreo a lo largo del tiempo.



En cuanto las mediciones de otra variable como lo es la temperatura, se pudo observar datos similares con muy poca variación a lo largo del tiempo (grafica 3), teniendo como valores promedio de temperatura $19,8^{\circ}C$ para la entrada al humedal, $20,1^{\circ}C$ para la salida del humedal testigo y $20,3^{\circ}C$ para la salida del humedal. Lo cual asegura un adecuado medio para el desarrollo de las reacciones implícitas en la remoción de contaminantes debido a que cuando la temperatura es menor a $5^{\circ}C$ la actividad microbiana se inhibe y si excede los $35^{\circ}C$

se dificulta la disponibilidad de la transferencia de oxígeno total disuelto (Gilón, 2014). Cabe resaltar que las temperaturas de tratamiento mencionadas anteriormente distan un poco de la temperatura óptima de crecimiento para las especies de heliconia, Gilón ~~en~~ (2014) menciona que la temperatura adecuada para su crecimiento es de 28°C con un rango entre 25 y 32°C.

Grafica 3. Fluctuación de la temperatura de muestreo a lo largo del tiempo.



El tratamiento de las aguas residuales haciendo uso de humedales construidos se basa en los principios de los sistemas naturales, debido a que están diseñados para emular las condiciones naturales de los humedales, como se mencionó anteriormente los componentes de un humedal son las plantas, el sustrato y la población microbiana. Las plantas pueden ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrientes, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas (Romero, *et al.*, 2009). En este sentido *H. psittacorum* juega un papel muy importante en la depuración del agua residual que trata

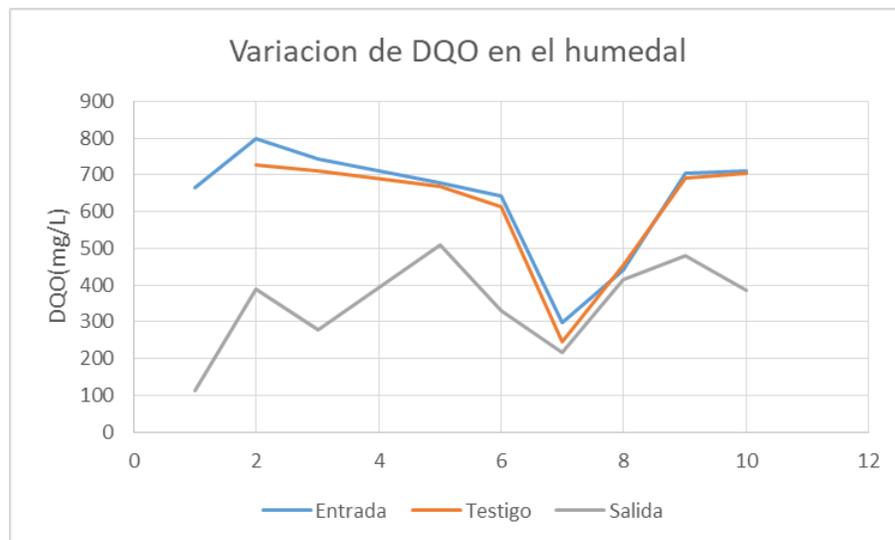
este humedal, dicha importancia será mencionada en el análisis de cada uno de las pruebas de remoción que se realizaron para este estudio. Sin embargo cabe mencionar que la adaptación de esta especie en el humedal no fue óptima debido a que a lo largo del periodo de muestreo se presentó un bajo crecimiento, se encontró un bajo número de individuos florecidos, muchos de ellos presentaban baja densidad foliar y muchas de las cuales se encontraba marchitas y secas, estas condiciones de estrés y poca adaptabilidad pudieron ser causantes de en algunos casos la baja eficiencia de remoción en parámetros como demanda química de oxígeno (DQO) y nitratos (NO_3^-) que como ya se abordará más adelante fueron los parámetros con las más bajas eficiencias.

6.1 Remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

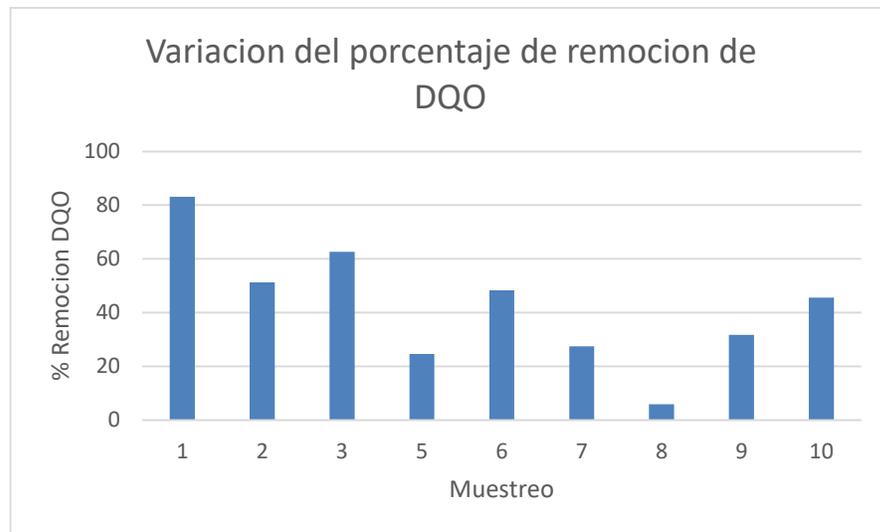
La mineralización o transformación de la materia orgánica se ve esencialmente afectada por los microorganismos, cuya presencia y actividad se realiza por las plantas y el medio de soporte o filtrante implementados en el humedal (Montoya *et al.*, 2010). De acuerdo con la gráfica 4 y 5, a lo largo del periodo de muestreo se encontró un valor de remoción promedio de 42,3%, además, el mayor valor de remoción de DQO se presentó en el primer muestreo (83,13%), caso contrario ocurrió en el penúltimo muestreo en donde se registró el valor más bajo de remoción de materia orgánica (5,9 %), lo que indica una disminución paulatina desde el primer muestreo hasta este punto, en donde nuevamente el sistema muestra una estabilización y en el último muestreo se obtiene un resultado cercano al valor promedio de remoción del sistema. Este comportamiento se puede explicar a que en climas cálidos, la remoción de materia orgánica es más eficiente durante los primeros días, en donde es muy

rápida es por ello que en este caso, la remoción fue de un aproximado del 84% en un tiempo de retención de dos días y medio, eliminando así la mayor cantidad de DQO. De igual manera en los días siguientes la remoción es limitada y se cree que está influida por la producción de DBO residual que se produce por la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal, esto hace que se produzca DBO dentro del sistema provenientes de fuentes naturales, por tanto por la relación directamente proporcional de la DBO con la DQO esta última también aumenta (Torres et. al, 2015).

Grafica 4. Fluctuación de los valores de DQO en los puntos de muestreo del humedal.



Grafica 5. Fluctuación de los porcentajes de remoción de materia orgánica a lo largo del tiempo



La degradación de materia orgánica esta debida a las comunidades de bacterias degradadoras de la materia orgánica que actúan como filtros de material particulado, estas comunidades o biomasa están presentes en todo el medio de soporte y raíces de las plantas, se pudo observar que *Heliconia psittacorum* tiene raíces muy débiles y poco densas, por tanto se puede decir que la mayor remoción de materia orgánica se da en la biopelícula creada en el medio de soporte (grava) sin dejar a un lado el aporte que hace la vegetación a este proceso (Kim y Geary, 2001). En la grava utilizada la comunidad microbiana da facilidad a este proceso; la grava puede incluso remover pequeños materiales, entre ellos bacterias patógenas presentes en aguas.

Estadísticamente se pudo evidenciar que los datos de las mediciones de remoción de DQO no se ajustan a una distribución normal, al aplicar la prueba de Shapiro Wilk, el resultado estadístico que esta arroja (nivel p) son menores que el valor $\alpha=0,05$ aceptado como nivel de

significancia de la prueba, esto se puede evidenciar en la anexo 1; además como se mencionó anteriormente al no tener un alto número de repeticiones, y apoyados en que los datos no se ajustan a una distribución normal, se procedió a emplear una prueba no paramétrica que permitiera establecer si hay diferencias significativas en la remoción de DQO, la prueba utilizada fue Wilcoxon, que es una prueba que analiza un serie de datos emparejados, de esta manera se analizó conjuntamente los datos de entrada-salida y testigo-salida, suponiendo las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula H_0 : no hay diferencias en los valores de DQO (materia orgánica) antes y después del tratamiento del humedal.

Hipótesis alternativa H_a : hay diferencias en los valores de DQO (materia orgánica) antes y después del tratamiento del humedal.

El resultado de esta prueba se presenta en la figura mostrada a continuación, en donde se rechaza la hipótesis nula debido a que p-valor arrojado por la prueba fue menor que el valor alfa de 0,05, con lo que se concluye que hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores medidos a la entrada y a la salida del humedal (p-valor=0,0077) así mismo, los medidos entre la salida del testigo y la salida del humedal (p-valor= 0,0173).

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	9	<i>T</i>	0	<i>Z</i>	2,6656
<i>nivel p</i>	0,0077				

a

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	8	<i>T</i>	1	<i>Z</i>	2,3805
<i>nivel p</i>	0,0173				

b

Figura 5. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de DQO a. Análisis Entrada—Salida. b. Análisis Testigo-Salida (fuente: Biostat)

Del mismo modo se observa que existe una diferencia entre el porcentaje de remoción del humedal plantado y el no plantado (testigo), a pesar de esto las plantas no ejercen efecto que mejore la eficiencia del proceso, puesto que el proceso de mineralización de materia orgánica está siendo realizado por la biomasa adherida al material de relleno presente en el humedal (Suárez et. al, 2014). Probablemente una explicación para ello radica en la diferencia de las áreas superficiales, ya que el humedal no plantado (testigo) no fue diseñado con la misma área que el humedal plantado por ello se ve una diferencia significativa en la remoción de materia orgánica entre la salida del humedal plantado y la salida del testigo, y una semejanza en los valores de DQO a la entrada del humedal y a la salida del testigo. Siguiendo las mismas hipótesis planteadas anteriormente y realizando la prueba de Wilcoxon se pudo observar que estadísticamente no hay diferencias entre los valores de DQO a la entrada, como a la salida del humedal testigo, tal como se muestra en la figura 6.

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	8	<i>T</i>	16	<i>Z</i>	0,2801
nivel <i>p</i>	0,7794				

Figura 6. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de DQO a la entrada del humedal y la salida del testigo (fuente: Biostat)

6.2 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

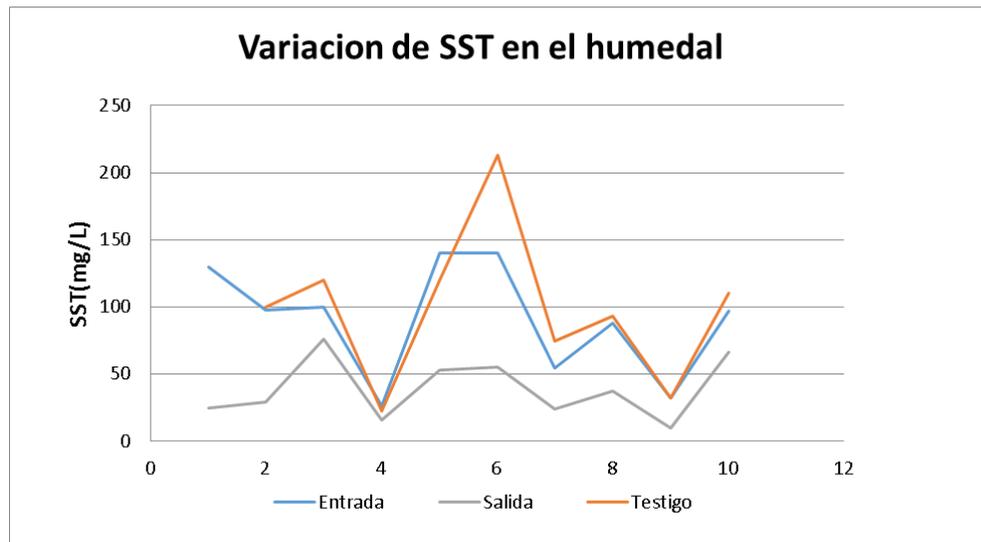
La remoción de sólidos suspendidos es realizada en su mayoría por el material de soporte y la baja velocidad de flujo, además de la posible descomposición debida a los microorganismos que se encuentran adheridos al lecho empleado (Suárez et. al, 2014).

Los sólidos suspendidos en gran parte son removidos por sedimentación y filtración, estos procesos son puramente físicos y también contribuyen a la eliminación de otros contaminantes presentes en las aguas residuales. (Lara, 2009) Sustenta que la grava tiene la habilidad de mejorar la calidad del efluente mediante la fijación de sólidos suspendidos y la formación de biopelículas bacterianas. La vegetación también tiene un papel importante en la remoción de SST, debido a que esta distribuye y disminuye la velocidad de las corrientes en los humedales, favoreciendo la retención de sólidos por filtración.

Lo anteriormente dicho se puede corroborar en la gráfica 6, la cual muestra los niveles de sólidos suspendidos presentes a la entrada, salida del humedal y salida del testigo, donde se evidencia niveles bajos de concentración a la salida, lo que indica que la *Heliconia psittacorum* junto con el medio de soporte y la acción microbiana actuaron de manera adecuada en el tratamiento de agua residual con un porcentaje de remoción promedio de 55%, observando además los valores más altos de remoción en los primeros muestreos, y una

disminución en la remoción en el tercer y último muestreo en donde además se tiene mayor presencia de sólidos a la salida del humedal (grafica 7), una de las causas a la que se puede asociar está relacionada con la adición de material vegetal, ya que el humedal se encuentra en medio de una zona de bosque (figura 7) y no cuenta con una malla o algún mecanismo que evite la adición de hojarasca y demás sólidos que caen de la vegetación cercana.

Grafica 6. Fluctuación de los valores de SST en los puntos de muestreo del humedal.



Grafica 7. Fluctuación de los porcentajes de remoción de sólidos a lo largo del tiempo.

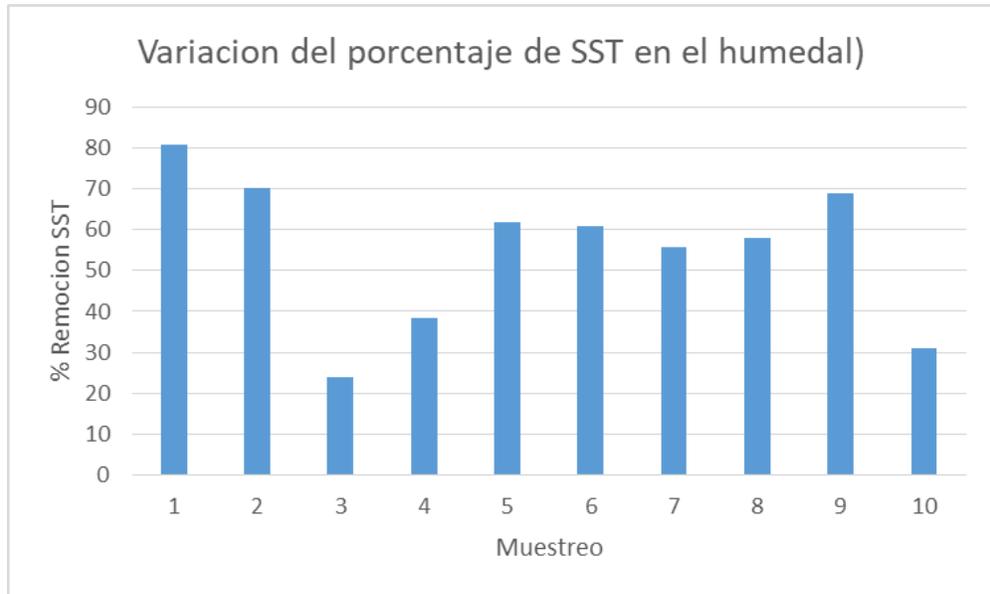


Figura 7. Ubicación del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Corporación Maestra Vida (fuente propia).

En cuanto al análisis estadístico de la remoción de sólidos suspendidos totales al igual que en el caso anterior con DQO se aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para analizar los datos a la entrada y a la salida del humedal, a pesar de que los datos se ajustaron a una distribución normal, no se cuenta con un número grande de repeticiones, ni tampoco con homogeneidad en las varianzas para poder aplicar una prueba paramétrica. Teniendo en cuenta las siguientes hipótesis, la prueba arrojó como resultado que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de entrada y de salida del humedal debido a que el p-valor (0,0051) es menor que el nivel de significancia aceptado para la prueba (0,05), constatando así que se está produciendo una remoción de sólidos por parte del humedal.

Hipótesis nula H_0 : no hay diferencias en los valores de SST (materia orgánica) antes y después del tratamiento del humedal.

Hipótesis alternativa H_a : hay diferencias en los valores de SST (materia orgánica) antes y después del tratamiento del humedal.

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	10	<i>T</i>	0	<i>Z</i>	2,8031
<i>nivel p</i>	0,0051				

Figura 8. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de SST a la entrada y a la salida del humedal (fuente: Biostat)

6.3 Remoción de Nitrógeno (Nitratos)

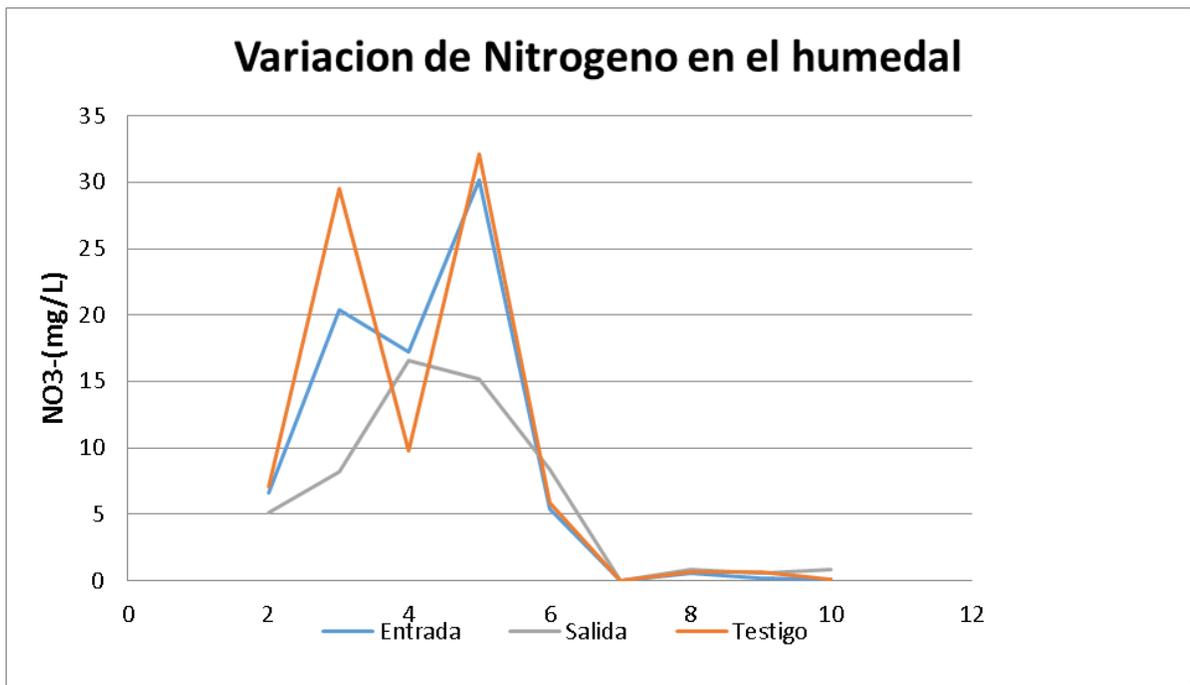
La concentración de Nitrógeno, tendió a disminuir con el paso del tiempo, al igual que lo hizo la concentración de sólidos en el efluente, la eliminación del nitrógeno que se produce

en el humedal, se puede atribuir al crecimiento celular bacteriano, como también al fenómeno de nitrificación/desnitrificación (Rodríguez, *et al.*, 2013); El proceso de nitrificación ocurre en la rizósfera aerobia, donde el N amoniacal es oxidado a nitrato, el cual a su vez puede ser asimilado directamente por la planta o difundido en las zonas reductoras para ser convertido a N_2O y N_2 vía desnitrificación heterótrofa. De este modo, el desarrollo de este proceso ha permitido que los humedales plantados superen a los humedales sin plantar en la eliminación de N (Gutiérrez y Peña, 2011) tal y como se puede observar en la gráfica 8, en donde se obtienen una mayor remoción en el humedal plantado en comparación al humedal testigo. En promedio se obtuvo un porcentaje de remoción de 34% evidenciando valores cercanos a la nulidad en los últimos muestreos (gráfica 8). Se pudo evidenciar además que la concentración de NO_3^- no supera los 35 mg/L por lo que se sugiere que esta especie no es la predominante en el humedal, como tampoco lo son los nitritos NO_2^- ya que en el primer muestreo se evaluó esta especie en particular obteniendo una concentración de 0,77 mg/L a la entrada y de 0,12mg/L a la salida. El nitrógeno amoniacal es quizá la especie que predomine en este tipo de sistemas de tratamiento debido a que las macrófitas asimilan esta fuente de nitrógeno para el mantenimiento de sus células y tejidos (Gilón, 2014).

Además, la disminución del nitrógeno en el humedal plantado se debe a la comunidad bacteriana adherida al medio de soporte (grava) la cual por las condiciones en que se encuentra se espera que remueva dicho elemento por procesos de nitrificación/desnitrificación, hecho que ocurre también en el humedal no plantado (testigo). La remoción adicional se debe a la *Heliconia psittacorum* presentes en el humedal sembrado, las cuales toman el nitrógeno amoniacal para sus procesos metabólicos. Situación que se

aprecia con mayor claridad después del día 65 de operación del humedal, durante los días previos este hecho no es tan marcado debido a la adaptación de las plantas al medio en el cual fueron expuestas.

Grafica 8. Fluctuación de los valores de NO_3^- en los puntos de muestreo del humedal.



Estadísticamente se procede como en los casos anteriores a utilizar la prueba de Wilcoxon para realizar el análisis entre los datos de nitratos tanto a la entrada como a la salida, con lo cual se obtuvo que no existen diferencias estadísticamente significativas de remoción en el humedal, lo que puede evidenciar también el bajo porcentaje de remoción obtenido a lo largo de los muestreos, en este sentido se acepta la hipótesis nula debido a que el p-value (0,4838)

es mayor que el nivel de significancia aceptado para la prueba (0,05), tal como se muestra en la figura 9.

Hipótesis nula H_0 : no hay diferencias en los valores de Nitratos antes y después del tratamiento del humedal.

Hipótesis alternativa H_a : hay diferencias en los valores de Nitratos antes y después del tratamiento del humedal.

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	8	<i>T</i>	13	<i>Z</i>	0,7001
<i>nivel p</i>	0,4838				

Figura 9. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de NO_3^- a la entrada y a la salida del humedal (fuente: Biostat)

6.4 Remoción de Fósforo

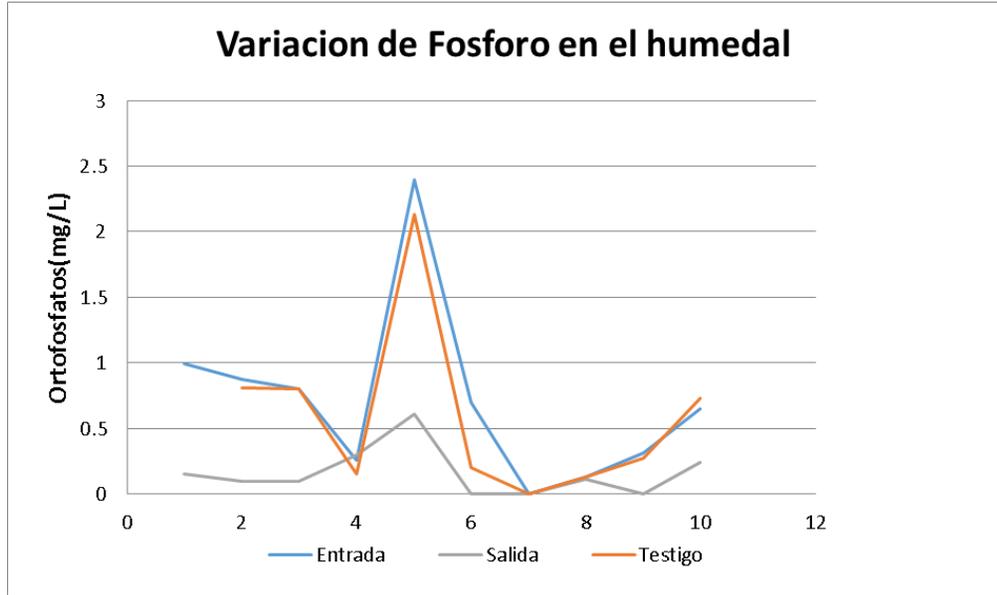
La eliminación de fósforo depende principalmente de las plantas, el lecho utilizado y los microorganismos. Las plantas pueden absorber el fósforo principalmente en el proceso de fotosíntesis, los microorganismos consumen este contaminante y en el lecho por fijación en el sustrato. García, Morato y Bayona (2008) Exponen que al inicio de la puesta en marcha de los humedales se obtiene una buena eficiencia de eliminación de fósforo, sin embargo, trascurrido el tiempo de operación, se manifiesta una disminución en la remoción. Esto es debido a que lecho o medio de soporte pierde capacidad de adsorción con el tiempo.

La remoción de fósforo estaría más asociada a los procesos físicos de adsorción o sedimentación que a los procesos biológicos propiamente, debido al contacto directo con el

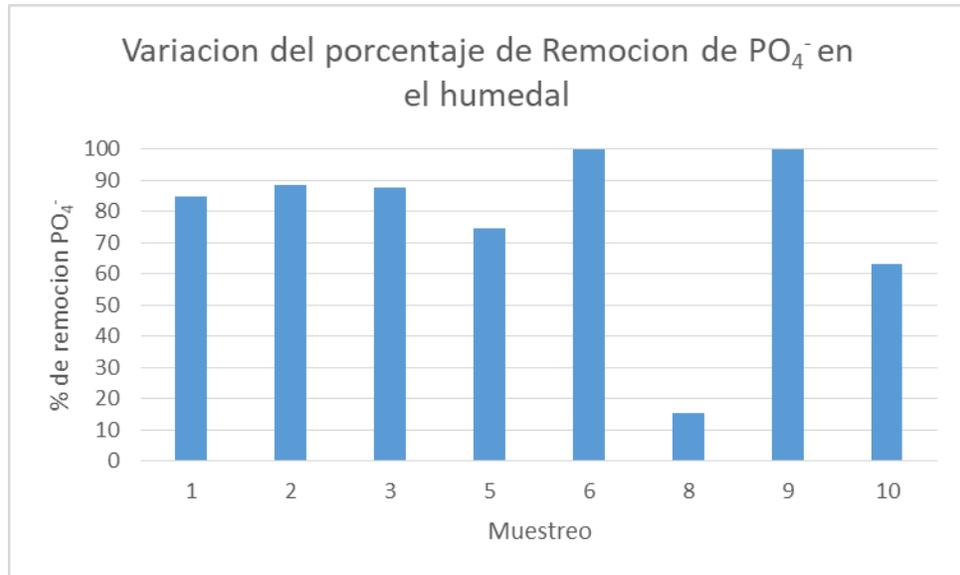
material de soporte que facilita la adsorción del fósforo a elementos como hierro, calcio, aluminio y a la materia orgánica presente en el mismo. También hay que resaltar que cuando se tiene una planta muy joven (y única), en este caso la *Heliconia psittacorum* la mayor parte del fósforo, entre el 80 y el 90%, se elimina por mecanismos ajenos a la planta (Nunez, *et al.*, 2011).

De acuerdo con lo dicho anteriormente se observa la Grafica 9, la cual muestra los niveles de fósforo presentes a la entrada, salida del humedal y salida del testigo, donde claramente se ve la disminución en la concentración de fósforo a la salida del humedal con un porcentaje de remoción promedio de 76,7%, otro factor influyente en la remoción de fósforo en humedales construidos es el pH del agua al que se somete el sistema, en este caso el pH se mantuvo entre 5-6 unidades, es decir un pH ligeramente ácido, del cual se puede decir que ayuda en cierto grado a la precipitación del fósforo en el humedal. La grafica 10 muestra además las variaciones en las eficiencias de remoción del sistema, mostrando valores elevados durante todo el tiempo de muestreo, y logrando también una remoción total de los fosfatos en dos puntos, lo que indica lo útil que es el humedal para depurar este tipo de compuestos del agua residual, ya que fue uno de los porcentajes de remoción más altos obtenidos en el estudio.

Grafica 9. Fluctuación de los valores de Fósforo en los puntos de muestreo del humedal.



Grafica 10. Fluctuación de los porcentajes de remoción de fosfatos a lo largo del tiempo.



El análisis estadístico de eliminación de estos compuestos se hizo utilizando nuevamente la prueba de Wilcoxon (figura 10), en donde al hacer uso de las hipótesis planteadas anteriormente se concluye que se acepta la hipótesis alternativa que evidencia diferencias estadísticamente significativas en los valores de fosfatos tanto a la entrada como a la salida del humedal, esto se concluye debido a que el p-valve arrojado por la prueba (p-valve =0,0152) es menor que el nivel de significancia aceptado para la misma.

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	9	<i>T</i>	2	<i>Z</i>	2,4286
<i>nivel p</i>	0,0152				

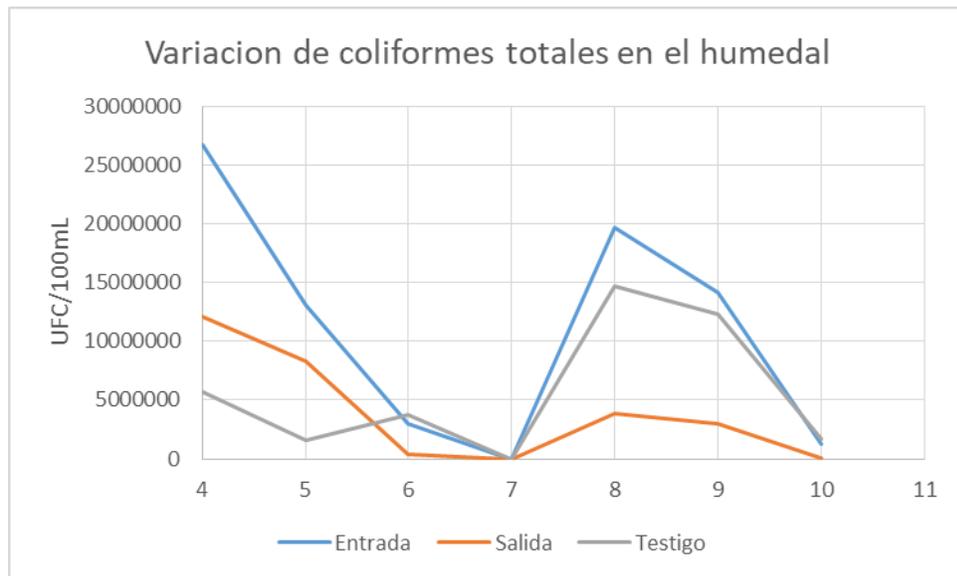
Figura 10. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de PO_4^- a la entrada y a la salida del humedal (fuente: Biostat)

6.5 Remoción de Patógenos

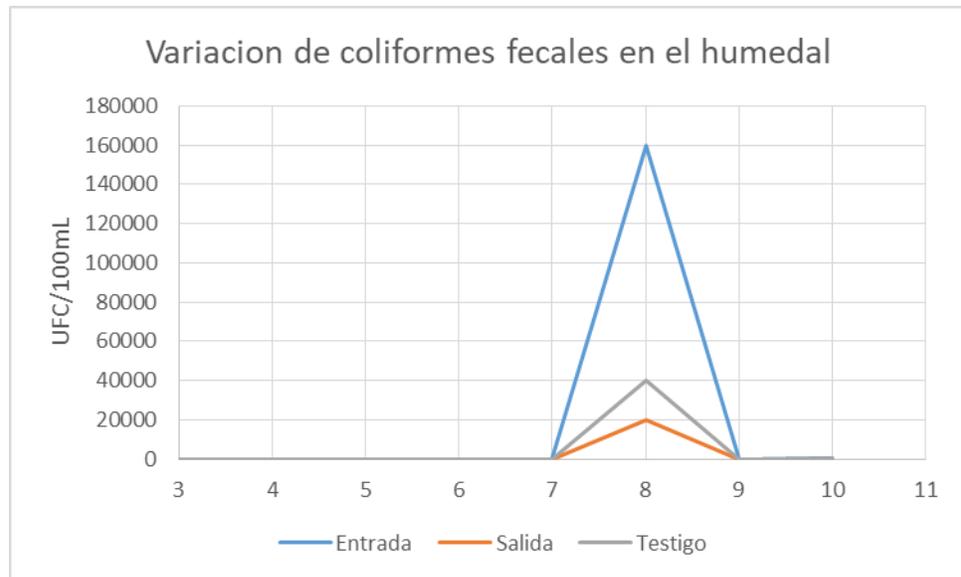
La remoción de coliformes totales y coliformes fecales realizada por todo el sistema calculada entre la entrada y la salida del biosistema fue de 73,4% y 93,75% respectivamente, para el caso de coliformes fecales se obtuvieron muchos resultados nulos, es decir, sin presencia a la entrada y/o salida de estos ni a la entrada ni a la salida del humedal, esto debido a que el humedal funciona como sistema de depuración de aguas grises. En este tipo de sistemas, las bacterias patógenas y los virus son removidos, fundamentalmente, por mecanismos de adsorción, sedimentación, filtración y prelación, además las condiciones ambientales no son favorables para los patógenos lo que trae como consecuencia su muerte (Arango, 2007). Estos valores indican que existen bacterias asociadas al sustrato, establecidos como biopelícula sobre el mismo y asociados también a las raíces de las plantas

(Romero, *et al.*, 2009). En las gráficas 11 y 12 mostradas a continuación se observa la variación de coliformes totales y fecales respectivamente en los diferentes puntos donde se hizo mediciones, evidenciando también la baja presencia de coliformes fecales las cuales en la mayoría de muestreos se obtuvo 0 UFC/100 mL, y en los dos únicos muestreos en donde se reportó presencia de estas los valores medidos fueron muy bajos, lo que supone la adición de este tipo de patógenos por fuentes externas al humedal y no por el tratamiento de las aguas residuales.

Grafica 11. Fluctuación de los valores de Coliformes Totales en los puntos de muestreo del humedal.



Grafica 12. Fluctuación de los valores de Coliformes Fecales en los puntos de muestreo del humedal.



Finalmente el análisis estadístico de la remoción de patógenos mediante la prueba de Wilcoxon, arrojó que para el caso de la remoción de coliformes totales, se rechaza la hipótesis nula estableciendo así que existe diferencias estadísticamente significativas entre las coliformes totales a la entrada y a salida del humedal (Figura 11), esto evidencia que se está efectuando una remoción por parte del humedal; se llega a esta conclusión debido a que el p-value (0,0277) arrojado por la prueba es menor al nivel de significancia aceptado para la misma. Para el caso de coliformes fecales debido a que en la mayoría de muestreos los resultados obtenidos fueron de 0 UFC/100mL, se evidenciaría que no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores medidos tanto a la entrada como a la salida del

humedal, mostrando que a nivel estadístico no hubo una remoción significativa de patógenos, lo que evidentemente no es el caso, ya que como se mencionó anteriormente el sistema no está diseñado para eliminar este tipo de contaminantes, sin embargo en las ocasiones que lo hizo, se obtuvieron elevadas eficiencias de remoción.

Test de Muestras Relacionadas de Wilcoxon					
<i>N</i>	6	<i>T</i>	0	<i>Z</i>	2,2014
<i>nivel p</i>	0,0277				

Figura 11. Resultado prueba de Wilcoxon para las muestras de Coliformes fecales a la entrada y a la salida del humedal (fuente: Biostat)

CONCLUSIONES

- La eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DQO fue de 42,3% para el humedal plantado con *Heliconia psittacorum*. Este tipo de sistemas son muy efectivos para remover materia orgánica cuando se encuentran estabilizados y podrían ser implementados para el tratamiento de agua residual doméstica debido a que alcanzan los requerimientos exigidos por la normatividad Colombiana vigente según lo consultado en la literatura, en nuestro caso la evaluación del humedal se hizo cuando este apenas fue puesto en funcionamiento, lo que explicaría el bajo porcentaje de remoción, que no cumpliría con la Resolución 631 de 2015 y resaltaría la importancia del periodo de maduración o estabilización del sistema.
- En cuanto a remoción de materia orgánica en la eliminación de SST se obtuvo la mejor eficiencia de remoción (55%), lo que muestra que a pesar de tener aportes externos de sólidos, la vegetación, el medio de soporte y los microorganismos responden de manera apropiada para la depuración de estos en el humedal.
- La depuración de las especies nitrogenadas, específicamente de nitratos, fue una de las variables con el porcentaje de remoción más bajo (34%) para este estudio, lo que supone que como mecanismos para eliminación de nitrógeno en este humedal predomina la acumulación en el medio filtrante (asimilación microbial) y la nitrificación-desnitrificación por encima de la asimilación estos compuestos por parte de *H. psittacorum*.

- Al ser un humedal recién implementado y puesto en marcha, se observó el mayor porcentaje de remoción en todo el estudio, el fósforo con una remoción del 76,7% fue el parámetro que mayor eficiencia obtuvo en el sistema, esto fue debido al contacto directo con el material de soporte que facilita la adsorción del fósforo y al ser un humedal joven la adsorción es mucho mayor en el corto plazo que al mediano o largo plazo de estar en funcionamiento el sistema.
- Durante todo el periodo de evaluación del humedal se pudo evidenciar que la *Heliconia psittacorum* no se logró adaptar de manera adecuada, esto se fundamenta en que el crecimiento y desarrollo de la planta no fue el mejor, en algunas ocasiones se encontraban algunas secas y marchitas, por lo que tenían que ser remplazadas, además el corto periodo de funcionamiento como tal del humedal afecta el desarrollo y crecimiento de la planta, es decir entre más antiguo sea el sistema, más estabilizado se encontrará y mejor eficiencia se esperaría.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar estudios con un mayor tiempo de evaluación, con el fin de establecer un patrón en las eficiencias de remoción así mismo como la obtención de un número mayor de réplicas para generar mayor representatividad de los datos.
- Se recomienda implementar una malla como mecanismo de control de la adición de materia orgánica que genera la caída de hojarasca y material vegetal de los arboles aledaños al humedal.
- Se recomienda implementar un sistema que permita una alimentación continua de agua residual al sistema, debido a que la intermitencia con la que actualmente funciona el humedal puede ser una causa de un mal funcionamiento en la depuración del humedal, lo que se traduce en bajas eficiencias de remoción que presenta el humedal en alguno de los parámetros estudiados.
- Se deben realizar muestreos posteriores para evaluar la adaptación de la vegetación a las condiciones del medio, y en caso de no evidenciar un aumento en la eliminación de los contaminantes del agua residual se sugiere cambiar por otra especie que tenga un mejor funcionamiento en condiciones adversas.

REFERENCIAS

- Arango, M. 2007. Biosistema integral de tratamiento de aguas residuales domésticas. Diseño, construcción y evaluación. Universidad de Manizales, Manizales.
- Bécares, E. (2004). Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial. En García, J., Morató, J y Bayona, J., Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de humedales Construidos. Catalunya, Barcelona: M Editores.
- Bedoya, J.; Ardila, A.; Reyes, J. 2014. Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria colegio mayor de Antioquia, Colombia. Revista Internacional de Contaminación Ambiental Vol. 30 (3), pág. 275-283.
- Berlanga Silvestre, V., y Rubio Hurtado, M. J. (2012). < Artículo metodológico > Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas. Revista d'Innovació i Recerca En Educació, 5, 101–113. <https://doi.org/10.1344/reire2012.5.2528>
- Cruz, M., Magno, J., Pineda, R., Torres, J. 2015. Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*, en Carapongo-Lurigancho. Universidad peruana, Unión-Lima.
- Dávila, T. 2013. Análisis comparativo de la frecuencia respiratoria de *Phragmites australis* y *Hedychium coronarium* en presencia del clorotalonilo. Universidad del Cauca. Popayán.
- Davis, L. 1994. A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetland for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage storm water in the Mid-Atlantic Region. Vol 1 General Considerations. 53 pp.
On line: <http://www.USEPA.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf>.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia.
- Escutia, Y.; Lindig, R. 2012. Dinámica de *Phragmites australis* y *Schoenoplectus americanus* en respuesta a la adición de fósforo y nitrógeno en humedales experimentales. Bot. Sci, Vol.90(4), pág. 459-467.
- Elliott, L. F., C. M. Gilmour, J. M. Lynch and D. Tittmore (1984). Bacterial colonization of plant roots. Microbial– plant interactions. R. L. Todd and J. E. Giddens: 1-16.
- Frers, C. 2008. Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.

García D., Leal D. 2006. Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del parque nacional natural amacayacu – amazonas. Trabajo de grado. Universidad de la Salle facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá D.C.

García, J., Morato, J., y Bayona, J. (2008). Depuración con sistemas naturales: Humedales construidos. Universidad Politécnica de Cataluña, Ingeniería sanitaria y ambiental, Barcelona, España.

García j. Y Corzo a. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 99 pp.

Garzón, M.; Buelna, G. 2014. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. Rev. Int. Contam. Ambie. Vol 30(1). pág.; 65-79.

Gilón, L. 2014. Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical, sembrados con *Heliconia* (sp), para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Guevara, A.; Guanoluisa, L.; de la Torre, E. 2014. Diseño de Sistemas de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario El Inga mediante Electrocoagulación y Fitorremediación. REVISTA EPN, Vol. 34(1).

Gutiérrez-Mosquera, Harry; Peña-Varón, Miguel Ricardo. 2011. Eliminación de nitrógeno en un humedal construido subsuperficial, plantado con *Heliconia psittacorum* Tecnología y Ciencias del Agua, vol. II, núm. 3, julio-septiembre, pp. 49-60 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Morelos, México.

Hernández, F., Molinos, M., Sala, R. 2012. Estado actual y evolución del saneamiento y la depuración de aguas residuales en el contexto nacional e internacional. Anales de geografía. Vol 32(1).

Herrera, S., Rodríguez, L. 2011. Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial con Phragmites para el tratamiento de aguas residuales de la empresa colombo italiana de curtidos LTDA. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.

Kadlec, R. H. and R. L. Knight (1996). Treatment wetlands. Boca Raton, FI, USA., Lewis-CRC publishers

Kim, S. Y. and Geary, P. M. (2001). The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants". Water Science and Technology, vol. 44, No. 11-12, pp. 61-67.

Konnerup, D.; Koottatep, T.; Brix, H. 2008. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological Engineering* Vol 35(2), pág. 248-257.

Konnerup D. NTD Trang, H. Brix. (2011). Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics. *Aquaculture*, 313, pp. 57-64

Kuschik, P; Paredes, D. 2001. Tipo de humedales y mecanismos de remoción. En: Memorias Seminario Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales. Septiembre 3 - 8 de 2001 Armenia - Manizales – Pereira.

Lahora A. (2001). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). *Gestión de aguas del levante almeriense*.

Lahora a. Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la edar de los gallardos (almería). 2002.

Lara, J. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Universidad politécnica de Cataluña. 122 p. Disponible en: www.geocities.com/ialarab.

Lara, J. (2009). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. Disponible en: <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/5-rendimientos-esperados>

Lizarazo, J.; Orjuela, M. 2013. Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Londoño, L., Marín, C. 2009. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Universidad tecnológica de Pereira, Pereira.

M.A. Shannon, P.W. Bohn, M. Elimelech, J.G. Georgiadis, B.J. Marinas, A.M. Mayes. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452 (2008), pp. 301-310

Martelo, J. y Lara, B. 2012. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 8(15), pág. 221-243.

MAVDT (2002). CONPES 3177. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política pública. Bogotá, D.C. 27 pp.

MAVDT (2004). PMAR. Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales Municipales en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política pública. Bogotá, D.C. 19 pp.

MAVDT (2004). PMAR. Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales Municipales en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política pública. Bogotá, D.C. 19 pp.

MAVDT (2010a). Decreto 3930. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política pública. Bogotá, D.C. 34 pp.

MAVDT (2010b). PNGIRH. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política pública. Bogotá, D.C. 124 pp.

Montoya, J.; Casas, J.; Ceballos, L.; Morató, J. 2010. Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. Revista EIA, número 14. Escuela de ingeniería de Antioquia. Medellín (Colombia).

Mosquera, H.; Peña, M.; Aponte, A. 2010. Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N°.56, pág. 87-98.

Núñez, Marisel, Cárdenas de Flores, Carmen, Ramírez, Yoleivis, Rincón, Sandra, Saules, Luisa, y Morales Avendaño, Ever. (2011). Remoción de nitrógeno y fósforo a través de las plantas *Typha dominguensis* y *Lemna sp.* en humedales construidos a escala laboratorio. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 34(3), 246-254.

N.D.T. Cao, T.T. Nguyen, X.T. Bui, T.D.H. Vo, C.H.S. Truong, N.T. Son, T.S. Dao, A.D. Pham, T.L.C. Nguyen, L.H. Nguyen, C. Visvanathan. Low-cost spiral membrane for improving effluent quality of septictank. *Desalin. Water Treat.* 57 (27) (2016), pp. 12409-12414

Ojeda E.O. y Arias R. (2000). Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia [en línea]. <http://www.unesco.org>. 03/02/2018

Ottová, V., J. Balcarová and J. Vymazal (1997). "Microbial characteristics of constructed wetlands." *Water Science and Technology* 35(5): 117-123.

Paredes, L. 2014. Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical sembrados con *heliconia (sp)*, para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad tecnológica de Pereira, Pereira.

Paredes D, Kusch P. (2001). Tipo de humedales y mecanismos de remoción. Seminario humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Armenia, Manizales, Pereira, Septiembre 3-8 del 2001. p: 10-12.

Peña, E.; Madera, C.; Sánchez, J.; Medina, J. 2013. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc, Vol. 37(145), pág. 469-481.

Peña m., Van Ginneken m., Madera c. Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales. En: ingeniería y competitividad. Octubre, 2003. Vol. 5, no. 1, p. 27-35

PNUMA (2001). Las aguas residuales municipales como fuentes terrestres de contaminación de la zona marino costera en la región de América Latina y el Caribe. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Política Exterior. México, D.F. 33 pp.

Prystay, W. (1998). Assessment of constructed wetlands for the reduction of nitrogen and phosphorus. Brasil: Proceedings 6th International Conference on Wetland Systems for Water pollution Control.

Qadir M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P., Drechsel, P., Bahri, A., Minhas, P. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. Agric. Water Manage, 97 (4) (2010), pp. 561-568

Ramalho, R.; Jiménez, D.; Lora, F. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverté, pág 705.

Rodríguez Pérez de Agreda (2003). Cecilia. Humedales construidos. Estado del arte (i y ii). En: ingeniería hidráulica y ambiental. 2003, vol. 24, no. 3, p. 35-48.

Rodríguez, M.; Molina, J.; Jácome, A.; Suarez, J. 2013. Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 14 (2), pág. 223-235.

Rodríguez-Monroy J. y Durán de Bazúa C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tecnol. Ciencia Ed. 21, 25-33.

Romero, M.; Colín, A.; Sánchez, E.; Ortiz, L. 2009. Humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol 25(3), pág. 157-167.

Salazar A, Morales P. (2003). Adaptación y evaluación de plantas típicas de la zona cafetera como tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Tesis Universidad Tecnológica de Pereira. 127 p.

Stottmeister, U., A. Wießner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kastner, O. Bederski, M. R.A. and H. Moormann (2003). "Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment." Biotechnology Advances 22(1-2): 93-117.

- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., y Millán, N. (2014,). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis*, 4(1), 8-14.
- Tejada, A., López Z., Rojas Daniel., Reyna M., Barrera A., Zurita F. 2015. Eficiencia de tres humedales híbridos para la remoción de Carbamazepina. *Tecnología y ciencias del agua Volumen VI número 6*. pp19-31.
- Tejada, A., Ángeles, X., Torres, B., Zurita, F., 2017. Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering* 98, 410–417
- Torres, J. D., Magno, J. S., Pineda, R. R., y Cruz, M. A. (2015). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante Humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis* , en Carapongo- Lurigancho. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 1, 41–64. <https://doi.org/2313-7991>
- Villegas, M.; Vidal, E. 2009. Gestión de los procesos de descontaminación de aguas residuales domésticas de tipo rural en Colombia. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Wand, H., G. Vacca, P. Kusch, M. Krüger and M. Kästner (2007). "Removal of bacteria by filtration in planted and non-planted sand columns. " *Water Research* 41: 159 - 167.
- Wolverton, B., Barlow, R., y McDonald, R. (1976). Application of vascular aquatic plants for pollution removal, energy, and food production in a biological system. In *Biological control of water pollution*. Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados prueba de normalidad Shapiro-Wilk para la variable DQO

Pruebas de Normalidad				
1				
2				
3	Serie #1 (DQO Entrada)			
4	Tamaño muestral	9	Media	631
5	Desviación Típica	159,1658	Mediana	677
6	Sesgamiento	-1,1971	Kurtosis	3,204
7	Sesgamiento Alterno (de Fisher)	-1,4511	Kurtosis Alterno (de Fisher)	1,5314
8				
9		Estadísticas de la Prueba	nivel p	Conclusión: (5%)
10	Test de Kolmogorov-Smirnov/Lilliefor	0,1917		Evidencia nula en contra de la normalidad
11	W de Shapiro-Wilk	0,8328	0,048	Rechazar la Normalidad
12	D'Agostino Sesgamiento	2,0058	0,0449	Rechazar la Normalidad
13	D'Agostino Kurtosis	1,1446	0,2524	Aceptar la Normalidad
14	D'Agostino Omnibus	5,3325	0,0695	Aceptar la Normalidad
15				
16	Serie #2 (DQO Salida)			
17	Tamaño muestral	9	Media	346,5558
18	Desviación Típica	127,3726	Mediana	388
19	Sesgamiento	-0,5283	Kurtosis	2,3505
20	Sesgamiento Alterno (de Fisher)	-0,8404	Kurtosis Alterno (de Fisher)	-0,0943
21				
22		Estadísticas de la Prueba	nivel p	Conclusión: (5%)
23	Test de Kolmogorov-Smirnov/Lilliefor	0,0997		Evidencia nula en contra de la normalidad
24	W de Shapiro-Wilk	0,9593	0,791	Aceptar la Normalidad
25	D'Agostino Sesgamiento	0,9113	0,3822	Aceptar la Normalidad
26	D'Agostino Kurtosis	0,1184	0,9073	Aceptar la Normalidad
27	D'Agostino Omnibus	0,844	0,6557	Aceptar la Normalidad
28				
29	Serie #3 (DQO Testigo)			
30	Tamaño muestral	8	Media	601,875
31	Desviación Típica	168,57	Mediana	680
32	Sesgamiento	-1,3585	Kurtosis	3,4246
33	Sesgamiento Alterno (de Fisher)	-1,6944	Kurtosis Alterno (de Fisher)	2,2918
34				
35		Estadísticas de la Prueba	nivel p	Conclusión: (5%)
36	Test de Kolmogorov-Smirnov/Lilliefor	0,229		Evidencia nula en contra de la normalidad
37	W de Shapiro-Wilk	0,7639	0,0116	Rechazar la Normalidad
38	D'Agostino Sesgamiento	2,2296	0,0258	Rechazar la Normalidad
39	D'Agostino Kurtosis	1,452	0,1465	Aceptar la Normalidad
40	D'Agostino Omnibus	7,0791	0,029	Rechazar la Normalidad
41				
42	<			
43	DQO \ Hoja2 \ Hoja3 \ Comparación de Dos Muestras Dependientes \ Pruebas de Normalidad /			

Anexo 2. Resumen de los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Parámetro	Muestreo	Entrada	Testigo	Salida
DQO (mg/L)	1	664		112
	2	800	727	390
	3	744	712	278
	5	677	668	510
	6	641	612	331
	7	298	247	216
	8	442	453	416
	9	703	692	480
	10	710	704	386
	SST (mg/L)	1	130	
2		97,5	100	29
3		100	120	76
4		26	22,5	16
5		140	120	53,3
6		140	213	55
7		54,3	74,3	24
8		88	92,9	37,1
9		32	32	10
10		96,7	110	66,7
	2	6,6	7,1	5,1
	3	20,4	29,5	8,2

NO ₃ ⁻ (mg/L)	4	17,2	9,8	16,6
	5	30,2	32,1	15,2
	7	<0,1	<0,1	<0,1
	8	0,6	0,68	0,87
	9	0,2	0,67	0,57
	10	0,1	0,1	0,8
PO ₄ ⁻ (mg/L)	1	0,99		0,15
	2	0,87	0,81	0,1
	3	0,8	0,8	0,1
	5	2,4	2,13	0,61
	6	0,7	0,2	0
	7	<0,1	<0,1	<0,1
	8	0,13	0,13	0,11
	9	0,31	0,27	0
	10	0,65	0,73	0,24
Coliformes Totales (UFC/100mL)	3	116000	169600	860000
	4	26700000	5700000	12100000
	5	13100000	1600000	8300000
	6	3000000	3700000	410000
	7	0	0	0
	8	19700000	14700000	3900000
	9	14200000	12300000	3000000
	10	1200000	1700000	30000

Coliformes Fecales (UFC/100mL)	3	0	0	0
	6	0	0	0
	7	0	0	0
	8	160000	20000	20000
	9	0	0	0
	10	100	0	0
pH	1	5,1	5,1	6,2
	3	5,1	5,0	5,6
	4	7,1	6,7	6,7
	5	4,6	5,0	5,6
	6	5,4	5,1	6,0
	7	5,9	6,4	6,7
	8	5,4	5,2	6,0
	10	5,6	5,4	6,1
Temperatura (°C)	1	19,0	19,0	19,5
	2	21,0	21,0	22,0
	3	21,0	21,0	21,0
	4	19,0	19,0	20,0
	5	20,0	20,0	20,0
	6	19,0	20,0	20,0
	7	19,0	19,0	19,0
	8	21,0	21,0	21,5
	9	20,0	21,0	21,0

	10	19,0	20,0	19,0
Caudal (L/min)	1	2,46		8,04
	3	3,30	6,22	8,08
	4	1,38	3,53	8,08
	6	1,25	3,69	3,56
	7	1,65	3,31	4,36
	8	1,52	3,26	4,34
	9	1,94	1,88	1,87
	10	4,25	3,33	1,96