

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS RURALES,  
UTILIZANDO HUMEDALES CONSTRUIDOS PLANTADOS CON CARTUCHO  
BLANCO (*ZANTEDESCHIA AETHIOPICA*)**



**CAROLINA NARANJO CHAMORRO  
JUAN SEBASTIAN VERGARA ROJAS  
Estudiantes de Ingeniería Ambiental**

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

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN SISTEMAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS RURALES,  
UTILIZANDO HUMEDALES CONSTRUIDOS PLANTADOS CON CARTUCHO  
BLANCO (*ZANTEDESCHIA AETHIOPICA*)**

**CAROLINA NARANJO CHAMORRO  
JUAN SEBASTIAN VERGARA ROJAS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de  
Ingeniero Ambiental**

**Director  
DARWIN ELIUTT HOYOS MARTÍNEZ**

**Codirector  
VICTOR FELIPE TERAN GOMEZ**

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

## Página de Aceptación

Nota de aceptación

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
MsC. DARWIN HOYOS MARTINEZ  
Director

\_\_\_\_\_  
MsC. VICTOR FELIPE TERAN  
Codirector

\_\_\_\_\_  
DR. JAVIER FERNÁNDEZ MERA  
Jurado

\_\_\_\_\_  
MsC.NAPOLEON ZAMBRANO  
Jurado

Popayán, Diciembre 17 de 2019

## **Agradecimientos**

*Agradecemos principalmente a Dios por habernos permitido llegar a este punto de nuestras vidas, por iluminar y guiar este camino de enseñanza y aprendizaje.*

*A nuestras familias, quienes estuvieron en todo momento para nosotros, sin ellos nada de esto hubiese sido posible, les agradecemos por la confianza, por apoyarnos moral y económicamente, fueron y siempre serán nuestro motor para trazar y cumplir todos nuestros objetivos.*

*A nuestra alma mater, la Universidad del Cauca, por habernos brindado todas las herramientas de alta calidad para aprender de forma teórica y práctica los temas necesarios para afrontar nuestra vida personal y profesional de manera íntegra.*

*A nuestro director el Mg. Darwin Hoyos y codirector Mg. Víctor Felipe Terán quienes confiaron en nosotros y nos apoyaron.*

*A la organización Alianza por el Agua, Acueducto Veredal Aires del Campo y Universidad del Cauca por su compromiso con la gestión del recurso hídrico.*

## Contenido

1. PROBLEMÁTICA	10
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCO TEÓRICO	15
4.1 AGUAS RESIDUALES	15
4.1.1 Clasificación de las aguas residuales	15
4.1.2 Aguas residuales domésticas rurales	16
4.2 AFECTACIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES DE LAS AGUAS RESIDUALES	16
4.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS	17
4.3.1 Descripción general de un humedal construido	17
4.3.2 Componentes de un humedal construido	18
4.4 MACRÓFITAS	21
5. REVISIÓN DE LITERATURA	23
5.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS	24
5.2 GEOMETRÍA DE UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL	25
5.3 REMOCIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS	26
5.4 MACROFITA <i>Zantedeschia aethiopica</i>	27
6. METODOLOGÍA	29
6.1 ÁREA DE ESTUDIO	29
6.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	30
6.2.1 Tanque sedimentador	31
6.2.2 Humedal construido	32
6.3 SIEMBRA DEL CARTUCHO BLANCO " <i>Zantedeschia aethiopica</i> "	32
6.4 PRUEBA GRANULOMETRICA	33
6.5 PRUEBA DE TRAZADORES	33
6.6 TOMA DE MUESTRAS Y ANALISIS DE DATOS	34

6.6.1	Tiempo de muestreo	34
6.1.2	Tipo y puntos de muestreo	34
6.1.3	Pruebas de laboratorio	34
6.1.4	Análisis de los datos	34
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
7.1	DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	36
7.1.1	Tanque sedimentador	36
7.1.2	Humedal subsuperficial de flujo horizontal.	37
7.1.3	Modificaciones en el sistema	46
7.2	EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE SST, DBO Y DQO EN EL TIEMPO DE OPERACIÓN DEL HUMEDAL CONSTRUIDO	47
7.3	ESTRATEGIAS PARA EL ÓPTIMO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE HUMEDAL CONSTRUIDO.	62
8.	CONCLUSIONES	65
9.	RECOMENDACIONES	66
	BIBLIOGRAFÍA	68

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno  
**DQO:** Demanda Química de Oxígeno  
**SST:** Solidos Suspendidos Totales  
**CF:** Coliformes Fecales  
**CT:** Coliformes Totales  
**SP:** Plantación sin Plantas  
**CP:** Plantación con Plantas  
**NMP:** Número mas probables  
**HSS:** Humedal Horizontal de Flujo Sub-Superficial

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural no renovable, fundamental para la vida en la tierra, es un compuesto con características únicas. Ha sido utilizada como medio de disolución, transporte interno de los elementos y necesaria para el desarrollo vital de los organismos (García., *et al* 2010).

A pesar de su vital importancia, se estima que la calidad del agua se deteriore aún más en las próximas décadas como consecuencia de las actividades humanas. Sólo hasta finales de los años 90 se le reconoció como origen de numerosas enfermedades infecciosas (Oswald, 2011). Por ello, hoy se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial, según datos de (OMS UNICEF 2019) aproximadamente 2000 millones de personas se abastecen de fuentes de agua contaminada por heces.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en casi la totalidad de los países de América Latina son mínimos, comparados a los volúmenes de aguas residuales domésticas generadas. Esta situación perjudica directamente a las poblaciones, ya que deben enfrentar problemas ambientales y de salud relacionados con aguas contaminadas (Platzer *et al*, 2002). El inadecuado tratamiento de las aguas se relaciona con la transmisión de enfermedades transportadas por el agua, como el dengue, el cólera, la disentería, la hepatitis A y la fiebre tifoidea, las cuales afectan principalmente a menores de 5 años. La ausencia de servicios de agua y saneamiento insuficientes o gestionados de manera inapropiada expone a las comunidades a riesgos prevenibles para la salud (OMS 2019).

En Colombia aproximadamente en 989 localidades, con poblaciones menores 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 apropiadas para el tratamiento de las aguas residuales, ya que en la actualidad “solo el 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR), es decir de 1.122 municipios en el país, solo 541 cuentan con sistemas de saneamiento” (Parra *et al*, 2018).

Según informes del IDEAM (2018), en Colombia las corrientes hídricas superficiales para el año 2016 presentaron estimaciones de vertimientos en cuanto a: DBO de 1'174.362 t/año, DQO de 2'906.555 t/año y SST de 1'364.660 t/año, las cifras incluyen el sector industrial, el doméstico y el cafetero, donde por parte del sector doméstico se contribuyó en un 45% para DBO, 35 % DQO y 80% SST del total de t/año, lo que evidencia una problemática ambiental generada por la contaminación del agua por uso doméstico.

Teniendo en cuenta la necesidad de desarrollar sistemas de tratamiento que sean eficientes en aguas residuales de tipo doméstico, a las cuales en la mayoría de



casos no se realiza ningún tipo de tratamiento siendo la principal causa de contaminación de las masas de agua, tanto superficiales como subterráneas (Bocado, 2010), es necesario procesos eficientes para reducir los índices de contaminación del agua, los cuales se cuantifican principalmente en las variables DBO, DQO y SST.

Por ello surge la propuesta de aplicar sistemas de tratamiento que sean eficientes en la remoción o transformación de contaminantes y que además sean viables en términos económicos, técnicos y sociales. Un ejemplo son las tecnologías no convencionales como los humedales construidos de flujo subsuperficial (HSS, por sus siglas en inglés) los cuales se buscan implementar con el fin de satisfacer las necesidades básicas de agua potable y saneamiento para las zonas rurales (RAS Título J, 2010).

Con la información anterior, la necesidad de utilizar sistemas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y la importancia de generar un impacto en la comunidad donde se enmarque el mejoramiento de la calidad de agua del acueducto Aires del Campo, se realizó un estudio el cual se llevó a cabo en el Hostal El Molino, ubicado en la zona rural de Paispamba, Municipio de Sotará, donde se encuentra un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas con humedal construido plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*). En este sistema se realizó un diagnóstico del funcionamiento y se evaluó la remoción de carga orgánica cuantificada en DBO, DQO y SST, con el fin de evaluar la eficiencia del sistema a la salida del recurso, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico y las cargas de entrada. En cuanto al diagnóstico realizado al sistema de tratamiento, este cumplió con los requerimientos para su adecuado funcionamiento, sin embargo se indican aspectos a considerar para lograr un mejor desempeño del sistema y replicarlo en las demás cuencas de los 11 acueductos rurales de la zona, implementando el tratamiento secundario, y mostrando que si es posible mejorar la calidad del agua.

## 1. PROBLEMÁTICA

En el mundo el 80% del agua residual generada están siendo vertidas a las fuentes hídricas sin un previo tratamiento, lo que ha provocado la disminución de la disponibilidad del recurso para el consumo de las personas (WWAP, 2017). Esta situación viene generando una problemática global en la medida que la población aumenta y los recursos hídricos disminuyen en calidad y cantidad.

Colombia ha sido reconocido como el sexto país con mayor abundancia de oferta hídrica en el mundo y el tercero en Latinoamérica (MADR, 2015), sin embargo, la carencia de sistemas de tratamiento de las aguas residuales ha contaminado buena parte de los cuerpos de agua limitando su uso. Este recurso es posteriormente utilizado para consumo y riego sin aplicarles tratamiento, lo que genera un riesgo para la salud e impacto ecosistémico.

Las áreas rurales suelen ser las más afectadas, debido a que se abastecen de aguas, que en muchas ocasiones, son de baja calidad a consecuencia de que en su uso previo fueron depositadas a las corrientes hídricas sin efectuar algún tipo de tratamiento, condicionando a los habitantes de las zonas medias y bajas de las cuencas a utilizar dichas aguas corriendo el riesgo de contraer enfermedades de origen hídrico (Londoño, 2017).

El inadecuado o inexistente tratamiento de estas aguas servidas, expone a las fuentes hídricas a incorporar altos contenidos de materia orgánica que será utilizada por los microorganismos presentes en el agua como fuente de alimento, incrementando marcadamente su población y exponiendo a las comunidades rurales de contraer enfermedades de origen hídrico. Cuando los microorganismos degradadores son aerobios generan demanda de oxígeno disuelto, convirtiendo las fuentes hídricas en medios hipóxicos o anóxicos lo que genera disminución de los organismos aerobios que habitan los ecosistemas receptores. Por otro lado, estas aguas residuales se caracterizan por poseer nutrientes como fósforo y nitrógeno, que al ser liberado generan un desbalance en la cantidad de nutrientes requeridos, trayendo múltiples inconvenientes ambientales.

Estas problemáticas se ven reflejadas en muchas de las áreas rurales del país, en el municipio de Sotará-Cauca, por ejemplo, donde el 97% de los 16.918 habitantes pertenecen a zonas rurales (MINSALUD, 2016), conviven a diario con situaciones asociadas a la calidad del agua, dado que los pobladores utilizan sistemas de disposición que canalizan los residuos directamente a los cuerpos de agua. Al disponerlas sin realizarles un tratamiento limitan el uso del recurso aguas abajo,

donde otras comunidades las requieren para el uso en los hogares y en la producción agropecuaria. Además, la dispersión de las viviendas y la poca capacidad de pago de los pobladores en servicios básicos no hace factible la implementación de técnicas para el tratamiento de las aguas residuales como las plantas de tratamiento, debido a su complejidad en el diseño y construcción para las zonas rurales.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El departamento del Cauca cuenta con una población de 1.379.169 habitantes, de los cuales el 60,2 % pertenece a zonas rurales de acuerdo a las estadísticas presentadas por el DANE 2015. Estas comunidades generan aguas residuales que son vertidas a las fuentes hídricas sin realizarles el correspondiente tratamiento y afectando la calidad del recurso.

Se conoce que en el departamento existen algunos sistemas de tratamiento, sin embargo, muchos de ellos están fuera de operación o funcionan de forma poco eficiente (DNP, 2014). En las comunidades rurales la situación es aún más delicada en la medida que la disposición de las aguas residuales se hacen sin control y las mismas aguas son captadas de los ríos y quebradas para consumo en los acueductos veredales y consumidas sin mayor tratamiento (Londoño, 2017). Lo anterior evidencia la necesidad de realizar estudios que permitan mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento ya construidos y permitan arrojar información útil y ajustada al contexto para la implementación de nuevos sistemas a construir.

Entre las diversas tecnologías no convencionales diseñadas para el tratamiento de aguas residuales, están los humedales construidos. Este sistema, ha sido recomendado en Colombia y en distintos lugares del mundo, como por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Colombia, bajo el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento-RAS, (RAS Título J, 2010), el cual propone los humedales construidos como una solución descentralizada para el tratamiento de ARD y excretas humanas en zona rural, apuntando a conseguir Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y garantizando el acceso universal al recurso agua de manera segura, apoyando tecnologías de tratamiento en los países en desarrollo (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016).

En la presente investigación se buscará evaluar el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los humedales construidos, además, se evaluará la remoción de la carga orgánica que ingresa a cada sistema para determinar la eficiencia en que se encuentran y establecer unos posibles ajustes que permitan mejorar el funcionamiento del sistema de depuración. Con los procesos optimizados y la siembra del Cartucho Blanco (*ZANTEDESCHIA AETHIOPICA*) se espera que la cantidad de materia orgánica que es depositada en las fuentes hídricas tenga una menor concentración, disminuyendo el impacto ambiental y sanitario.

Desde la perspectiva ambiental se espera que se reduzca la disponibilidad de nutrientes como fósforo y nitrógeno que son especialmente nocivos en sistemas oligotróficos como son las fuentes hídricas de alta cuenca. Esto es de especial importancia si se tiene en cuenta que el proyecto será llevado a cabo en el municipio de Sotará Cauca, donde los cuerpos de agua son fuente de abastecimiento para las poblaciones ubicadas en zonas de media y baja cuenca y que el acueducto aires del campo el cual se abastece de la microcuenca no posee planta de tratamiento, lo que genera que las personas que consumen el agua lo hagan sin ningún tipo de tratamiento. Por la parte sanitaria se espera una disminución de microorganismos patógenos que pueden generar enfermedades diarreicas agudas que son altamente comunes en las comunidades rurales del departamento. (DNP, 2014)

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la remoción de carga orgánica en un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en la vereda El Molino ubicada en el municipio de Sotará-Cauca, utilizando humedal construido plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar las condiciones de funcionamiento actual del humedal construido bajo parámetros hidráulicos y de la calidad del agua.
- Evaluar en el tiempo, el progreso de remoción de sólidos suspendidos totales y carga orgánica en el humedal construido.
- Proponer estrategias para el óptimo funcionamiento del sistema de humedal construido.

## 4. MARCO TEÓRICO

Las fuentes hídricas se pueden contaminar de forma natural cuando se encuentran sustancias en el agua sin intervención humana, teniendo diversos orígenes. El agua naturalmente contiene algunos minerales que forman parte de su composición; las aguas que fluyen por el subsuelo entran en contacto por cercanía con las rocas y la tierra que las rodea con su erosión natural, y de esta forma recibe el aporte de minerales que caracteriza y diferencia cada tipo de agua. A pesar de tratarse de un desarrollo físico y químico natural, las sustancias contenidas en solución por dicha agua en una determinada proporción funcionan como agentes contaminantes que deterioraría el organismo. Cuando actividades humanas como la minería, agropecuaria, industrial, artesanal y doméstica son la causa de la contaminación se le llama antropogénica, siendo más grave por la gran variedad de contaminantes generados (Raffo, 2014).

### 4.1 AGUAS RESIDUALES

Según la OEFA (2014), las aguas servidas son aquellas aguas que fueron alteradas por actividades humanas cambiando sus características fisicoquímicas originales, lo que conlleva a necesitar un tratamiento previo antes de ser vertida a un cuerpo de agua. Desde finales del siglo XIX se reconoció que las aguas residuales daban origen a numerosas enfermedades infecciosas, logrando que su tratamiento sea prioridad a nivel mundial (Castañeda *et al*, 2013).

**4.1.1 Clasificación de las aguas residuales.** La procedencia de las aguas residuales, hace que no tengan las mismas características, por lo que se han clasificado en tres grupos:

- **Aguas residuales industriales:** Son las que resultan de la ejecución de procesos productivos, considerando de igual forma las provenientes de la actividad minera, energética, agroindustrial, agrícola, etc. (OEFA, 2014).
- **Aguas residuales domésticas:** Las aguas residuales domésticas son el producto de las diferentes actividades cotidianas de un hogar, y generalmente se conforman de sólidos, contaminantes orgánicos, detergentes, grasas y jabones (TAR, 2014).
- **Aguas residuales municipales:** Estas aguas residuales son las que tienen orígenes domésticos, comerciales e institucionales que contiene desechos fisiológicos (MINDESARROLLO, 2000).

**4.1.2 Aguas residuales domésticas rurales.** Las zonas rurales son asentamientos que cuentan con poblaciones relativamente bajas y están ubicadas en tierra de carácter agrícola o forestal. Estas generan las llamadas aguas residuales domésticas rurales, cuando los asentamientos centrados o dispersos cuentan con 1.000 habitantes o menos (Araya y Vidal, 2014).

Las zonas rurales no cuentan con sistemas de tratamientos de aguas residuales adecuados, por lo que recurren a hacer conexiones ilegales a la red pública o directamente a los lagos, ríos y pozos profundos (Delgado y García, 2017). Esto ha dado paso al desarrollo de tratamiento de aguas residuales para comunidades pequeñas, como por ejemplo los sistemas de fitodepuración, cuya principal característica es el uso de la energía solar a través de los procesos biológicos naturales (fotosíntesis) en sustitución de la energía convencional (Fernández G. J. *et al*, 2015).

Los sistemas de fitodepuración funcionan utilizando los propios mecanismos que usa la naturaleza para la depuración de las aguas residuales, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos entre el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera (Larriva Vasquez J. B., 2017).

En la tabla 1 se muestran algunas de las características de las aguas residuales en zonas rurales.

**Tabla 1.** Características de aguas servidas domésticas en zonas rurales.

<b>Composición</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
Sólidos	SST	120 – 400
	SSV	95 – 315
Materia orgánica	DBO <sub>5</sub>	110 – 350
	DQO	210 – 800
Nutrientes	NT	20 – 80
	PT	4 – 14
Patógenos	Coliformes fecales	(NMP/100 ml) < 10 <sup>3</sup> -10 <sup>8</sup>

**Dónde:** SST: Sólidos suspendidos totales, SSV: Sólidos suspendidos volátiles, DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, DQO: Demanda Química de Oxígeno, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, NMP: Número más Probable.

**Fuente:** (Morales G. *et al*, 2013)

## **4.2 AFECTACIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Se encuentra que en los países más desarrollados tratan el 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan, ya que cuando esta se vierte



sin tratar o con un inadecuado tratamiento este traerá consecuencias (UNESCO, 2017). La mala disposición de las aguas residuales, deteriora la calidad de las fuentes hídricas incidiendo en la disponibilidad utilizable, en sus costos de suministro y tratamientos, ecosistemas acuáticos y la salud de los seres vivos (PNUMA, 2012).

La contaminación de los cuerpos de agua, por lo general, está directamente relacionada con vertimientos de aguas residuales de origen doméstico. Este tipo de residuos son nocivos debido a los altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos que contienen y que terminan en los ríos y quebradas sin ningún tipo de tratamiento, ocasionando contaminación bacteriológica y química en el agua utilizada para el consumo (Pinilla, 2003).

En el mundo, la falta de sistemas de tratamiento de aguas servidas y de aguas para el consumo doméstico ha causado 12 millones de muertes por año y alrededor de 1.200 millones de personas están en riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales (Mondaca y Campos, 2014).

El consumo de agua contaminada es la responsable del 80% de las enfermedades y más de un tercio de las muertes en los países en vía de desarrollo (OPS, 2006). En lugares que no cuentan con los sistemas de tratamientos apropiados, suelen ser más vulnerables debido a que las enfermedades se propagan con mayor rapidez, ya que los organismos causantes de infecciones que contienen los desechos humanos son transportados por el agua, contaminando los abastecimientos de agua potables y los alimentos (Araya y Vidal, 2014).

### **4.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS**

**4.3.1 Descripción general de un humedal construido.** Los humedales construidos se basan en la plantación de un cultivo de macrófitas sobre un lecho inerte, en el que se encuentran tres principios básicos: La contribución de oxígeno que brindan las plantas en horas del día al sistema, la actividad bioquímica de los microorganismos y el apoyo físico del lecho, que actúa como sostén para las plantas y como material filtrante (Andrade M., 2010).

Dentro de estos sistemas se generan funciones de tres tipos: 1) Las físicas, las cuales se fundamentan en la regulación del ciclo del agua, 2) las químicas que aportan a la regulación de ciclos de nutrientes y descomposición de biomasa, y 3) las bioecológicas encargadas de la productividad biológica, estabilidad e integridad de ecosistemas y retención de óxido de carbono (Rivera D., 2015).

(LARA, 2000) habla sobre los componentes que conforman un humedal, siendo estos: el agua, el medio de soporte (sustrato) y la vegetación, aunque también es importante tener en cuenta las comunidades de microorganismos y los invertebrados acuáticos que se desarrollan naturalmente en estos sistemas.

**4.3.2 Componentes de un humedal construido.** Los componentes más importantes de un humedal son:

- Agua: El agua es el disolvente universal, por lo que puede combinarse con muchas sustancias y ser su medio de transporte, lo que lleva a considerar a este factor como el más importante para diseñar humedales. Por lo que Salazar y Morales (2003) recomiendan tener muy en cuenta la hidrología en los humedales.

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.

- Vegetación: La vegetación es un componente esencial en el diseño de plantas para el tratamiento de aguas residuales, debido a sus grandes propiedades con relación a los procesos de remoción. Las macrófitas pueden ejercer funciones de desbaste, reteniendo los sólidos gruesos que transporta el agua residual. También, actúa como barrera física reduciendo la velocidad del influente, lo que favorece la floculación y la sedimentación de partículas en suspensión, además causan un amortiguamiento en las temperaturas externas permitiendo que el calor del influente no se disipe. Las raíces actúan como sostén de los microorganismos que se crean por la interacción raíz-influente, por lo que cada planta brinda un área superficial que contribuye al desarrollo de 'bio-películas', en las que crecen bacterias, protozoos, y algas microscópicas (Fernández G. J. et al, 2015). Por último, las plantas brindan una estética paisajística que pocos sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden adquirir.

Dentro de los humedales construidos la remoción de contaminantes se efectúa de diferentes procesos químicos, biológicos y mecánicos. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada uno de estos componentes es bastante compleja (Delgadillo *et al.*, 2010).

- Medio de soporte: Según (Arcila, 2010) los sustratos en los humedales construidos pueden contener suelo, arena, grava, roca, y materiales

orgánicos. Este medio además de proporcionarle sostén a la vegetación, también:

- Soportan a muchos microorganismos vivientes en el humedal.
- Su permeabilidad afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro este medio.
- Microorganismos: Los microorganismos son un importante componente de los humedales construidos, ya que consumen gran parte de carbono orgánico y nutriente, también influyen en las condiciones de óxido-reducción del sustrato, mejorando la capacidad de procesamiento del sistema y participa en el reciclaje de nutrientes. Davis (1994) (Kushck *et al.*, 2001).

**4.3.3 Remoción de Materia Orgánica.** Los microorganismos que se asocian al sistema radicular de las plantas se encargan de hacer la remoción de la materia orgánica, Una pequeña parte es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración cuando se adhieren a los sólidos suspendidos (Delgadillo *et al.*, 2010). Este proceso puede remover hasta un 95% de la materia orgánica total. (Araya y Vidal, 2014).

La remoción de la materia orgánica sedimentable en los humedales de flujo subsuperficial es rápida, gracias a su baja velocidad en el sistema, deposición y filtración. Aproximadamente el 50% de la DBO que entra a estos sistemas es removida en los primeros metros, ya sea aeróbica o anaeróbicamente. La DBO restante se encuentra disuelta o en forma coloidal, y es removida por los microorganismos que crecen en el sistema (Lara, 1999).

Los humedales construidos son una tecnología viable, ya que ofrecen buenos resultados respecto a la eficiencia de remoción. Además, su construcción y operación requiere bajos costos. No demandan reactivos químicos ni energía para la aireación del agua o para la recirculación de esta. La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple y asequible. Es una tecnología adecuada para ser aplicada en proyectos de cooperación dado que no genera dependencia tecnológica (García y Corzo, 2008). Estos sistemas tienen la ventaja de ser flexibles con los cambios de caudal y carga del efluente (Dávila, 2013). Gracias al aislamiento térmico, tiene la potencialidad de funcionar bien en temperaturas ambientales inferiores a las de congelamiento (< 4 °C).

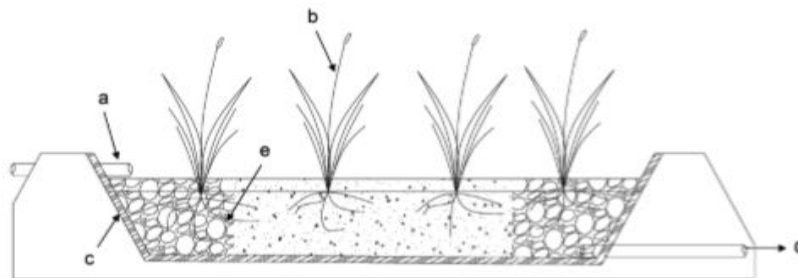
Los humedales pese a remover gran cantidad de materia orgánica (30- 95%) y que no producen lodos como subproducto del tratamiento (Araya y Vidal, 2014)

son sistemas biológicos, por ello es recomendable un pre-tratamiento para eliminar sólidos gruesos, arenas, materias flotantes y grasas (Fernández G. J. et al, 2015).

La vegetación cosechada en los humedales, como especies ornamentales pueden mejorar la estética del sistema y buscar beneficios además del tratamiento de aguas residuales, como su uso comercial. Se recomienda plantar especies propias de la zona ya que se adaptan mejor y es más fácil su supervivencia (García y Corzo, 2011).

Los humedales construidos tienen la desventaja de requerir superficies entre 20 y 80 veces superiores a las tecnologías convencionales, su funcionamiento es recomendable hacerlo después de algunos meses de su construcción. (Araya y Vidal 2014). Además, 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). En la siguiente figura se muestra un esquema de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

**Figura 1:** Vista de perfil de humedales construido de flujo subsuperficial horizontal



**Donde:** a) Estructura de entrada, b) Vegetación emergente c) Impermeabilización, d) Estructuras de la salida, e) Medio granular. **Fuente:** (Morales *et al.*, 2013)

- **Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSS):** Los humedales de flujo horizontal sub-superficiales son sistemas que utilizan entre 0,8 y 20 metros cuadrados de terreno por cada habitante (Araya F et al, 2014), estos pueden llegar a soportar cargas orgánicas que varían entre 3 y 15 gDBO<sub>5</sub> /m<sup>2</sup>d, siendo recomendadas cargas alrededor de 6 gDBO<sub>5</sub> /m<sup>2</sup> d (García y Corzo, 2008). Además, los HSS también pueden remover cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados del agua residual (González, 2011).

Los HSS llevan capas de material inerte de diferentes diámetros, que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante (Andrade M., 2010), (Crites *et al.*, 2006) mencionan que en los humedales se utiliza desde arena gruesa (2 mm) hasta grava gruesa (128 mm). Es importante colocar una barrera impermeable bajo el lecho, para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas (García y Corzo, 2008). El sustrato se puede reemplazar cada 10-15 años (Hidalgo et al, 2005), ya que durante ese tiempo mantienen la eliminación de DBO<sub>5</sub>, DQO y sólidos en suspensión alta y constante (Vymazal J., 2005).

El agua efluente se extrae por medio de una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal, que va conectada con otra tubería en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel de agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento (García y Corzo, 2008).

#### **4.4 MACRÓFITAS**

Las macrófitas que generalmente son utilizadas en los humedales construidos, corresponde a especies típicas de humedales naturales, como son bullrush (*Scirpus sp.*), Espadaña (*Typha sp.*) y juncos (*Phragmites sp.*), esto se debe a que estas plantas tienen buena adaptación bajo diferentes condiciones climáticas. (Zurita et al, 2008). Una de las ventajas que tiene el *Phragmites sp.*, y la *Typha sp.*, es que su cosecha se puede hacer una vez al año como mínimo (Hidalgo et.al, 2005).

Existe la posibilidad de utilizar otros tipos de plantas tolerantes a la humedad en humedales construidos, como lo son las plantas ornamentales (Belmont et al., 2004). Estas plantas funcionan bien como parte de un sistema de tratamiento de aguas residuales, y tienen la ventaja de ofrecer un valor económico agregado, gracias al valor comercial de las flores (Zurita *et al.*, 2011).

Este tipo de plantas no se consumen por lo que no representarían un riesgo para la salud si se contaminan con compuestos tóxicos de un humedal (Belmont et al., 2004). Las plantas ornamentales *Zantedeschia aethiopica*, *Canna spp.* y *Iris spp.*, tienen un buen resultado en cuanto a la remoción de cargas orgánicas, nutrientes (Zurita *et al.*, 2011) y cromo (Suarez *et al*, 2014).

La macrófita cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*), Figura 2, es una planta que produce flores que tienen comercialización en el mercado, lo que ha llevado a ser muy viable su cultivo. Se puede encontrar a alturas entre los 600 m.s.n.m. y

3100 m.s.n.m., con condiciones óptimas de temperaturas entre los 12 °C y 23 °C. El cartucho blanco puede alcanzar hasta 1.80 m de altura, y tiene la facilidad de reproducirse asexualmente mediante hijuelos de plantas adultas (Cruz y Castillo, 2017).

**Figura 2:** Cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*)



**Fuente:** Propia

## 5. REVISIÓN DE LITERATURA

La preocupación por el suministro de agua potable y recolección de aguas servidas data desde los años 2500 antes de Cristo, en imperios Mesopotámicos de Asia y Babilonia donde existen evidencias en minas cerca de Bagdad de letrinas y alcantarillas. Antiguas civilizaciones pasadas como la prehelénica en la isla Creta, transportaban agua bajo presión y recolectaba sus desechos a través de sistemas de alcantarillas. Parte de estos sistemas aún operan en el lugar (Roldan, 1992).

En Londres (1815), Boston (1833) y París (1880) se dictaron leyes respecto a la disposición de aguas servidas. Pero a pesar de los intentos por sanear las aguas, el acelerado desarrollo industrial, los cultivos agrícolas y la explotación demográfica de las últimas décadas han agravado el problema, de tal manera que diversos países han comenzado a buscar soluciones eficaces para el control de la contaminación (Arcila, 2010).

La revolución industrial estimuló el crecimiento de las ciudades causando un deterioro en el medio ambiente. Uno de los mayores daños fueron causados a las fuentes hídricas, ya que en esa época era un hábito arrojar el agua residual a los ríos más cercanos convirtiéndolos en pozos negros, esta situación se convirtió más adelante en la causante de epidemias, debido a que las personas consumían el agua que estaba siendo contaminada (Ramos *et al*, 1999).

El hombre en los últimos 150 años ha utilizado sistemas convencionales de depuración de aguas para mejorar su calidad y en busca de alternativas de bajo costo y efectividad en remoción de contaminantes consideró el estudio de los humedales, los cuales han sido utilizados durante siglos por la humanidad como receptáculos de aguas residuales sin conocer sus propiedades para el tratamiento de estas. Y, no fue sino hasta hace algunas décadas que se identificó su importancia económica para los ecosistemas y su participación en el mejoramiento de la calidad del agua residual. En la actualidad los sistemas de humedales se aplican en varios países, y no solo para tratar aguas residuales domésticas sino también para tratar afluentes con características distintas. En los países en vías de desarrollo, el uso de humedades artificiales se ha enfocado principalmente a tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico y rehúso en el riego de cultivos agrícolas (Arcila, 2010).

Los humedales construidos son una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales para comunidades pequeñas o sistemas rurales, debido a que la operación y mantenimiento no requieren de personal especializado ni procesos complicados (Larriva *et al*, 2017). A nivel mundial se está empleando más esta tecnología, por ser muy eficiente y amigable con el medio ambiente.

### 5.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS

(Srinivasan N., 2000) En el estado de Texas, EE.UU. construyó humedales de flujo subsuperficial para mejorar la calidad de efluentes de tanques sépticos de ocho residencias. Para determinar el tamaño se tuvo en cuenta un valor teórico de DBO aproximadamente de 200 mg L<sup>-1</sup> y con una concentración pronosticada de efluente de 20 mg l<sup>-1</sup>. En investigación se sembraron diferentes plantas ornamentales tales como *Canna fláccida*, *Cyperus alternifolius*, *Sagittaria lancifolia*, *Scirpus* sp., *Typha latifolia*, *Collocasia esculenta*, *Gladiolus* sp., *Iris* sp. Y *Thalia* sp. Se observó durante los dos años de estudio que la DBO<sub>5</sub> del agua séptica disminuyó en un 80-90% y que los Coliformes fecales se redujeron entre 90-99% logrando menos de 2 UFC.

En Ohio, EE. UU. (Steer D. *et al*, 2002) construyó Veintiún sistemas unifamiliares de tres celdas (tanque séptico con dos humedales en serie) para familias conformadas entre 1-7 personas. Los humedales comparten un diseño común y tienen 4.5 × 5.5 m de ancho, 0.46 m de profundidad con un sustrato de grava del lecho del río de 3 cm de diámetro. Generalmente el humedal número uno está plantado con *Scirpus* o *Sagittaria* y el número dos con plantas ornamentales como *Acorus calamus*, *Lobelia carinalis*, *Asclepias incarnata* y *Pontederia cordata*. En los 6 años de monitoreo se obtuvieron eficiencias de DBO<sub>5</sub> (89% por debajo de 30 mg / l), SST (79% por debajo de 30 mg / l); y CF (74% por debajo de 1000 colonias / 100 ml). Con esto se llegó a que los humedales construidos son un efectivo tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

Se han realizado experimentos para las comparaciones entre los HSS respecto a los humedales subsuperficiales de flujo vertical (VSS), en donde se demostró que estos sistemas eliminaron más del 80% de SST, nitrato, DBO<sub>5</sub> y DQO de las aguas residuales domésticas (Belmont M. A., 2004).

(Wang *et al*, 2017) dicen que los VSS que muestran una mayor eliminación de SST (93,4%) en climas fríos (<15°C) que los HSS, a pesar de que estos no tienen diferencias significativas en cuanto a la temperatura. La eliminación de materia orgánica de los HSS en climas fríos tienen un promedio para DBO<sub>5</sub> (85.2%), SST



(81.4%) y DQO (87.0%), mientras que por encima de 15 ° C los valores son 90.5% y 90.8%(Wang *et al*, 2017).

En los humedales construidos la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) es generalmente baja y no excede el 50% para las aguas residuales municipales (Vymazal, 2005). En cuanto al fósforo se ha encontrado que los humedales de flujo superficial cuentan con una remoción muy similar a los humedales de Flujo Sub-Superficiales (50.4% y 50.2%). En el sur de Florida, E.E. U.U., se han llegado a reportar hasta el 71% de remoción de fósforo en aguas residuales. En Finlandia los reportes tuvieron un margen más amplio, ya que se encontraron eficiencias de 49 y 68%, en donde no se tuvo éxito fue en Sídney (Australia) debido a que las remociones obtenidas son de 12% (Peña *et al*, 2012).

El nitrógeno, en humedales de flujo libre presentan una remoción del 63.3%, superiores a las encontradas en humedales de flujo subsuperficial, en donde se hallaron eficiencias del 44.6%. Sin embargo, en Kansas, E.E. U.U., se lograron eficiencias muy altas del 85%, aunque otros autores indican remociones del 45%. En Australia se reportaron eliminaciones del 16%. (Peña *et al*, 2012).

## **5.2 GEOMETRÍA DE UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL**

Los elementos geométricos e hidráulicos son muy importantes en el diseño de humedales construidos, ya que aseguran el comportamiento del flujo, y por tanto las eficiencias en la remoción de contaminantes (Lara 1999). Por esta razón existen algunos parámetros de construcción generales que recomiendan algunos autores.

En los HSS la profundidad puede variar entre 0,3 y 1,0 m (Crites *et al.*, 2006), donde se recomienda una altura vertical del lecho entre 0.4 y 0.6 m (Luna-Pabello, 2014), con una lámina de agua que se encuentre alrededor de los 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie, aunque (Srinivasan N., 2000) obtuvo buenos resultados con láminas entre 7,5-10 cm. Los diámetros del lecho podrían estar entre los 5 y 8 mm para que los resultados sean buenos (García y Corzo, 2008).

Larriva *et al.* (2017), realizaron pruebas de trazadores para caracterizar el comportamiento hidráulico de un humedal con flujo sub-superficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales. Se pudo observar en los resultados que para un tiempo de retención hidráulico de 24 y 36 horas podría usarse una relación largo/ancho 2:1 a 3:1 para asegurar la tendencia hacia flujo pistón en humedales

artificiales de flujo sub-superficial horizontal, con lo cual se mejora la eficiencia en la remoción de contaminantes.

Se ha visto que la materia orgánica no se elimina gradualmente a lo largo de la unidad, por lo que se recomienda que el influente se distribuya en varios puntos a lo largo de la unidad (alimentación escalonada). Alternativamente, una forma trapezoidal del humedal en vista de plano también sería más eficiente. (Akratos *et al*, 2007).

### 5.3 REMOCIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

El género *Phragmites* es una de las macrófitas más usadas en los humedales construidos, (Vymazal, 2002) reportó que la *Phragmites communis* tuvo eficiencias de DBO<sub>5</sub> hasta de un 88% y de SS de un 84%, de la *Phragmites australis* se han reportado remociones de 72-85% de DBO usando HSS (Zurita *et al*, 2009). En el caso de los carrizos y juncos, siempre tienen una eficiencia entre 80% y 90% (Luna-Pabello *et al*, 2014).

También se han realizado otros estudios en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal con otras plantas, dando buenos resultados tales como: *Cyperus ligularis* (DQO:85%), *Echinochloa colonum* (DQO:93%) (Charris *et al*, 2016), *Heliconia psittacorum* (DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, por encima del 70 %), (Peña-Salamanca *et al*, 2013), *Typha latifolia* (DQO: 53,9 %, DBO<sub>5</sub>: 83,2 % y SST: 95.5%), *Cyperus papyrus* (DQO: 47,9 %, DBO<sub>5</sub>: 82,9 % y SST: 40.3%) (Bedoya, 2014).

Las plantas ornamentales son una alternativa para tratar aguas residuales en humedales construidos, ya que tienen un alto valor económico como lo son *Strelitzia reginae*, *Zantedeschia aethiopica*, híbridos de *Canna*, *Anthurium andreanum*, *Agapanthus africanus* y *Hemerocallis dumortieri* (Zurita *et al*, 2006, Zurita *et al*, 2009). Estudios han demostrado que estas plantas en un HSS se comportaron tan bien como la espadaña (*Typha angustifolia*), obteniendo unos resultados de remoción de SST muy similares y eficiencias de DBO<sub>5</sub> de 79 - 81% (Belmont *et al*, 2004, Zurita *et al*, 2009). En VSS las plantas ornamentales han removido más del 80% para DBO y DQO (Zurita *et al*, 2009). (Morales *et al*, 2013) reporta que plantas ornamentales han eliminado materia orgánica (DBO<sub>5</sub>) y nutrientes (NT y PT) con una eficiencia mayor al 70%.

Las plantas ornamentales han mostrado una eficiencia de eliminación de materia orgánica y nutrientes muy efectivas, por esta razón es posible sustituir las macrófitas comúnmente usadas en los humedales subsuperficiales por estas plantas, sin disminuir las eficiencias (Zurita *et al*, 2011), y entregando un valor

estético al entorno, junto a un posible beneficio económico para la población que está a cargo del sistema (Morales *et al*, 2013).

#### 5.4 MACROFITA *Zantedeschia aethiopica*

En un estudio realizado por (Zurita *et al*, 2006) evidenciaron que la planta ornamental *Zantedeschia aethiopica* se desarrolla bien en los humedales construidos, ya que muestran un crecimiento rápido y buen producido de flores, con aumento en meses fríos. (Fonseca *et al*, 2015) reporta que esta planta sembrada en un humedal tuvo una eficiencia de DQO del 62 %, CT (63,98%) y disminución de E. coli (31,03%).

Se han realizado estudios con la planta ornamental *Zantedeschia aethiopica* en humedales subsuperficiales, en los cuales se ha podido observar un buen comportamiento en cuanto a la remoción de carga orgánica (tabla 2) (Zurita *et al.*, 2011). Estos estudios se realizaron con tiempos de retención hidráulicos de 4 días.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos con la planta *Zantedeschia aethiopica*.

Tipo Humedal	Condiciones de efluente						Referencia
	DBO <sub>5</sub>		DQO		SST		
	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	
HSS	77- 81	10 -12	83 – 85	31 - 34	100	<1.0	Zurita <i>et al</i> ,2006
HSS	76 - 82	21 - 28	73 – 78	46- 57	72 - 86	6 - 17	Zurita <i>et al</i> ,2008
VSS	75 - 86	16 - 28	74 – 80	41- 72	47- 59	17- 28	
HSS	73 - 79	21 - 28	73 – 78	46 - 57	72 - 86	6 - 17	Zurita <i>et al</i> ,2009
VSS	78 - 83	16 - 28	74 – 80	41 -72	47- 59	17- 28	

**Dónde:** DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno los 5 días, DQO: Demanda química de oxígeno, SST: Sólidos suspendidos totales HSS: Humedal de flujo subsuperficial horizontal, VSS: Humedal de flujo subsuperficial vertical

**Adaptado de:** Zurita 2006, 2008, 2009.

(Zurita *et al*, 2009) encontraron que las eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> y la DOQ en los VFCW fueron más altas que en los HFCW en plantas ornamentales, pero en un estudio con fluorescencia inducida por láser (LIF) y mediciones físicas para

evaluar y comparar la salud de una planta ornamental, *Zantedeschia aethiopica*, bajo los dos patrones de flujo, se pudo observar que las plantas en un HSS eran más saludables que las de un humedal subsuperficial de flujo vertical (Zurita *et al*, 2008).

Es posible sustituir las macrófitas comúnmente usadas en los humedales subsuperficiales por plantas ornamentales, sin disminuir las eficiencias, gracias a que esta planta es comercial (Zurita *et al*, 2011).

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 ÁREA DE ESTUDIO**

El municipio de Sotará en el departamento del Cauca se ubica en áreas localizadas entre los 1.800, 2.000 y 3.670 m.s.n.m., con su cabecera municipal ubicada a 2.600 m.s.n.m., con una extensión de 517.766 Km<sup>2</sup>. Limita al oriente con el municipio de Puracé, al occidente con los municipios de Timbío, Rosas y la Sierra, al sur con el municipio de la Vega y al norte con el municipio de Popayán. Gran parte de este territorio es montañoso, con su relieve perteneciente a la cordillera central y microcuenca río Molino (Cuenca del río Patía). Su cabecera Paispamba, dista a 41 Km de Popayán y se encuentra a los 2°19' de latitud norte y 76°34' de longitud Oeste de Greenwich.

Estaciones meteorológicas de Paispamba y la Sierra, reportan que en la región la temperatura es casi homogénea todo el año, con una temperatura entre 8 y 12°C, su clima se considera como clima frío húmedo. Las precipitaciones promedio anual se concentran entre 1500 - 2000 mm (IDEAM, 2010).

El estudio se realizó en un humedal construido ubicado en el hostel "EL MOLINO FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" en la vereda el Molino a dos kilómetros de su cabecera municipal Paispamba.

**Figura 3:** Área de estudio: Imagen a la izquierda: ubicación geográfica de la cabecera municipal Paispamba.



**Fuente:** [https://es.wikipedia.org/wiki/Sotar%C3%A1\\_\(Cauca\)#/media/Archivo:Colombia\\_-\\_Cauca\\_-\\_Sotar%C3%A1.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Sotar%C3%A1_(Cauca)#/media/Archivo:Colombia_-_Cauca_-_Sotar%C3%A1.svg) Imagen a la derecha: ubicación hostel “El Molino Francisco José de Caldas” (2°11'59.5"N 76°38'55.5"W).

## 6.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La Comunidad perteneciente a la vereda El Molino, construyeron un humedal para el tratamiento de aguas sanitarias en el hostel “El Molino Francisco José de Caldas”, contando con asesoría técnica de personal del acueducto veredal Aires del Campo para su elaboración.

Es importante destacar que el sistema no había sido monitoreado desde su construcción, por tanto, era desconocida su operabilidad, eficiencia, remoción de cargas orgánicas y microbianas, caudal, etc.

En los sistemas de tratamiento que incluyen humedales es importante un pretratamiento, ya que estos sistemas remueven la mayoría de sólidos suspendidos y sedimentables (Arcila, 2010), así como la DBO por procesos físicos de asentamientos (RAS, 2000). En este caso se tiene como unidad de pretratamiento un tanque sedimentador antes del humedal.

**6.2.1 Tanque sedimentador.** Debido a que los humedales construidos son sistemas biológicos, Fernández G., *et al.* (2015) recomiendan reducir el contenido de algunos contaminantes presentes en el agua residual implementando sistemas pretratamiento para eliminar sólidos gruesos, arenas, materiales flotantes y grasas (desbaste, desarenador, desengrasador). Seguido de un tratamiento primario con el objetivo de reducir el contenido en sólidos totales y en suspensión y materia orgánica.

Este tanque cuenta con una capacidad de 1.000 litros, cuyas dimensiones son 1,37 m de ancho y 1,25 m de profundidad, la entrada es un tubo de ocho pulgadas que viene desde “la caja”, la cual recoge las aguas provenientes de todas las baterías sanitarias, duchas y los lavamanos; al entrar este tubo toma una curvatura hacia abajo a unos 40 centímetros de la superficie, la salida del tanque tiene la misma forma y profundidad a excepción del grosor del tubo que es de 3 pulgadas.

Este tanque se encuentra a 6 metros de la vivienda y aproximadamente a 15 metros del río El Molino, a su alrededor no hay árboles que puedan afectar con sus raíces el sistema más adelante. El tanque está puesto a nivel del suelo y para evitar malos olores tiene una tapa que ajusta a presión.

**Figura 4:** Sistema de tratamiento.

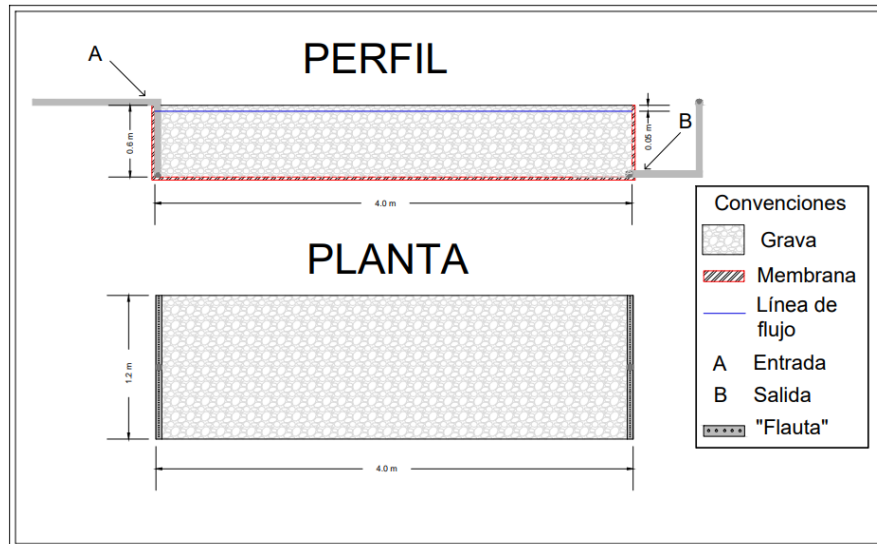


**Donde:** A) Tanque de sedimentación y B) Humedal construido con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).

**6.2.2 Humedal construido.** Este humedal se puede clasificar como un humedal subsuperficial de flujo horizontal, con medidas de 4 m de largo, 1,20 m de ancho y 0,70 m de altura, su pendiente es aproximadamente de 0.5%, con caída hacia la salida del humedal. El lecho es de grava triturada de un medio ( $\frac{1}{2}$ ) y tres cuartos ( $\frac{3}{4}$ ) de pulgada que se encuentran mezclados. Para evitar la filtración del agua, este cuenta con una membrana (plástico negro - calibre 6) entre el triturado y el suelo.

El afluente entra al humedal por medio de una tubería con perforaciones a su alrededor, este tubo esta puesto horizontalmente y se encuentra a 40 centímetros de la superficie; para la salida del efluente se tiene un tubo con las mismas características ubicado al otro extremo y puesto sobre el fondo del humedal.

**Figura 5:** Esquema del estado actual de los humedales de flujo subsuperficial horizontal.



**Fuente:** Propia

La parte vegetal en los humedales construidos es un componente esencial para el proceso de remoción, por esta razón se sembraron los 4,8 metros cuadrados de área superficial del humedal con la planta comúnmente llamada cartucho blanco "*Zantedeschia aethiopica*". Esta planta fue escogida debido a que es común en la zona y a que en diversos estudios se ha utilizado en humedales construidos para la remoción de materia orgánica.

### **6.3 SIEMBRA DEL CARTUCHO BLANCO "*Zantedeschia aethiopica*"**

El cartucho blanco "*Zantedeschia aethiopica*" fue colectado en una zona aledaña a la que se encuentra el humedal construido, en áreas húmedas generadas por un



pequeño arroyo que pasa por el sector. Se cosecharon plántulas jóvenes con tamaños entre 40 y 65 cm como se puede evidenciar en la tabla 3, y fueron sembrados inmediatamente en el humedal alcanzando una densidad de siembra de cuatro plantas por metro cuadrado.

El sistema de tratamiento se operó aproximadamente tres meses sin macrófitas para mejorar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas y posteriormente se realizó el proceso de siembra anteriormente descrito.

**Tabla 3:** Medidas de plantas sembradas en el humedal.

planta	tallo (cm)	Observa.	planta	tallo (cm)	Observa.
1	51	Con flor	8	61	Con flor
2	52		9	60	
3	55		10	65	
4	61		11	49	
5	53	12	55		
6	52	13	43		
7	46	Raíz doble	14	40	

#### 6.4 PRUEBA GRANULOMETRICA

Esta prueba se realizó para encontrar los porcentajes de los tamaños que tiene el lecho del humedal construido.

Para esta prueba se tomó triturado en cantidades pequeñas de distintos puntos del humedal hasta completar aproximadamente 18 Kg, posteriormente se secó a temperatura ambiente, se mezcló y se seleccionaron 10 Kg por el método de cuarteo. Por último, el lecho seleccionado se pasó por tamices de 5 diferentes tamaños (1 pulgada,  $\frac{3}{4}$  de pulgada,  $\frac{1}{2}$  pulgada,  $\frac{3}{8}$  de pulgada y tamiz N°4) y se pesaron.

#### 6.5 PRUEBA DE TRAZADORES

Estas pruebas proporcionan información sobre los canales de flujo que ocurren en el depósito en un proceso de inyección. Para este experimento se utilizó como trazador la sal común por su facilidad de medir las conductividades del agua.

Para realizar este experimento primero se realizó una dilución de 450 g de sal común en 5 litros de agua destilada, y posteriormente la dilución se agregó en la

entrada del humedal y se midió la conductividad en la salida del sistema cada hora, durante dos días.

## **6.6 TOMA DE MUESTRAS Y ANALISIS DE DATOS**

**6.6.1 Tiempo de muestreo.** El muestreo comenzó tres meses después del arranque del sistema y finalizó veinte semanas después, durante este tiempo las muestras fueron tomadas con una frecuencia quincenal para monitorear los cambios que se presentaron en el humedal.

**6.1.2 Tipo y puntos de muestreo.** El muestreo fue de tipo simple, puntual o instantánea, que consiste en tomar una muestra en un punto específico durante un tiempo y un punto determinado en la zona de muestreo. Esta se realizó en dos puntos, los cuales fueron al inicio del humedal y en su salida. En cada punto de control se recolectó una muestra, las cuales fueron transportadas hasta el laboratorio en una nevera portátil a 4°C.

**6.1.3 Pruebas de laboratorio.** Se consideraron algunas variables típicas para la caracterización de aguas residuales:

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Para la DBO<sub>5</sub> se tuvo en cuenta los criterios de “standard methods for the examination of water and wastewater” inciso 5210. Se realizaron 5 diluciones para cada muestra con su correspondiente blanco.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Para esta prueba se utilizó el método de Reflujo cerrado o método titulométrico, teniendo en cuenta los criterios de “standard methods for the examination of water and wastewater” inciso 5220C, para cada muestra se realizaron 3 réplicas con su respectivo blanco.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Para esta prueba se realizó el siguiendo el método de Sólidos totales en suspensión secados a 103-105 °C teniendo en cuenta el “standard methods for the examination of water and wastewater” inciso 2540D.

Adicional a la evaluación de materia orgánica se midieron parámetros fisicoquímicos como: pH, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura mediante el método potenciométrico y se complementó con una cuantificación de Coliformes.

**6.1.4 Análisis de los datos.** Los análisis estadísticos de los datos recolectados en las pruebas de laboratorio, se realizaron mediante Microsoft office Excel y el software estadístico Rwizard.



## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.

El sistema cuenta con un tanque de plástico que funciona como un sedimentador primario, conectado por medio de una tubería de tres pulgadas a un humedal subsuperficial de flujo horizontal, el cual tiene una plantación de cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) que ayuda a la remoción de materia orgánica.

El caudal que ingresa al humedal presenta variaciones en el tiempo, debido a la intermitencia en la ocupación del hostel. Esto se puede ver en la Tabla 4, donde se reportan los valores del caudal y su desviación estándar.

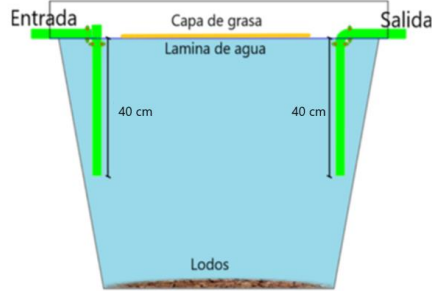
**Tabla 4:** Resumen estadístico del caudal

Promedio (L/día)	SD ( $\pm$ )	Valor Max.	Valor Min.
398,53	303,4	1042,76	93,44

**7.1.1 Tanque sedimentador.** Para el diagnóstico del tanque sedimentador se tuvo en cuenta algunas de las recomendaciones establecidas por el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000), Sección II, Título E, Tratamiento de aguas residuales.

- **Geometría:** Los tanques sedimentadores deben tener una forma de cono en la parte inferior, para que los sólidos que se sedimenten vayan directamente al fondo. Este tanque no posee ningún tipo de inclinación o forma cónica en el fondo, para que la acumulación de lodos sea más eficiente, a pesar de ello, con un adecuado mantenimiento, el tanque puede funcionar como sedimentador sin tener algún tipo de complicaciones.
- **Configuración hidráulica de la unidad:** El agua que llega al sedimentador se conduce a través de tuberías sanitarias en PVC de 6 pulgadas, esta se entrega a una profundidad de 40 cm respecto a la lámina de agua, incumpliendo lo establecido por la RAS 2000 que establece un valor entre 45 y 60 cm de profundidad (figura 6). Por su parte el afluente es tomado mediante una tubería sanitaria en PVC de 3 pulgadas a una profundidad de 40 cm, lo que si bien no cumple con la normatividad indicada en el RAS 2000 (45-60 cm), evita la captación de materiales grasos que se acumulan a nivel de superficie dada su densidad. La distribución de las líneas hidráulicas hacen que la unidad posea características de trampa de grasas.

**Figura 6:**Esquema de tanque sedimentador



**Fuente:** Propia

- **Tiempo de retención hidráulico:** El tiempo de retención del tanque sedimentador es de 2,5 días, aunque este puede variar debido a las fluctuaciones que presenta el caudal. El tiempo de retención se encuentra dentro de lo establecido por la RAS 2000, que indica un mínimo de una hora.

**Control de olores:** La RAS 2000 señala que para un buen funcionamiento se debe evitar la acumulación excesiva de lodos, ya que al descomponerse de forma anaerobia generan productos en estado gaseoso con olores indeseables, por esta razón es importante estar retirando tanto el material sobrenadante como los lodos acumulados en el sistema. En el monitoreo del tanque sedimentador no se registraron olores desagradables que llegaran a incomodar a la población que hace uso del hostel, sin embargo el material flotante debió ser retirado para evitar su descomposición al interior de esta unidad.

### 7.1.2 Humedal subsuperficial de flujo horizontal.

- **Dimensiones:** El humedal tiene una longitud de 4 metros de largo, y 1.20 metros de ancho, para este tipo de sistemas, Larriva *et al.*, (2017) recomiendan que un humedal con flujo sub-superficial horizontal debe tener una relación largo/ancho 2:1 a 3:1 para asegurar la tendencia hacia flujo pistón y mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Se puede observar que la relación largo ancho para el humedal estudiado es 2:0,6 lo cual indica que el humedal, si cumple con la tendencia hacia flujo pistón, pero debería tener un ancho un poco mayor para que alcance los valores recomendados y evitar un descenso en la eficiencia de remoción de la contaminación orgánica (Crites *et al.*, 1998).

La altura del humedal está asociada a la de la grava que es de 0.7 metros. Este valor se encuentra dentro de los recomendados por Crites *et al.* (2006) (0,3 m -1,0 m), pero ligeramente por encima del recomendado por Luna-Pabello (2014) que es de 0.4-0.6 m. La altura entre la lámina de agua y la sección superior del manto rocoso tiene una diferencia de 0.05 metros, para

que el agua residual no quede expuesta y pueda generar malos olores. Dicho valor también está dentro de los recomendados (aproximadamente 0,05 cm) por los autores mencionados anteriormente, aunque (Srinivasan N., 2000) obtuvo muy buenos resultados con alturas entre los 7.5 y 10 centímetros. La altura que separa la lámina de agua de la superficie en el humedal (0,05 cm) se puede decir que es adecuada, ya que esta no ha mostrado inconvenientes en el enraizamiento de las macrófitas, no genera malos olores, ni se evidencia presencia de insectos y roedores.

- **Granulometría:** De acuerdo a la información suministrada por la comunidad el lecho del humedal es una mezcla de triturados de media pulgada (13 mm) y tres cuartos de pulgada (19 mm). Para comprobar dicha información se realizó una prueba granulométrica, mediante un ensayo de tamizado. La tabla 5 muestra los correspondientes resultados.

**Tabla 5:** Resultados de prueba granulométrica

<b>Nº Tamiz</b>	<b>Tamiz</b>	<b>Peso (Retuvo)</b>	<b>Peso (Pasa)</b>	<b>% Pasa</b>
Pulgadas	milímetros	Kilogramos	Kilogramos	%
1	25	-	10,013	100%
¾	19	2,882	7,131	71%
½	13	4,853	2,278	23%
3/8	10	1,877	0,401	4%
Nº4	5	0,273	0,128	1%
Arena	<5	0,128	-	-

Se puede observar que el humedal tiene en su mayoría lecho de 13 mm de diámetro con un 29%, seguido del lecho de 19 mm con un 49% y por último los otros dos lechos con un 21%.

El diámetro del lecho se encuentra dentro de los criterios de (Delgadillo *et al.*, 2010), que recomiendan utilizar grava con menos de 30 mm de diámetro, para reducir la velocidad del paso de agua, originando una mayor área superficial para la actividad microbiana y la absorción, autores como Larriva *et al.* , (2017) Y (Pérez *et al.*, 2010) utilizaron lechos dentro de este rango (18 - 25 mm) y (5 - 8 mm).

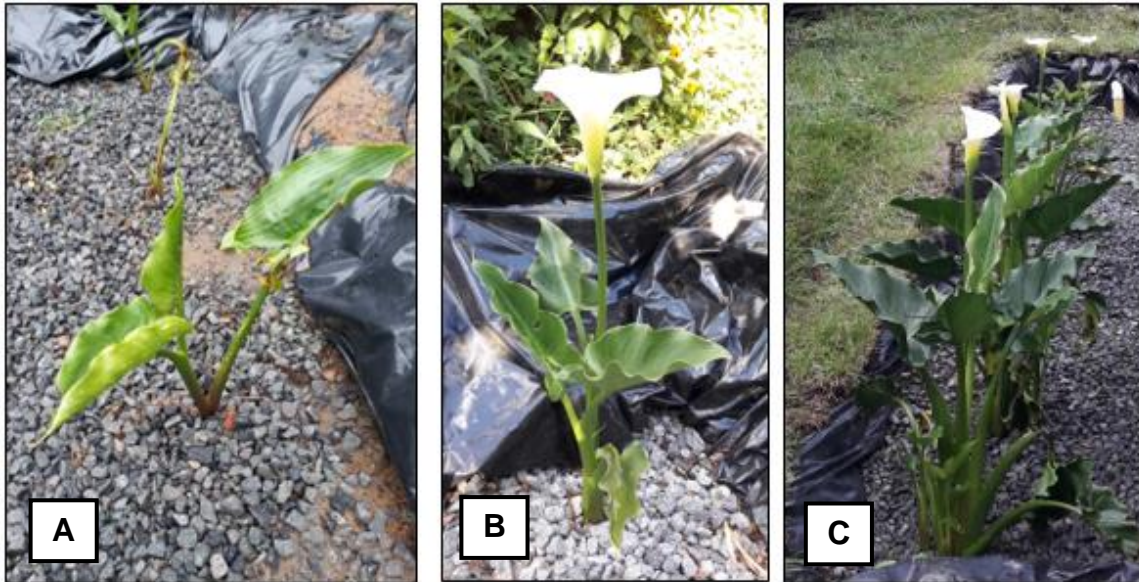
Autores como Vergara, 2015, Burga *et al.*, 2016 y Mena, 2014, recomiendan usar medios estratificados o en su defecto homogenizados. En este aspecto el humedal no se acerca a lo recomendado en la literatura, y su configuración puede acarrear diferencias en el comportamiento hidráulico.

- **Macrófita:** Al iniciar el estudio en el humedal, la comunidad había realizado la excavación, instalación de líneas hidráulicas y depósito del lecho rocoso, además permitió el paso del agua a través del sistema, sin embargo no se había realizado la siembra de la macrófita.

Después de observar el crecimiento de la macrófitas *Zantedeschia aethiopica* (cartucho blanco) en zonas aledañas a las casas donde se disponían las aguas residuales, se tomó la decisión de plantar el humedal con dicha especie vegetal. Las macrófitas trasplantadas fueron extraídas de los sectores aledaños y sembradas con una densidad de cuatro plantas por metro cuadrado, siguiendo las indicaciones de Vidal G. y Hormazábal S., (2018).

El porcentaje de plantas que logró sobrevivir después del trasplante fue del 71%, mostrando que las plantas tienen la posibilidad de adaptarse a medios con limitaciones de oxígeno en el suelo, que no soportarían muchas de las especies de plantas terrestres como lo afirma Fernández G., *et al.*, (2015). Corridos 45 días de sembradas, se encontró que algunas comenzaron a florecer y a tener brotes de hijuelos, lo que muestra una adaptación positiva de la macrófita, aferrándose debidamente al medio rocoso y soportando de buena manera las condiciones de humedad propias del sistema de tratamiento. La figura 7 muestra diferentes etapas de crecimiento y desarrollo de la especie utilizada

**Figura 7:** Crecimiento del cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en el humedal construido.

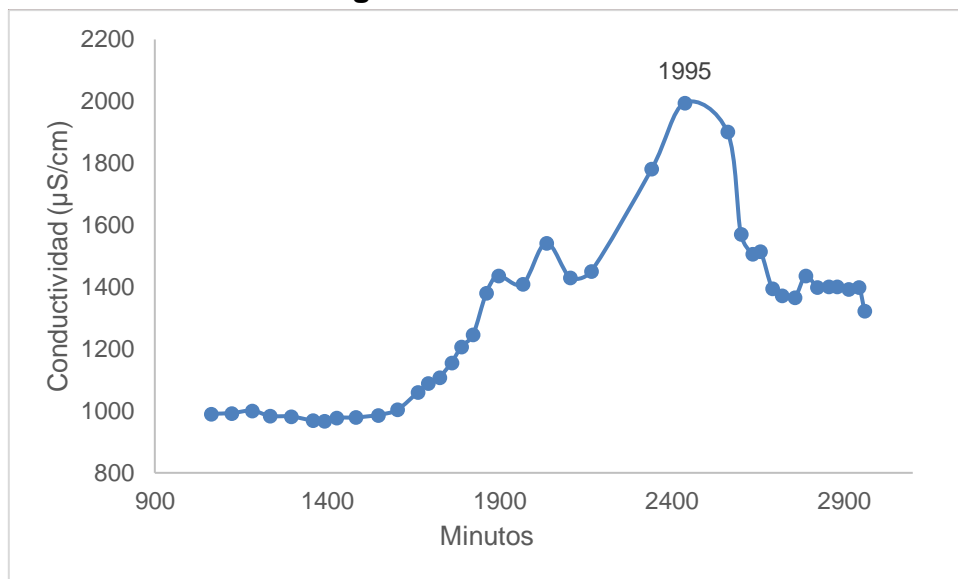


**Donde:** A) planta recién sembrada, B) un mes después de la siembra, C) cuatro meses después.

- **Tiempo de retención hidráulico:** El tiempo de retención hidráulico se encontró mediante la prueba de trazadores. Se puede observar en la figura 8 que el punto más alto de las conductividades fue de  $1995 \mu\text{S}/\text{cm}$  cuando habían pasado 1,663 días equivalente a 40,63 horas, valor aproximado al tiempo de retención hidráulico del humedal. El resultado obtenido se encuentra por encima de lo recomendado por autores como Larriva *et al.* (2017) para un humedal con flujo sub-superficial horizontal el cual se encuentra entre 24 y 36 horas, aunque otros autores como Zurita *et al.*, (2006) y Zurita *et al.*, (2008) encontraron buenos resultados con tiempos de retención hidráulicos de 4 días.



**Figura 8: Curva de trazadores**



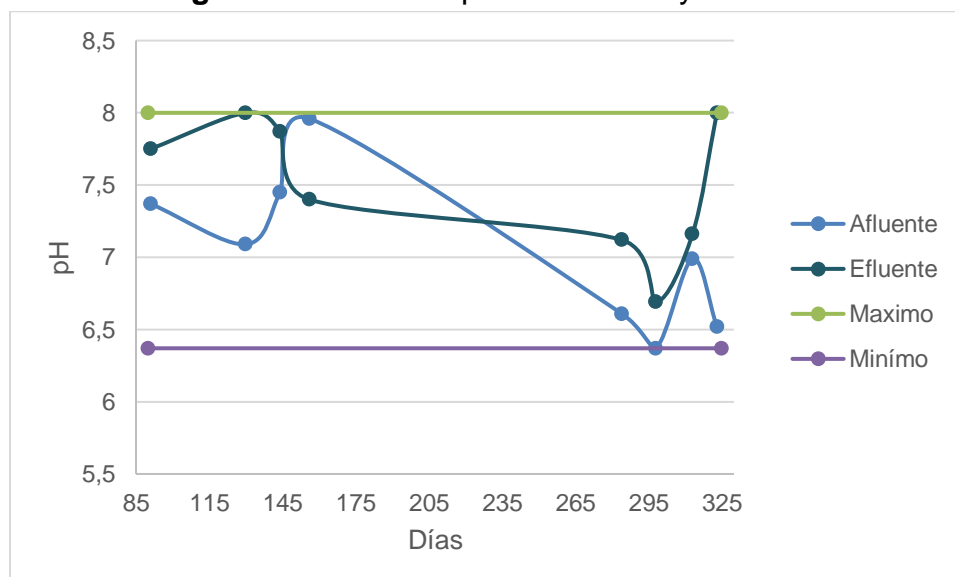
- **Parámetros de control:** Se realizó un monitoreo de parámetros fisicoquímicos en el agua, de modo tal que se pudiera conocer si las condiciones eran adecuadas para el desarrollo de la microbiota y de las plantas de cartucho blanco al interior del sistema de humedal construido. El diagnóstico se realizará evidenciando si los valores arrojados en las diferentes mediciones están dentro de los reportados como adecuados u óptimos en la literatura.
  - **Conductividad:** Se puede observar en la tabla 6 que los valores de la conductividad en afluente fueron mayores a los del efluente, lo que indica que el humedal está eliminando sólidos disueltos, ya que la conductividad eléctrica está relacionada con estos (Arcila, 2010). La disminución en la concentración de los sólidos disueltos generadores de conductividad pueden estar asociados a la captación de los iones por parte de los microorganismos para utilizarlos como bioelementos, de igual manera la macrófitas también puede absorber iones como el potasio, sodio, calcio, nitrógeno, fósforo, entre otros. Cabe indicar que en los procesos de degradación de la materia orgánica se generan los iones productores de conductividad, pero al ser menor su concentración en el efluente se podría discernir que la absorción de estos iones dentro del sistema supera su producción.

**Tabla 6:** Resumen estadístico de la Conductividad (Afluente- Efluente)

Estación	Promedio ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	SD ( $\pm$ )	Valor Max.	Valor Min.
Afluente	1210,63	256,19	1625	835
Efluente	921,38	258,92	1434	569

- **pH y Temperatura:** La figura 9 muestra los valores de pH encontrados para el afluente y el efluente, así como los valores máximos y mínimos reportados por Viana C. (2015) para la supervivencia de la macrófitas. Se evidencia que en la totalidad de las mediciones los valores de pH están dentro del rango considerado como óptimo para el desarrollo de los microorganismos y el crecimiento de las plantas. Los valores encontrados de pH eran los esperados en estos sistemas, puesto que las plantas por actividad fotosintética generan un equilibrio buffer y no permiten que el pH normalmente baje y la actividad de los microorganismos se vea afectada. El uso de plantas ofrece condiciones climáticas óptimas para la remoción de materia orgánica (Montoya *et al.* 2010).

**Figura 9.** Gráfica de pH en afluente y efluente



El valor promedio de pH para el efluente fue de 7,48 como se muestra en la tabla 7, valor que está dentro del rango permitido por la resolución 631 de 2015 (6 a 9) y por esto no representaría riesgo para ser vertido a la fuente hídrica.

**Tabla 7:** Resumen estadístico del pH y Temperatura (Afluente- Efluente)

Variable		Promedio	SD ( $\pm$ )	Valor Max.	Valor Min.
<b>pH</b>	Afluente	7,14	0,58	7,96	6,37
	Efluente	7,48	0,45	8	6,69
<b>Temperatura (°C)</b>	Afluente	17,2	0,50	18	16,4
	Efluente	15,12	0,44	16	14,4

La incidencia de la temperatura sobre la degradación de la materia orgánica está asociada a la facilidad con la que se puedan llevar a cabo los procesos de oxidación, tanto químicos como microbiológicos. En el caso de los microbiológicos, dependiendo del microorganismo que constituya la biopelícula, la temperatura será favorable o nociva, sin embargo en este caso no se puede establecer como incide la temperatura dado a que se desconoce las especies que forman dichas biopelículas. Sin embargo, la temperatura si generará impacto sobre la población de Coliformes fecales y totales como se indicará más adelante en este documento.

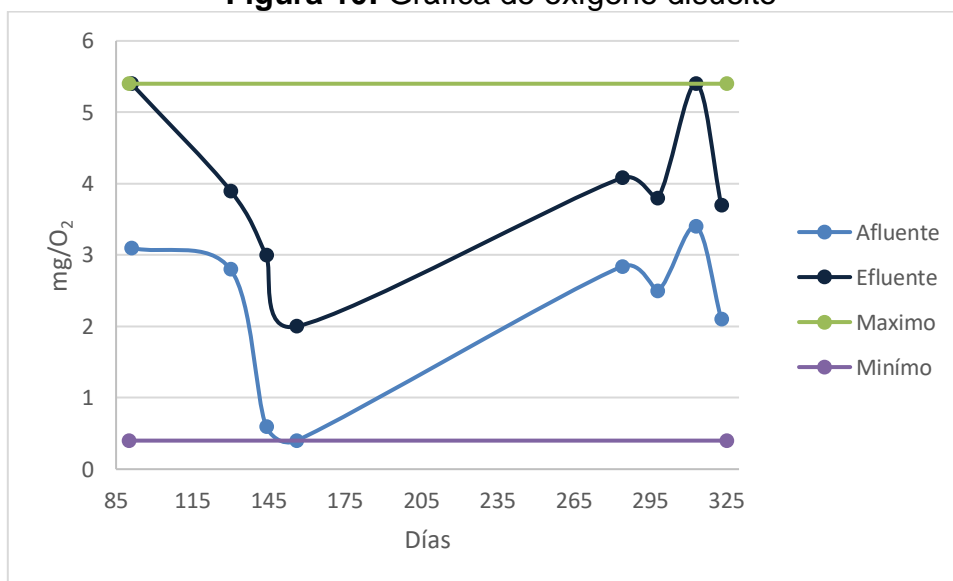
- **Oxígeno Disuelto:** Altos contenidos de materia orgánica impiden la solubilidad del oxígeno en el agua (Arcila, 2010), como se muestra en la tabla 8 los promedios de oxígeno disuelto del sistema son más altos para el efluente que para el afluente, esto indica que el sistema de tratamiento retira contenidos de material orgánico facilitando la absorción del gas en el agua. Cabe resaltar que el oxígeno del efluente no ha alcanzado sus valores máximos ya que al interior del humedal construido prevalecen las condiciones anóxicas dada la dificultad para el intercambio del gas en las zonas más profundas.

**Tabla 8:** Resumen estadístico del Oxígeno Disuelto (Afluente- Efluente)

Estación	Promedio (mg/L)	SD ( $\pm$ )	Valor Max.	Valor Min.
Afluente	2,22	1,08	3,4	0,4
Efluente	3,91	1,06	5,2	2

El aporte que hacen las plantas al humedal es de gran importancia, y se puede evidenciar en la figura 10, donde se observa que el oxígeno disuelto en los muestreos (5, 6, 7 y 8) donde estaban presentes las macrófitas, mejoraron respecto a los muestreos iniciales en los cuales no se encontraba el material vegetal. Esto se debe a que las macrófitas presentan una adaptación que les permite realizar un intercambio gaseoso desde las hojas hacia la zona radicular, la cual se encuentra en contacto con el agua residual; por medio de este proceso, la planta envía oxígeno a sus raíces creando un microambiente a su alrededor que estimula el desarrollo de microorganismos aerobios responsables de la degradación de la materia orgánica (Fernández G., *et al.*, 2015).

**Figura 10:** Gráfica de oxígeno disuelto



- **Cuantificación de Coliformes totales y Coliformes fecales:** La remoción de este tipo de microorganismos se hace relevante en la medida que las comunidades aguas abajo hacen uso del agua sin

mayor tratamiento. El agua que ingresa al humedal construido, posee una carga microbiana que alcanza los 6,0 E+05 NMP/mL de Coliformes totales y 1,2 E+05 NMP/mL de Coliformes fecales (tabla 9), valores que son significativamente altos, y si el agua residual se dispusiera directamente a la fuente hídrica receptora generaría problemas sanitarios en las comunidades aledañas.

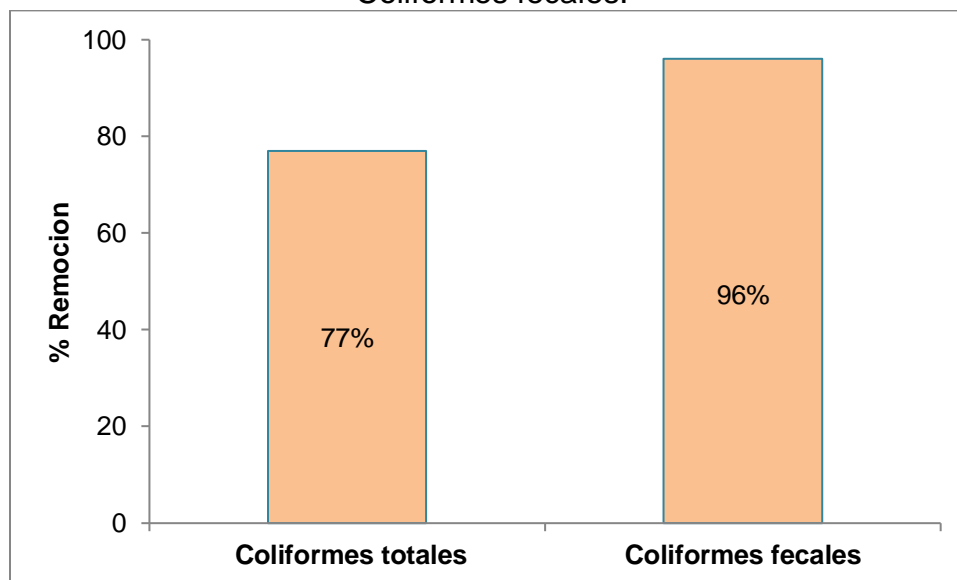
**Tabla 9:** Resumen estadístico de Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF) (Afluente- Efluente)

Variable	Estación	Promedio	SD ( $\pm$ )	Valor Max.	Valor Min.
<b>CT</b> (NMP/ mL)	Afluente	6,0 E+05	918851,96	1,3 E+06	1,0 E+05
	Efluente	1,01 E+04	21275,67	4,4 E+04	2,5 E+02
<b>CF</b> (NMP/ mL)	Afluente	1,2 E+05	51433,76	4,4E+05	3,6E+03
	Efluente	2,65 E+03	5935,46	1,1 E+04	1,0 E+01

En la figura 11 se observa que existe una remoción en los Coliformes totales de 96%, al comparar estos resultados con los reportados por Fonseca *et al.* (2015) (63,98%) de un humedal con el mismo tipo de vegetación, se puede decir que la remoción es muy alta, aunque se acerca por debajo a los reportados por zurita (2006) (99.96%) en humedales HSS plantados con *Zantedeschia aethiopica*. Respecto a los Coliformes fecales (77%) el porcentaje de remoción es más bajo que los indicados por zurita (2006).

La eficiencia del humedal con respecto a Coliformes totales (96%) es cercano al valor que reportan García *et al.* (2013) en los humedales horizontales de flujo subsuperficial en zonas tropicales, los cuales tienen eficiencias hasta de un 99 %. Esto demuestra que el humedal tiene una buena remoción tratándose de que la zona es clasificada como húmeda fría.

**Figura 11:** Diagrama de porcentajes de remoción de Coliformes totales y Coliformes fecales.



La remoción en unidades logarítmicas, para Coliformes totales, fue de 2.3 Log NMP/mL y 1.5 Log número más probable (NMP) /mL para coliformes fecales, estas remociones tuvieron similitud con las obtenidas por Leiva *et al.*, (2018) donde se utilizaron macrófitas *Zantedeschia aethiopica* como alternativa para la remoción de materia orgánica y microorganismos en sistemas de tratamiento con humedales construidos y removi6 en 1.8 Log número más probable (NMP)/mL los microorganismos.

**7.1.3 Modificaciones en el sistema.** A lo largo del estudio se realizaron algunas modificaciones para que el sistema funcionara de manera más adecuada:

- Cuatro semanas después de la siembra del cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*), se procedió a remover aquellos individuos que no mostraron avance en su crecimiento o murieron, estos fueron reemplazados por plántulas nuevas.
- Se evidenció a lo largo del muestreo el crecimiento de hierbas dentro del humedal, por ello se procedía a retirarlas manualmente después de realizar la toma de muestras.
- En el transcurso del muestreo se observó que en el tanque sedimentador se encontraban objetos como bolsas, palos, papel, etc., creando una capa,

como se observa en la figura 12. Esta situación causaba obstrucciones, y bloqueaba la entrada del agua al humedal, por tanto se procedió a retirar los objetos que la conformaban.

**Figura 12:** Tanque sedimentador colmatado.



**Fuente:** Propia

## **7.2 EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE SST, DBO Y DQO EN EL TIEMPO DE OPERACIÓN DEL HUMEDAL CONSTRUIDO.**

En la presente sección se realizará un seguimiento a las remociones de carga orgánica respecto al tiempo de operación del humedal, empezando por evaluar el comportamiento del sistema cuando solo se le permitía el paso del agua residual y operaba en ausencia de la macrófita (cartucho blanco). El tiempo durante el cual el humedal recibió agua residual para su arranque o adaptación fue de aproximadamente tres meses y a partir de ahí se iniciaron las diferentes mediciones. Posterior a la fase de aclimatación o adaptación el humedal operó durante 2 meses en ausencia de la macrófita y otros tres meses después de su siembra. Tabla 10 muestra las fases del ensayo. Con base a estas fases del proceso se llevará a cabo la discusión en la presente sección.

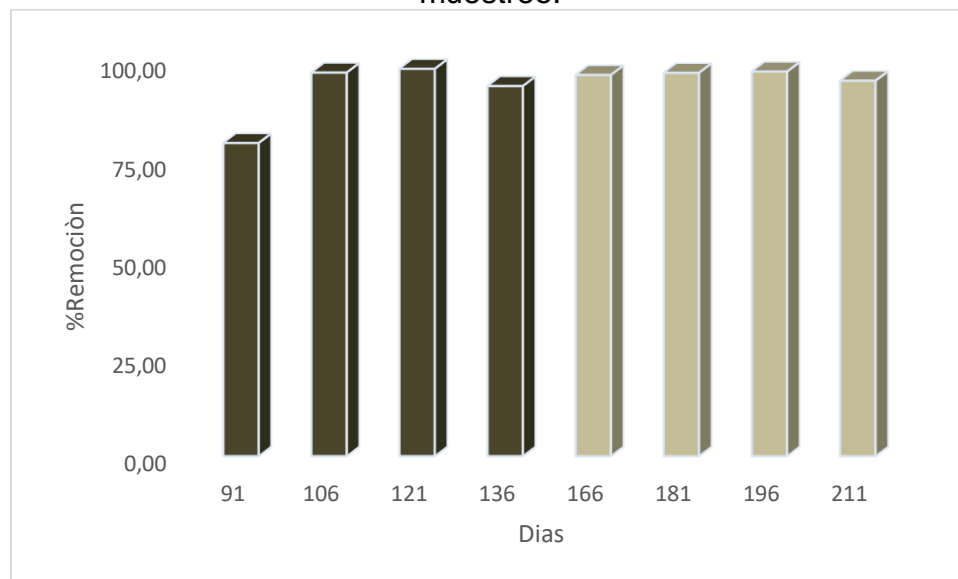
**Tabla 10. Etapas del estudio**  
**ETAPAS DE EVALUACIÓN**

<b>Aclimatación Sin mediciones</b>	<b>Mediciones Sin plantas (SP)</b>	<b>Adaptación de plantas Sin mediciones</b>	<b>Mediciones Con plantas(CP)</b>
Del día 0 a 90	Del día 90 al 150 M1, M2, M3 y M4	Del día 150 al 180	Del día 180 al 240 M5, M6 ,M7 y M8

**Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST).** 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. 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.

Respecto a los SST se encuentra que el porcentaje de remoción alcanza valores cercanos al 95% (figura 13), lo que muestra que el sistema es eficiente en la retención de este tipo de material particulado, independientemente de que el lecho filtrante no se encuentra distribuido de forma homogénea como se recomienda por (Vergara, 2015); (Burga at al, 2016) y (Mena, 2014).

**Figura 13.** Porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Totales en cada muestreo.





La tabla 11 muestra los valores de SST para las diferentes fases del estudio, donde se puede observar que las concentraciones de los SST varían entre muestreos, esto debido a que la población que ocupa el hostel es intermitente, lo que genera grandes cambios en las concentraciones, sin embargo se puede notar que el sistema conserva, en la mayoría de los casos, porcentajes de remoción por encima del 90%. Lo anterior muestra que el sistema presenta robustez en la retención de los sólidos en suspensión, indicando que posee capacidad de amortiguamiento de los posible picos de sólidos generados por la población que ocupa el hostel. Esto es especialmente importante ya que al no existir el sistema de tratamiento se generarían descargas de SST de alta concentración, lo que repercutiría negativamente en la biota acuática y en el uso aguas abajo de las fuentes receptoras de estos vertimientos.

**Tabla 11:** Resultados de pruebas de Sólidos Suspendidos Totales

<b>Etapas</b>	<b>Muestreo</b>	<b>Afluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Efluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Remoción (%)</b>
<b>Sin plantas (SP)</b>	M1	135,56	28	79,3
	M2	728,57	20	97,3
	M3	586,67	10,5	98,2
	M4	154,00	9,5	93,8
	<b>Promedio</b>	401,20	17,00	92,16
	<b>SD (±)</b>	301,80	8,73	5,84
<b>Con plantas (CP)</b>	M5	215,00	7,2	96,6
	M6	309,09	8,67	97,2
	M7	348,00	8,7	97,5
	M8	200,00	9,6	95,2
	<b>Promedio</b>	268,02	8,53	96,64
	<b>SD (±)</b>	71,3	0,99	1,02

- **Incidencia del tiempo de operación en la remoción de SST:** Para examinar los avances en la maduración del humedal respecto al tiempo se propuso realizar una comparación entre los porcentajes de remoción respecto a las etapas de evaluación del sistema. El análisis se realiza en dos etapas, en la primera se asume que el lecho filtrante no ha desarrollado grandes cantidades de biopelículas alrededor de las gravas, mientras que en la segunda etapa se asume que la biopelícula se ha formado y también está el favorecimiento de la presencia del cartucho blanco.

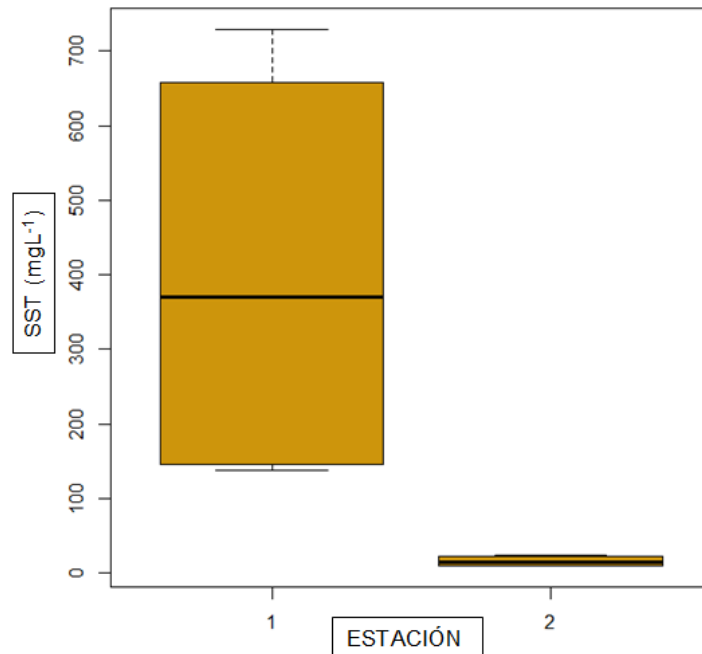
En la tabla 11 se observa que el sistema tiene una gran capacidad de remover SST con una eficiencia promedio mayor a 90% aun sin la cobertura vegetal, tal situación se da por la capacidad que tiene el lecho filtrante de fijar los sólidos suspendidos en su área superficial (Lara, 2009). Aunque las eficiencias eran altas cuando el sistema no tenía la siembra de las plantas, estas juegan un papel importante en el proceso, ya que sus raíces logran ejercer funciones de desbaste reteniendo los sólidos gruesos que transportan las aguas residuales (Fernández G. J. *et al.*, 2015) y también sirven como sostén de los microorganismos que se encuentran adheridos a ellas, y que toman los SST como fuente de alimento ayudando a su degradación (Suárez *et al.*, 2014), por esta razón es posible que cuando se plantaron los cartuchos blancos la eficiencia en el humedal aumentaron hasta un 96,16 %.

Las eficiencias que se obtuvieron en las etapas SP Y CP del estudio son las esperadas, ya que estos valores se encuentran dentro de los valores reportados por autores como Vymazal (2002), Bedoya (2014), Peña-Salamanca *et al.* (2013) y Zurita *et al.* (2006), que reportan valores desde 70% hasta los 95% en humedales subsuperficiales de flujo horizontal, es importante resaltar que el humedal no se encuentra en maduración, lo que significa que puede llegar a alcanzar eficiencias hasta del 100% como lo reportan los autores Zurita *et al.* (2008).

El humedal en las dos etapas de medición del experimento logro remover gran parte de SST con eficiencias de 92% sin plantas y 96% con ellas, gracias a esto en el afluente se encontraron valores promedios de 17,00 mg L<sup>-1</sup> y 8,53 mg L<sup>-1</sup> en el efluente, los cuales son valores que se encuentran dentro de lo establecido por la Resolución 631 de 2015, en donde dice que la cantidad máxima permitida para un vertimiento a aguas superficiales es de 90 mg L<sup>-1</sup>.

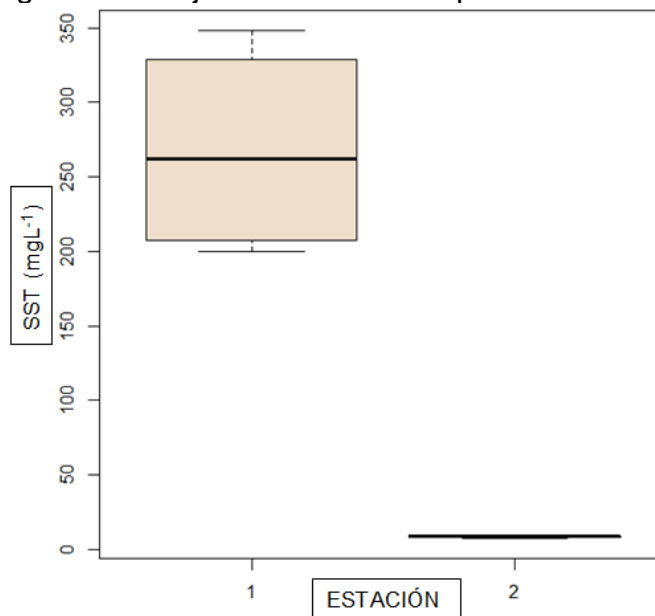
La diferencia entre los valores de SST encontrados en el afluente y efluente de ambas etapas son significativas, esto se evidencia gracias a la prueba no paramétrica del test de Kolmogorov-Smirnov realizada en el software estadístico Rwizard. Este test arroja un p-valor = 0.02857 con una significancia (p<0,05) en las dos etapas del experimento (figuras 14-15).

**Figura 14.** Diagrama de cajas de Sólidos Suspendidos Totales sin plantas.



**Donde:** 1. Afluente del humedal, 2. Efluente del humedal.

**Figura 15.** Diagrama de cajas de Sólidos Suspendidos Totales con plantas.



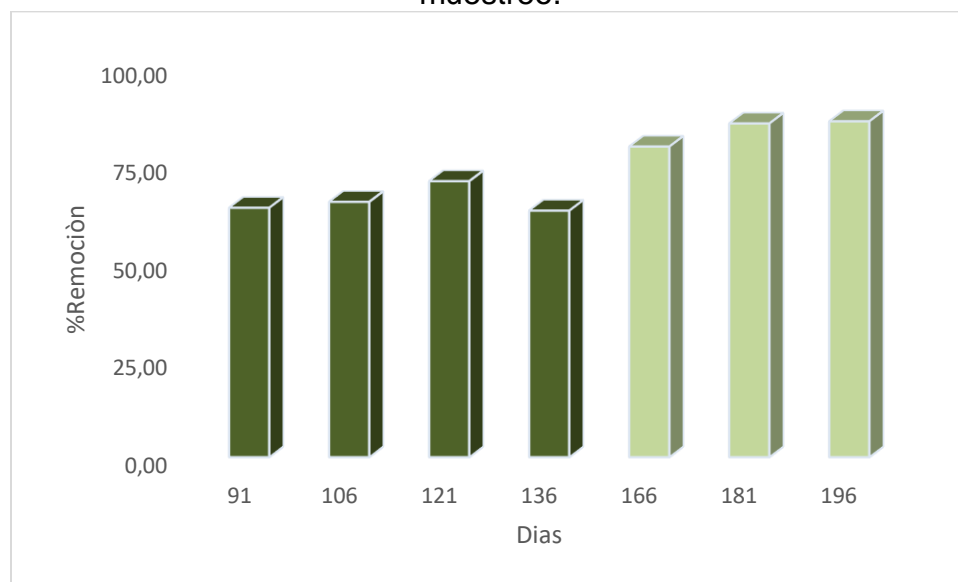
**Donde:** 1. Afluente del humedal, 2. Efluente del humedal.

**7.2.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO).** La disminución de los sólidos suspendidos indica que la materia orgánica está siendo retenida al interior del humedal, sin embargo esto no indica necesariamente que haya sufrido una

degradación a materiales que afecten en menor medida la fuente receptora del efluente tratado. Cuando los sólidos son retenidos, estos pueden pasar de la fracción sólida a la disuelta y este material disuelto abandonar el humedal generando afectaciones al ambiente. Para evidenciar si esto ocurre, se puede revisar el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), ya que permite evidenciar si la cantidad de carga contaminante degradable químicamente que ingresa al humedal construido es menor que la que sale en el efluente.

La figura 16, muestra los porcentajes de remoción de DQO en el humedal construido, se observa que al inicio, entre las mediciones 1 y 4, hay una remoción que está entre el 60 y el 80 % y que su valor se incrementa casi al 90 % en los siguientes muestreos. Lo anterior indica que desde el inicio se dan las transformaciones de la materia orgánica, y como en ese momento no se habían sembrado las plantas, se debe atribuir la degradación a los procesos de oxidación de forma química o a procesos microbiológicos asociados a la poca capa de microorganismos que se pudieran formar en los tres meses de arranque que operó el sistema sin que se le realizara mediciones.

**Figura 16.** Porcentajes de remoción de Demanda Química de Oxígeno en cada muestreo.



Como se había mencionado anteriormente la población intermitente que ocupa el hostel provoca que también hayan variaciones en la materia orgánica al igual que en los SST, lo que se puede evidenciar en la tabla 12, en donde los cambios de la

DQO en el afluente son bastante pronunciados, como por ejemplo en el muestreo 6, donde el resultado la carga orgánica fue de 539,88 Kg/d siendo el valor más alto reportado, el cual fue tomado a finales de enero del 2019, época en la que se presenta mayor número de visitantes en el año.

**Tabla 12:** Resultados de pruebas de la Demanda Química de Oxígeno

	<b>Muestreo</b>	<b>Afluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Efluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Remoción (%)</b>
<b>Sin plantas (SP)</b>	M1	587	213	63,64
	M2	880	307	65,15
	M3	880	260	70,45
	M4	661	245	62,90
	<b>Promedio</b>	752,00	256,33	65,54
	<b>SD (±)</b>	150,91	38,80	3,41
<b>Con plantas (CP)</b>	M5	309	64	79,31
	M6	1355	200	85,24
	M7	373	53	85,80
	<b>Promedio</b>	679,11	105,67	83,45
	<b>SD (±)</b>	585,92	81,88	3,60

- **Incidencia del tiempo de operación en la remoción de DQO:** Para examinar los avances en la maduración del humedal se realizó el procedimiento planteado en los SST, realizando las respectivas comparaciones de remociones en cada etapa de evaluación.

En la tabla 12 se observa que el humedal construido en la etapa de muestreo inicial (sin plantas) logra degradar las diferentes cargas contaminantes de DQO que ingresan al sistema con un porcentaje de remoción de 65,54 %, lo que indica que los microorganismos que se encuentran adheridos al lecho filtrante logran remover gran parte de materia orgánica.

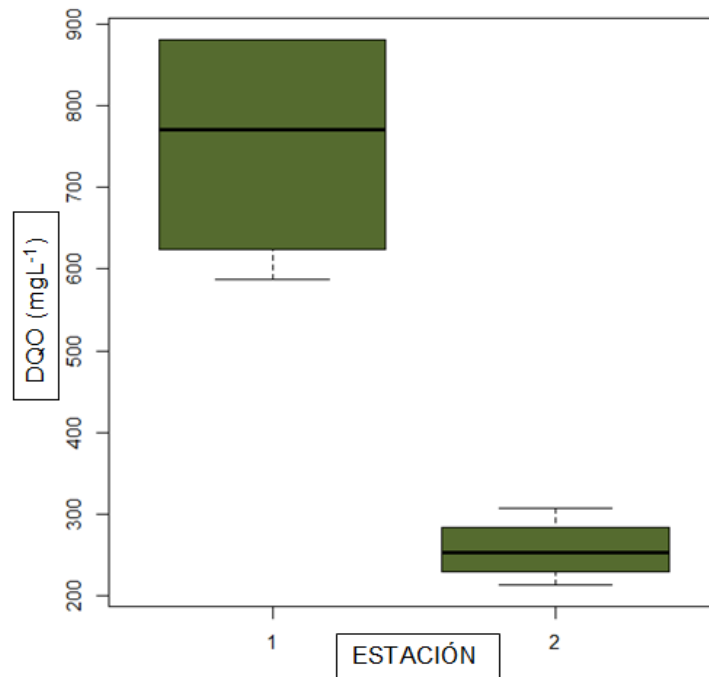
En los muestreos finales (con plantas) el sistema mejoró su eficiencia y se puede atribuir a que las macrófitas tienen la capacidad de tomar oxígeno de la atmósfera y llevarlo hasta sus raíces, estimulando el desarrollo de

microorganismos aerobios que degradan fácilmente la materia orgánica (Fernández G., *et al.*, 2015), esto se puede evidenciar en los porcentajes de remoción, pasando de un 65,54 % a un 83,45%. Este porcentaje de remoción se encuentra por encima de los rangos reportados por Zurita *et al* (2008) (73 - 78%), y dentro de los que indican Zurita *et al.* (2006) (83 – 85%), a experimentos realizados en humedales HSS plantados con *Zantedeschia aethiopica*.

Es importante mencionar que cuando el humedal operaba en ausencia de la macrófita, la concentración de DQO en el efluente era de 256,33 mg L<sup>-1</sup>, la cual no cumplía lo establecido por la Resolución 631 de 2015 (marzo 17), capítulo V, en donde menciona que la cantidad para un vertimiento en aguas superficiales no debe ser máxima a los 180 mg L<sup>-1</sup>. Después de realizar la siembra del cartucho, el humedal logró mejorar su eficiencia hasta un 10%, con una carga contaminante promedio de 159,25 mg L<sup>-1</sup> la cual se encuentra dentro del parámetro máximo que establece la Resolución 631 de 2015.

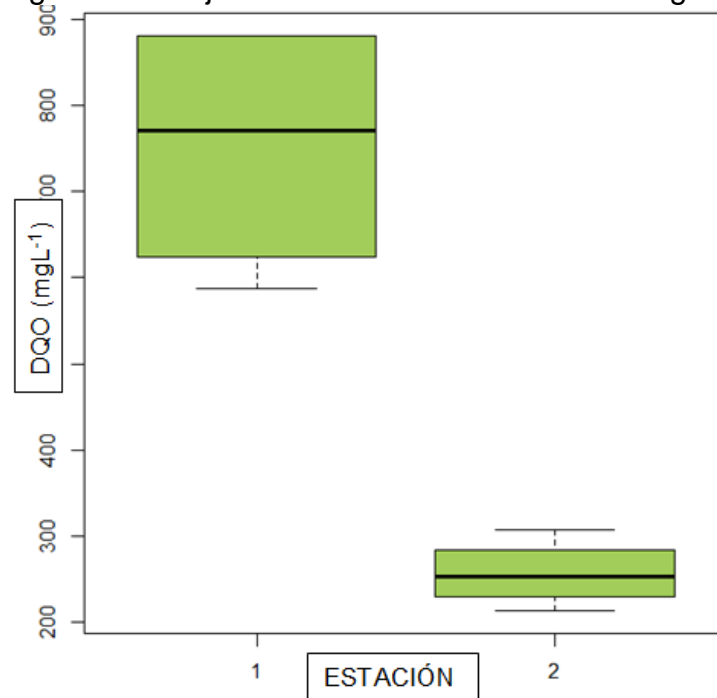
Los resultados de la DQO encontrados en los efluentes se compararon en el software estadístico Rwizard por medio de una prueba no paramétrica por medio del test de Kolmogorov-Smirnov en el que se obtuvo un p-valor = 0.03663 en ambos casos, este valor al ser menor a 0,05 indica que los resultados tiene una diferencia significativa (figura 17-18).

**Figura 17.** Diagrama de cajas de Demanda Química de Oxígeno, sin plantas.



**Donde:** 1. Afluyente del humedal, 2. Efluente del humedal.

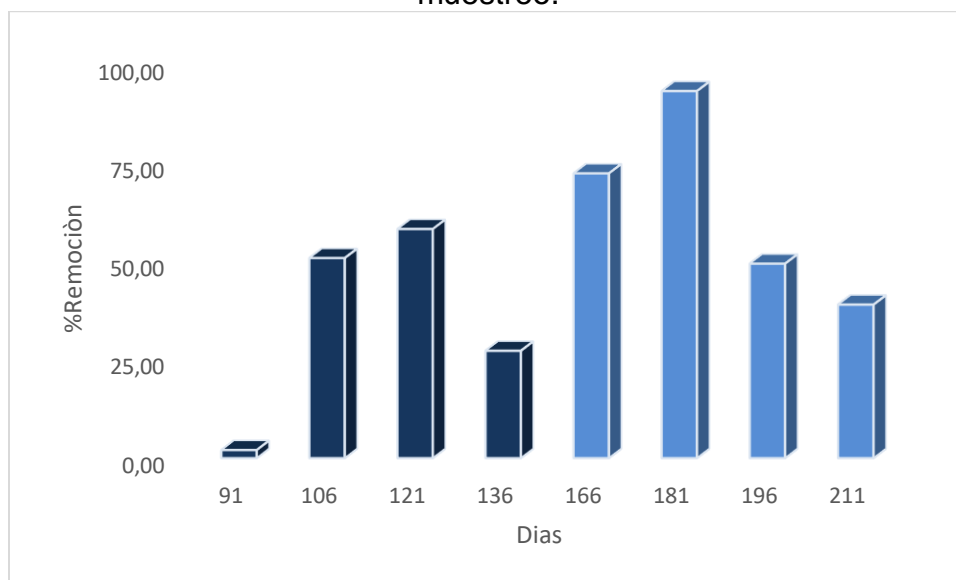
**Figura 18.** Diagrama de cajas de Demanda Química de Oxígeno, con plantas.



**Donde:** 1. Afluyente del humedal, 2. Efluente del humedal.

**7.2.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** La degradación de la materia orgánica en los humedales construidos es compleja, resultado de la interacción de numerosos procesos físicos, químicos y bióticos que suceden de forma simultánea (García y Corzo, 2008). En la  $DBO_5$  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). Uno de los factores de alta relevancia en la degradación bioquímica del material orgánico es la formación adecuada de las biopelículas sobre las rocas del lecho filtrante, ya que regularmente los microorganismos colonizadores son heterótrofos por lo que son consumidores de la materia orgánica que ingresa al sistema. Para que estos microorganismos se desarrollen en buena condición y cantidad, es necesario que estén dotados de suficientes cantidades de materia orgánica. Por esta razón se puede explicar las variaciones de las eficiencias que se observan en la Figura 19. La inestabilidad en las eficiencias se le puede atribuir a las constantes variaciones que hay en el ingreso de materia orgánica al sistema de tratamiento, ya que estas dependen de la ocupación del hostal.

**Figura 19.** Porcentajes de remoción de Demanda Biológica de Oxígeno en cada muestreo.



En la tabla 13 se pueden observar las cantidades de materia orgánica en afluente y efluente del humedal construido, en donde se puede evidenciar que el sistema tiene la capacidad de remover parte de la carga contaminante que ingresa,



manteniendo sus remociones por encima del 35%, a excepción del muestreo M1 que solo se obtuvo un valor del 2%. El sistema presenta una mejor degradación cuando los valores de materia orgánica son más altos (mayor a 300 mg L<sup>-1</sup>), esto se puede ver en los muestreos M3, M5 Y M8 en donde se encontraron las mayores cantidades de materia orgánica y las remociones de DBO más altas, teniendo eficiencias de 58, 72,1 y 93,1%.

Si bien los valores de DBO pueden llegar a ser altos en determinadas condiciones de operación del sistema, se podría indicar que el ingreso intermitente de materia orgánica no ha permitido la formación de una población microbiana estable que permita una degradación con mayor regularidad. Asimismo, se debe considerar que el sistema lleva un tiempo de operación corto, razón por la cual la biota acuática aún puede estar en adaptación y con el tiempo se puedan generar cambios menos bruscos en los valores de la DBO.

**Tabla 13:** Resultados de pruebas de la Demanda Biológica de Oxígeno

<b>Etapa</b>	<b>Muestreo</b>	<b>Afluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Efluente (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Remoción (%)</b>
<b>Sin plantas (SP)</b>	M1	91,14	89,3	2,0
	M2	210,8	104,16	50,6
	M3	756,4	317,85	58,0
	M4	194,10	141,57	27,1
<b>Promedio</b>		313,10	163,22	34,41
<b>SD (±)</b>		300,23	105,41	25,30
<b>Con plantas (CP)</b>	M5	367,0	102,3	72,1
	M6	849,4	58,9	93,1
	M7	295,12	150,04	49,2
	M8	233,12	142,81	38,7
<b>Promedio</b>		436,17	113,51	63,27
<b>SD (±)</b>		280,87	42,03	24,27

**Incidencia del tiempo de operación en la remoción de DBO:** Para examinar los avances en la maduración del humedal se realizó el procedimiento planteado en los SST y DQO, realizando las respectivas comparaciones de remociones en cada etapa de evaluación.

Cuando el humedal construido no tenía las plantas sembradas logró ser un buen amortiguador de DBO, ya que el sistema removió cargas orgánicas de hasta 313,10 mg L<sup>-1</sup> llevándolas a 163,22 mg L<sup>-1</sup> con una eficiencia del 34,41 %, la cual se mejora con la plantación del cartucho blanco, debido a que logra subir hasta 63,27 %. La mejora de la remoción en el humedal, posterior a la plantación del cartucho blanco, puede estar relacionada a que la eliminación de la materia orgánica es realizada por los microorganismos que se asocian al sistema radicular de las plantas (Arcila, 2010), así como por la biopelículas generada en el lecho filtrante.

El promedio de la eficiencia con el humedal plantado que fue de 63,27 %, se puede considerar como bajo respecto a las investigaciones de Vymazal (2002) que reportó eficiencias de DBO hasta de un 88%, Luna-Pabello *et al.*, (2014) eficiencias de 80%, Bedoya (2014) de 82,9 % y 83,2 % y Salamanca *et al.*,(2013) encontraron remociones de DBO por encima del 70%.

Zurita *et al.* (2006) y Zurita *et al.* (2008) obtuvieron eficiencias de DBO entre 77-81% y 76-86 % en humedales de igual tipo y con la misma especie de planta, estas remociones son más elevadas que la mayoría de las obtenidas, solo la eficiencia de dos muestreos (M5 y M6) logran estar a nivel de los valores encontrados por los autores anteriormente señalados. Es importante tener en cuenta que los muestreos de las investigaciones perduraron mayor periodo, con un tiempo de aclimatación de las plantas hasta de 7 meses, que hace que el sistema tenga tiempo para estabilizarse y tener mejores resultados.

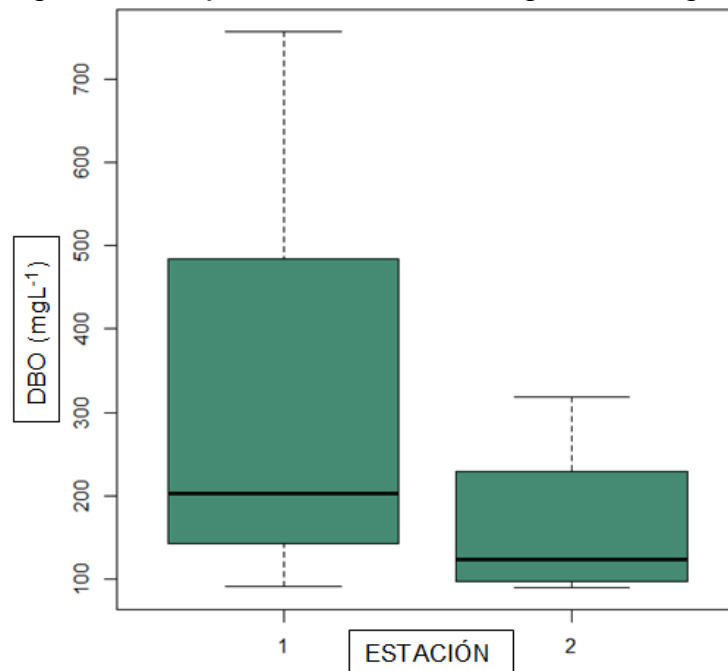
Las eficiencias de humedal construido pudieron haber sido afectadas por el clima del lugar, ya que Wang *et al.* (2017) menciona que los humedales HSS en climas fríos (<15°C) tienen un promedio de remoción para la DBO de 85.2%, y el lugar en donde se encuentra este humedal tiene variaciones de temperaturas entre los 9°C y 19°C.

El humedal construido en sus dos etapas logró remover cantidades de materia orgánica en términos de DBO que no logran alcanzar lo establecido por la Resolución 631 de 2015, capítulo V, en donde menciona que la cantidad para un vertimiento en aguas superficiales no debe superar los 90 mg L<sup>-1</sup>, ya que los valores estuvieron por debajo (SP=163,22; CP=113,51 mg L<sup>-1</sup>). Lo anterior sugiere que se debe realizar seguimiento a la

maduración del sistema para evidenciar si en las condiciones de operación actual es posible alcanzar los valores establecidos en la norma. Se espera que con el tiempo, al desarrollarse completamente la microbiota del lecho filtrante y al crecer la macrófita, puedan mejorar la remoción de la DBO y cumplir con lo establecido en la norma, disminuyendo las afectaciones del vertimiento en las aguas rurales y su afectación ecológica y a las comunidades que hacen uso del recurso.

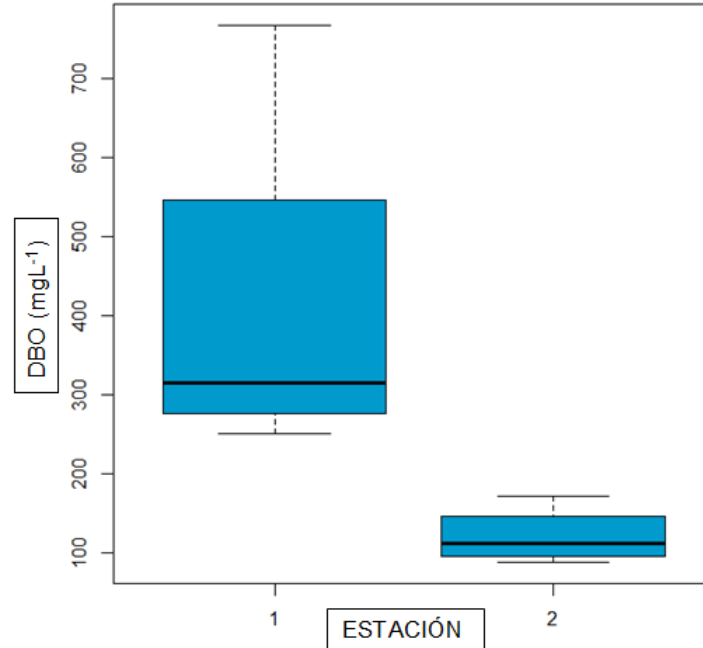
Los resultados de la DBO se corrieron en el software estadístico Rwizard para comparar afluentes vs efluentes y conocer su significancia. Para esto se realizó un análisis no paramétrico por test de Kolmogorov-Smirnov, este test arrojó un resultado de  $p\text{-valor} = 0.7714$  para la etapa en la que el sistema no poseía cobertura vegetal, este  $p\text{-valor}$  al ser mayor que 0,05 indica que la diferencia entre el afluente y efluente no es significativa. Para la prueba estadística del humedal con material vegetal el test arrojó un  $p\text{-valor} = 0.02857$  lo que indica que las diferencias son significativas (figura 20 - 21)

**Figura 20.** Diagrama de cajas de Demanda Biológica de Oxígeno sin plantas.



**Donde:** 1. Afluente del humedal, 2. Efluente del humedal.

**Figura 21.** Diagrama de cajas de Demanda Biológica de Oxígeno sin plantas.



**Donde:** 1. Afluente del humedal, 2. Efluente del humedal.

Al evaluar las recomendaciones de la  $dq_0$  y de la  $dbo_5$  se encuentra que esta remueve

Las remociones promedio observadas para DQO y  $DBO_5$  del estudio, se pueden comparar con los resultados obtenidos por autores como Díaz y Romero, (2013) para un humedal con flujo sub-superficial horizontal plantado con *Zantedeschia aethiopica*, el cual presentó remociones para DQO del 70 % y  $DBO_5$  de 52%, y Lara, (1997), con un humedal de flujo subsuperficial, como un sistema de tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada previamente en un reactor anaerobio UASB, obteniendo eficiencias promedio en la remoción de DQO de 51,7 % y  $DBO_5$  de 45,1 %.

Al observar las eficiencias de la DQO y  $DBO_5$  se encuentra una remoción en mayor proporción para la demanda química de Oxígeno, como se muestra en la figura 19. Lo anterior se le podría atribuir a la degradación preliminar que sufre la materia orgánica al interior del sedimentador, debido a que los tratamientos primarios permiten remover entre 25% y 40% de la  $DBO_5$  (Palomino 2016). El TRH del sedimentador es de 2,5 días, tiempo suficiente para que se realicen procesos de transformación de la materia orgánica fácilmente biodegradable, dejando material de menor biodegradabilidad para ser depurado en el humedal construido, lo que presuntamente disminuiría la remoción de la  $DBO_5$  en el humedal. Además, la depuración de aguas residuales en los sistemas de humedales construidos se

presenta en lo fundamental por procesos de filtración asociados con las raíces de las plantas y medio granular (Montoya *et al.* 2010), por lo que se puede decir que el lecho filtrante está reteniendo más fácilmente la DQO por fenómenos de adherencia en el triturado, absorción y adsorción, que permite que las eficiencias sean más altas que las de la DBO<sub>5</sub>.

- **Biodegradabilidad de la materia orgánica.** En las aguas residuales se puede encontrar materia orgánica disuelta, suspendida o coloidal, de las cuales una fracción importante es biodegradable. Esta propiedad permite que las aguas puedan ser depuradas por los microorganismos, y regenerar la disponibilidad del recurso agua evitando la contaminación de las fuentes de aguas existentes tanto superficiales como subterráneas.

Existen sustancias que su proceso de biodegradabilidad es más lento, lo que constituye una limitante para los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales. Para estimar el grado de biodegradabilidad se hace una relación entre la DBO y DQO, y dependiendo del resultado del cálculo (tabla 14) se puede saber que tan degradable es la materia orgánica del agua residual analizada.

**Tabla 14:** Relación DBO/DQO

	<0,2	Materia poco degradable
<b>DBO/DQO</b>	0,2-0,4	Materia moderadamente degradable
	>0,4	Materia muy degradable

**Fuente:** (Martínez S., 2010).

Para conocer la biodegradabilidad de la materia orgánica que ingresa al humedal construido se tomaron los valores de materia orgánica en el afluente que se obtuvieron de las pruebas de DBO y DQO y se promediaron, posteriormente se calculó la diferencia de los valores resultantes. En la tabla 15 se pueden observar los resultados obtenidos.

**Tabla 15:** Resultado de relación DBO-DQO

	<b>DBO</b> (mg L <sup>-1</sup> )	<b>DQO</b> (mg L <sup>-1</sup> )	<b>DBO/DQO</b>
<b>Promedio</b>	394,85	720,71	0,55

Se puede observar en la tabla anterior que las aguas residuales que ingresan al humedal construido son materia muy biodegradable, el resultado de la relación fue mayor a 0,4, lo que indica que los microorganismos que se encuentran en el sistema pueden degradar la materia orgánica fácilmente.

### **7.3 ESTRATEGIAS PARA EL ÓPTIMO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE HUMEDAL CONSTRUIDO.**

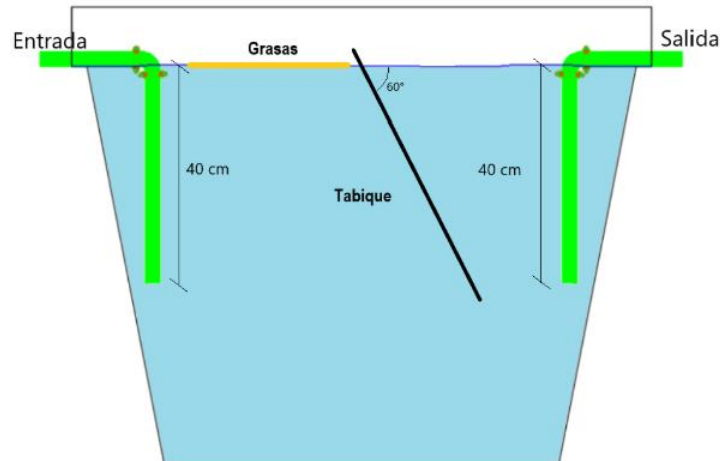
El humedal construido ha logrado remover materia orgánica, la cual mejoró progresivamente después de la siembra de las macrófitas, llegando a eficiencias hasta del 96,64% para SST; 83,45 % de DQO y 63,27 de DBO, además, el sistema tuvo la capacidad de remover microorganismo nocivos para la salud pública con eficiencias de 2.3 Log NMP/mL para Coliformes totales y 1.5 Log NMP/mL para coliformes fecales. A pesar de que el sistema viene removiendo materia orgánica se pueden realizar algunas modificaciones que permitan que funcione mejor, por esta razón se han planteado las siguientes estrategias para un óptimo funcionamiento teniendo en cuenta el diagnóstico realizado.

**7.3.1 Estrategias para mejoras del tanque sedimentador.** Esta unidad es un componente importante del sistema, ya que retiene los sólidos gruesos, arenas, materiales flotantes y grasas que transporta el agua residual, permitiendo que el humedal construido no se colmate (Fernández G., *et al.*, 2015).

- Como se mencionó anteriormente, en el tanque sedimentador se encontraron objetos flotantes en la superficie del tanque, los cuales impidieron que el agua circulara de forma adecuada hacia el humedal, esta situación puede generar la presencia de malos olores, por esta razón se plantearon las siguientes soluciones:
  - Para evitar la llegada de los sólidos gruesos y materiales flotantes, es pertinente implementar una rejilla o malla antes del tanque, para que retenga estos objetos.
  - Para que las grasas que ingresan al sistema no se dispersen por toda la superficie del tanque, se propone la instalación de un tabique, de tal manera, que queden de un solo lado y sea más fácil su recolección. Esta lámina debe tener aproximadamente 1,36 m de ancho para que entre al tanque a presión, y se debe instalar justo en

medio del tanque, el largo de la lámina debe tener una inclinación de  $60^\circ$  y debe estar a 5 cm por encima de la lámina de agua. La lámina debe instalarse para que queden 5 cm fuera de la superficie, y así podrá retener las grasas y objetos flotantes en un solo lado del tanque, en la figura 22 se muestra un esquema.

**Figura 22.** Esquema de tanque con tabique



**Fuente:** Propia

- Es importante retirar manualmente la capa de objetos extraños y grasas que se forma en la superficie del tanque, por ello debe realizarse una limpieza cada 3 meses, para evitar que estas generen malos olores. después de retiradas las natas del tanque se puede enterrar para que se degraden de forma natural, y para evitar la contaminación por microorganismos patógenos se le agrega cal viva.
- Se sugiere remplazar el codo del tubo de la entrada por una T, para poder realizar una limpieza regular, y así evitar taponamientos en la tubería.
- Dentro del tanque se han encontrado diferentes tipos de objetos que son arrojados, por esta razón es necesario concienciar a los visitantes. Una manera práctica es explicándoles el funcionamiento del todo sistema y mostrándoles sus beneficios.

**7.3.2 Estrategias para mejoras del humedal construido.** El sistema se ha adaptado progresivamente, y ha logrado cumplir con el objetivo de reducir

significativamente la contaminación de las aguas residuales del hostel. A pesar que el sistema está operando correctamente, se pueden mejorar algunas condiciones para una mayor eficiencia en el funcionamiento y obtener mejores resultados. Para lograrlo se plantearon las siguientes mejoras:

- Las macrófitas de cartucho blanco fueron un componente muy importante en el sistema, gracias a que tiene una adaptación para sobrevivir en aguas con escasas de oxígeno. Esta ventaja permite que dentro del humedal se forme un ambiente con microorganismos aerobios, los cuales son los más eficientes removiendo la materia orgánica. Para este humedal se tuvo una densidad de siembra de 4 plantas por metro cuadrado como lo sugieren Vidal G. y Hormazábal S., (2018), pero se ha observado que la robustez de la planta permite que aumente la densidad de siembra de macrófitas por metro cuadrado.
- A pesar de que el sistema logró remover microorganismos, existen virus y protozoos que se dispersan por esporas, estado en el cual son más resistentes y logran pasar todo el tratamiento (Fernández G., *et al.*, 2015). Por esta razón es importante hacer un proceso de desinfección preventivo con hipoclorito de calcio que es generalmente utilizado en sistemas rurales descentralizados como sistema de desinfección para reducir al máximo la cantidad de patógenos. Para este procedimiento es importante realizar un estudio del efluente y conocer las cantidades de hipoclorito de calcio que se deben aplicar, ya que la cantidad que se agregue debe disminuir los microorganismos patógenos, sin presencia de radicales de cloro libre que puedan afectar el ecosistema al que es depositado el vertimiento.
- El efluente del humedal construido sale con una carga contaminante significativamente menor que la del afluente, a pesar de ello, el sistema no logró alcanzar las remociones establecidas por la norma de vertimientos. Se propone para mejorar la calidad del efluente, una siembra de cartucho blanco alrededor de la zona en la cual se realiza la disposición, para que la planta aporte oxígeno al medio y cree un ambiente en el que continúe removiendo materia orgánica.



## 8. CONCLUSIONES

- El humedal construido plantado con cartucho blanco es una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales dispersas. Aún en proceso de aclimatación del sistema de tratamiento alcanza remociones de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST de hasta 63,27%; 83,45% y 96,64% respectivamente.
- Algunos de los parámetros de diseño y condiciones hidráulicas del humedal construido incumplen la normatividad o no se encuentran dentro de las recomendaciones sugeridas en otras investigaciones para un buen funcionamiento, a pesar de esto el humedal logra remover materia orgánica y bacterias coliformes mejorando la calidad del agua en el efluente.
- Durante el periodo de evaluación se evidenció que el cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) logró adaptarse de manera adecuada, mostrando buen desarrollo y crecimiento, e influyendo en el proceso de degradación de materia orgánica, lo que perfila a la planta como una alternativa viable para uso en sistemas de humedales ubicados a alturas por encima de los 2600 m.s.n.m.
- Los resultados encontrados en el estudio muestran que el sistema de humedal construido plantado con cartucho blanco se perfila como una alternativa eficiente en la remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas, como solución individual para zonas rurales dispersas.
- El humedal horizontal de flujo subsuperficial construido por la comunidad rural no cumple en todos sus componentes con lo establecido en la normatividad, pero logra mejorar la calidad de agua vertida a la fuente hídrica receptora, indicando que esta tecnología es viable para esta zona rurales dispersas, no requiere personal calificado para su operación, y que los costos de mantenimiento e implementación son accesibles.
- El humedal construido demostró que tiene la capacidad de degradar la materia orgánica proveniente de las aguas residuales, pero se ve afectado por la falta de homogeneidad en el ingreso de la materia orgánica, especialmente en la DBO<sub>5</sub>, dada la intermitencia de la población que ocupa el hostal.

## 9. RECOMENDACIONES

- Es de gran importancia realizar un seguimiento prolongado al sistema, debido a que la aclimatación de las plantas y maduración del sistema pueden mejorar las condiciones del humedal.
- Complementado con estudios bacteriológicos aceptables, se puede masificar la construcción de estos humedales como alternativa de solución adicional a los sistemas primarios que utilizan las viviendas ubicadas en las micro cuencas que abastecen diferentes acueductos y que carecen de plantas de tratamiento de agua potable, como es el caso del acueducto Aires del Campo, que surte a 2400 usuarios a partir de la micro cuenca donde se realizó la presente investigación.
- Es necesario medir las concentraciones de nitrógenos a la entrada y salida del sistema para lograr conocer sus procesos de remoción en el humedal y analizar la incidencia de la macrófitas. Debido a que la eliminación se debe principalmente a la absorción de la planta y en menor medida a fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias.
- A pesar de no ser muy efectiva la remoción de fósforo en humedales debido a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y el suelo, es importante medir su remoción. Ya que se considera que las macrófitas remueven fósforo para su desarrollo y es importante conocer su comportamiento para que en futuros estudios se puedan diseñar humedales con criterios de remoción.
- Es de gran importancia realizar una caracterización de los microorganismos presentes en el lecho, y conocer su diversidad de población, ya que algunas poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua, pero cuando las condiciones medioambientales no son convenientes para su desarrollo, buena parte de los microorganismos se inactivan disminuyendo las eficiencias del sistema.
- Se recomienda realizar estudios posteriores con otras especies vegetales nativas de la zona, para analizar su eficiencia y comparar las remociones con el cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).

- Se recomienda realizar estudios con mayores tiempos de evaluación y número de réplicas, para establecer patrones en las eficiencias de remoción y generar mayor representatividad de datos.
- Es importante continuar con la concientización a la comunidad acerca de la importancia que tienen los humedales para el correcto tratamiento de las aguas residuales doméstica, ya que estas van directamente a las fuentes hídricas.
- Realizar capacitaciones a la comunidad para la correcta extracción y siembra de las plantas en el humedal, con el fin de continuar con el funcionamiento adecuado del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

Andrade, M., Camacho, A., Delgadillo, O., Pérez, L. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Cochabamba, Bolivia.

Akratos, C., & Tsihrintzis, V. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Vol. 29(2), Pág. 173-191.

Araya, F., Pesante, S., Vera L., Vidal, G. (2014). Las aguas servidas en zonas rurales, Universidad de Concepción, Concepción. *Aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Capítulo 1* (pp. 11-17) Concepción, Chile: Editorial Trama Impresores S.A.

Araya, F., Vera, L., Morales, G., López, D., Vidal G. (2014). Tecnologías de tratamiento para aguas servidas de origen rural. Universidad de Concepción, Concepción. *Aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. capítulo 6* (pp. 60-84) Concepción, Chile. Editorial Trama Impresores S.A.)

APHA, AWWA, WEF. (1992). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 17 th Edition. Washington.

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.

Belmont, M., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A., & Metcalfe, C. D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*, Vol. 23(4/5), Pág. 299-311.

Bocado, J. (2010). Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de Humedales Artificiales. Tesis de postgrado. Universidad de Cádiz. Cádiz, España. Obtenido de Tesis de postgrado. Universidad: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/15878>

Burbano, G., Hoyos, D. y Giraldo C. (2018) Evaluación de la eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales en aguas residuales domésticas

utilizando un sistema de tratamiento con humedal construido en una zona rural del municipio de sotará, cauca. Universidad del Cauca. Popayan, Colombia.

Cárdenas C., Tärre Y., Flores K., Perruolo T. (2013) Eliminación biológica de nitrógeno y fósforo de aguas residuales domésticas. Centro de Investigación del Agua de la Universidad del Zulia. Venezuela.

Castañeda Villanueva, A., & Flores López, H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, (5)

Charris., & Caselles, A. (2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, Vol. 7(6), Pág. 93-103.

Crites, R.; Middlebrooks, J.; Reed, S. (2006), *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca raton: taylor & francis group, pag 537.

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. WCB and McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU. pp. 599/609.

Cruz-Castillo, J. G., & Torres-Lima, P. A. (2017). 'Deja Vu': a new calla lily (*Zantedeschia aethiopica*) cultivar. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23(2), 97-101. doi:10.5154/r.rchsh.2017.01.005

DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2015, agosto). Informe de Gestión Sector Estadístico 2014-2015. Recuperado 27 julio, 2018, de [https://www.dane.gov.co/files/control\\_participacion/rendicion\\_cuentas/informe\\_gestion\\_sector\\_estadistico\\_DANE\\_2014-2015.pdf](https://www.dane.gov.co/files/control_participacion/rendicion_cuentas/informe_gestion_sector_estadistico_DANE_2014-2015.pdf)

Dávila T. (2013). Análisis comparativo de la frecuencia respiratoria de *Phragmites australis* y *Hedychium coronarium* en presencia del clorotalonilo. Universidad del Cauca. Popayán.

Delgado-García, S. M.; Trujillo-González, J. M. & Torres-Mora, M. A. (2017). Gestión del agua en comunidades rurales; caso de estudio cueca del río Guayuriba, Meta-Colombia. *Revista Luna Azul*, 45, 59-70. DOI: 10.17151/luaz.2017.45.5

Díaz, O. (2006). Remoción de nitrógeno y fósforo en humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidraulica Y Ambiental*, Vol. 27(1), Pág. 26-31.

DNP (Departamento Nacional de Planeación). (2014, 3 junio). CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social). Recuperado 23 julio, 2018, de <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3810%20-%202014.pdf>

EPA (Environmental Protection Agency). (2000). Constructed wetlands treatment of municipal wastewater. Manual. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio, E.U.A. pag 166.

Fernández G., J., Beascoechea, E. M., Muñoz, J. M., Curt F., M. D. (2015). Manual de fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación, España, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid, España.

Fonseca, C., Gaspar, R., de Moraes, M., & Arashiro, A. (2015). Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reuso agrícola. *Revista Ambiente E Água*, Vol. 10(3), Pág. 587-597

García J., Corzo A. (2008). Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña. 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.

González O., y Deas G. (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, Revistas Hidráulica Vol. 32 (1), pág. 61-70.

Hidalgo, J., Montano, J., Estrada, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoría: Ciencia, Arte Y Humanidades*, Vol. 14(1), pag.17-25.

IDEAM (1998-2010). Atlas interactivo climatológico. Tomado de: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html#>. Fecha de consulta: 5 de abril 2019.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2015, marzo). Estudio Nacional del Agua (ENA) 2014. Recuperado 23 julio, 2018, de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA\\_2014.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf)

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2007). FICHA TECNICA: Sistema de Información del Medio Ambiente. Recuperado 24

julio, 2018, de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos\\_suspension.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf).

IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2018). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. Tomado de: Recuperado: 20 de mayo 2019 <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

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

Larriva, J., & González, O. (2017). Modelación hidráulica de humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, Vol. 38(1), pag. 3-16.

León Suarez, R. J. (2017). *Inventario de plantas recomendadas para fitorremediación de coliformes fecales en aguas negras* (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil).

Londoño, P 2017. Diagnóstico biofísico y socioeconómico de la micro cuenca río molino fuente de abastecimiento del acueducto aires del campo, municipio de timbío-cauca. Universidad del Cauca. Popayán.

Luna-Pabello, Víctor Manuel, & Aburto-Castañeda, Sergio. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 17(1), 32-55. Recuperado en 22 de mayo de 2018, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-888X2014000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2014000100003&lng=es&tlng=es).

Magallanes Bajaña, I. J. (2018). *Determinación de los niveles de Coliformes totales y Escherichia coli en suero y leche cruda*(Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil).

Masters, G., Endell, E. (2008). *Introducción a la Ingeniería Medioambiental*. Madrid, España, Tercera edición.

Matinez S.,Lucero. (2010). Estudio de la evolución de una etap para la adecuación legislativa.Departamento de Ingeniería Química (DEQ). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona. Recuperado: 29 de septiembre del 2019 <http://hdl.handle.net/2099.1/10383>

Metcalf y Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment, and Reuse. New York.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial, 47837 (Oct. 25 2010)

MINDESARROLLO (Ministerio de Desarrollo Económico). (2000, noviembre). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000, Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Recuperado 24 julio, 2018, de [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710\\_ras\\_titulo\\_e\\_.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf)

MINSALUD (Ministerio de Salud y Protección Social Subdirección de Salud Ambiental). (2016, diciembre). Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2015. Recuperado 23 julio, 2018, de [https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/inca-2015\\_reducido.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/inca-2015_reducido.pdf)

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. *Theoría: Ciencia, Arte Y Humanidades*, Vol. 22(1), Pág. 33-46.

Mondaca M. A y Campos V. (2014) riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales Universidad de Concepción, Concepción. *Aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Capítulo 2* (pp. 21-29) Concepción, Chile.

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).

OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental). (2014). La fiscalización ambiental vinculada a las aguas residuales. Recuperado 23 julio, 2018, de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)



Organización Mundial de la Salud (OMS). (2019). Enfermedades diarreicas. Tomado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>  
Fecha de consulta: 27 de marzo 2019

Oswald, U. (2011). Retos de la investigación del agua en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Cuernavaca México

Parra A., Castillo D., Rojas J., Puerto C. y Villalba N., (2018). Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 – 2017 Tomado de: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe\\_sectorial-cuatrenio\\_2014-2017\\_.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe_sectorial-cuatrenio_2014-2017_.pdf) Fecha de consulta: 13 de marzo 2019

Platzer , M , Cáseres , V y Fong , N. (2002). Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centro América. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún México.

Peña, E., Madera, A., Sánchez, J., Y Medina, J. (2013). bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae). *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, Vol. 37(145), pág. 469-481.

Peña, A., & Lara, J. (2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: estado del arte. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, Vol. 22(2), pág. 39-61.

Pérez , L.F , Camacho , A , Andrade , M et al. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Ed Nelson Antequera Durán. Cochabamba-Bolivia, 2010.

Pinilla, C. (2003). *Indicadores de contaminación fecal en aguas*. Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. México.(pp. 30-239).

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). Objetivos del Desarrollo Sostenible. Obtenido de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainabledevelopment-goals.html>

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2012, agosto). Aguas saludables para el desarrollo sostenible. Recuperado 23 julio, 2018, de [http://www.pnuma.org/publicaciones/PNUMA\\_gestionAgua2012.pdf](http://www.pnuma.org/publicaciones/PNUMA_gestionAgua2012.pdf)

Raffo Lecca, Eduardo. (2013). Tratado del agua y la legislación peruana. *Industrial Data*, 16 (2), pag. 106-117.

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

Ramalho, R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverte S.A.

Ramírez, L. Á. (2016). Diagnóstico de la calidad microbiológica del agua durante un ciclo de cultivo de camarón marino del grupo de cooperativas del sector El Zompopero, Bahía de Jiquilisco, Usulután.

Rivera, D. (2015). Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia. Cuaderno Activa N°7. pag. 1-162.

Romero-Aguilar, M., Colin-Cruz, Ar., Sanchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, Ma. Laura. Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Rev. Int. Contam. Ambient* [online]. 2009, vol.25, n.3, pp.157-167. ISSN 0188-4999.

Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis*, 4(1), 8-14.

Suárez, E., Agudelo, V., Gonzales, G., Ramos, Y. (2014). Tratamiento de agua residual procedente de la industria de curtiembres mediante humedales subsuperficiales usando *Zantedeschia aethiopica*. Bogotá, Vol. 11(1), Pag. 211-224.

Suarez, R. J. (2017). Inventario de plantas recomendadas para fitorremediación de coliformes fecales en aguas negras (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil).

Srinivasan Neralla, Richard W Weaver, Bruce J Lesikar, Russell A Persyn. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands, *Bioresource Technology*, Volume 75, Issue 1, 2000, Pages 19-25, ISSN 0960-8524, [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00039-0).

Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., & Seibert, B. (2002). Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecological Engineering*, Vol.18(4), pag 429.

TAR (Tratamiento de Aguas Residuales). (2014). Recuperado 30 julio, 2018, de <https://tratamientodeaguasresiduales.net/tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas/>

Vásquez, L., y González, O. (2017). Modelación hidráulica de humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, Vol. 38(1), pág. 3-16.

Viana Caicedo, D. F. (2015). Respuesta a la aplicación de fertilización química complementado con bioestimulantes foliares en el cultivo de Cartucho Blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en la zona de El Ángel, provincia del Carchi. Recuperado 26 julio, 2018, de <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/49000/998/1/T-UTB-FACIAG-AGR-000194.pdf>

Vidal, G., y Hormázabal S. (2018). Humedales Construidos. Grupo de ingeniería y Biotecnología Ambiental. Facultad de ciencias ambientales y centro EULA – Chile. Primera edición concepción chile. ISBN 978-227-419-7

Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, Vol. 18(5), pág.633.

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, Vol. 25(5), Pag. 478-490.

Wang, M., Zhang, D., Dong, J., & Tan, S. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate - A review. *Journal Of Environmental Sciences (China)*, 57293-311. doi:10.1016/j.jes.2016.12.019.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO

Zurita, F., de Anda, J., & Belmont, M. A. (2006). Performance of Laboratory-Scale Wetlands Planted with Tropical Ornamental Plants to Treat Domestic Wastewater. *Water Quality Research Journal Of Canada*, Vol. 41(4), Pág. 410-417.

Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J., & Cervantes-Martinez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in

subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 33(2), 110-118. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.02.004

Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861-869. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.12.026

Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., & White, J. R. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science And Technology: A Journal Of The International Association On Water Pollution Research*, 63(4), 654-659. doi:10.2166/wst.2011.229

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O., Rodríguez-Sahagun, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* [online], vol.2, n.spe1, pp.139-150. ISSN 2007-0934.

## ANEXOS

**Tabla 16: resultados de la muestreade trazadores**

N° muestra	Tiempo Transcurrido			N° muestra	Tiempo Transcurrido		
	Min	Dias	Conduct. $\mu\text{S/cm}$		Min	Dias	Conduct. $\mu\text{S/cm}$
1	0	0	945	27	1761	1,223	1156
2	79	0,055	946	28	1790	1,243	1208
3	130	0,090	952	29	1824	1,267	1247
4	204	0,142	959	30	1862	1,293	1380
5	266	0,185	958	31	1897	1,317	1436
6	364	0,253	973	32	1968	1,367	1410
7	425	0,295	977	33	2036	1,414	1543
8	488	0,339	972	34	2106	1,463	1430
9	581	0,403	963	35	2167	1,505	1452
10	691	0,480	984	36	2342	1,626	1781
11	808	0,561	985	37	2438	1,693	1995
12	1000	0,694	991	38	2562	1,779	1901
13	1063	0,738	991	39	2601	1,806	1571
14	1123	0,780	993	40	2635	1,830	1507
15	1182	0,821	1001	41	2658	1,846	1516
16	1234	0,857	984	42	2692	1,869	1395
17	1296	0,900	982	43	2721	1,890	1373
18	1358	0,943	969	44	2757	1,915	1366
19	1393	0,967	968	45	2789	1,937	1436
20	1428	0,992	978	46	2823	1,960	1400
21	1483	1,030	979	47	2856	1,983	1401
22	1548	1,075	987	48	2881	2,001	1401
23	1604	1,114	1004	49	2913	2,023	1393
24	1664	1,156	1061	50	2943	2,044	1399
25	1694	1,176	1089	51	2960	2,056	1324
26	1726	1,199	1109	52	2975	2,066	1853
				53	2985	2,073	1889

**Tabla 17: resultados de Caudales**

<b>N° Toma</b>	<b>Volumen (L)</b>	<b>Tiempo (Min)</b>	<b>Caudal (L/min)</b>	<b>Caudal (L/d)</b>
1	3,2	39,4	0,081	116,95
2	6,3	41,3	0,153	219,66
3	6,4	86	0,074	107,16
4	5,5	30	0,183	264,00
5	4,2	36	0,117	168,00
6	11	90	0,122	176,00
7	7	40	0,175	252,00
8	3,2	38	0,084	121,26
9	2,92	45	0,065	93,44
10	5,82	30	0,194	279,36
11	3,2	5,1	0,632	909,47
12	6	10	0,600	864,00
13	2,8	3,9	0,724	1042,76
14	5,6	10,8	0,518	745,52
15	2,7	7,6	0,356	512,70
16	1,9	5,6	0,342	492,97
17	4,8	14,9	0,322	463,89
18	3,62	15,1	0,239	344,46