



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES  
RENOVABLES**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL  
TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL EN COTACACHI, IMBABURA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO/A EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**AUTORES:** Romero Salgado Andrea Doménica

Tanaí Ortiz Ingrid Estefanía

**DIRECTOR:**

Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

**IBARRA – ECUADOR**

2023



**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ibarra, 30 enero 2023.

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: “EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN COTACACHI, IMBABURA” de autoría de las señoritas ROMERO SALGADO ANDREA DOMÉNICA y TANAÍ ORTIZ INGRID ESTEFANÍA estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que las autoras ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

**TRIBUNAL TUTOR**

**FIRMA**

MSc. Jairo Santiago Cabrera García  
**DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN**

MSc. Jorge Renato Oquendo Andino  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

MSc. Jorge Edwin Granja Rúales  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	1003873674	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Romero Salgado Andrea Domenica		
<b>DIRECCIÓN:</b>	República de Cuba y Alejandro Proaño S/N – Cotacachi		
<b>EMAIL:</b>	adromeros@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	2916878	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0985609435

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	1004352397	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Tanaí Ortiz Ingrid Estefanía		
<b>DIRECCIÓN:</b>	La Dolorosa del Priorato - Ibarra		
<b>EMAIL:</b>	ietanaio@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0979834820


DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN COTACACHI, IMBABURA
<b>AUTOR (ES):</b>	Romero Salgado Andrea Doménica Tanaí Ortiz Ingrid Estefanía
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	30/01/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Jairo Santiago Cabrera García MSc.

## 2. CONSTANCIAS

Las autoras manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son las titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de enero de 2023

### EL AUTOR:

  
.....  
Andrea Domenica Romero Salgado  
CI: 1003873674

  
.....  
Ingrid Estefanía Tanáí Ortiz  
CI:1004352397

## **AGRADECIMIENTO**

*A nuestros padres por todo su apoyo, paciencia, comprensión y amor a lo largo de esta etapa académica, por ser nuestros pilares y no dejarnos caer en ningún momento, por animarnos a continuar a pesar de las dificultades que se nos han presentado y por haber confiado en nuestras capacidades. Gracias por los valores inculcados y los consejos dados para poder llegar a cumplir una meta más en nuestras vidas.*

*Agradecemos a nuestro director Ing. Santiago Cabrera MSc, por habernos guiado y compartido su conocimiento en el transcurso de la preparación para nuestra formación como profesionales. De igual manera a nuestros asesores Biol. Renato Oquendo MSc e Ing. Jorge Granja por haber formado parte de este proceso, por su tiempo y consejos para culminar con éxito nuestro trabajo de titulación.*

*Finalmente queremos agradecer a quienes de una u otra forma nos han brindado su apoyo de manera incondicional y nos han animado en cada momento.*

***Andrea Romero e Ingrid Tanáí***

## **DEDICATORIA**

*Agradezco infinitamente a mis padres Luis y Lili por ser mi pilar fundamental, ser mi guía en todos los momentos que los he necesitado, enseñarme a seguir adelante en cada etapa que fui construyendo y aprendiendo a lo largo de mi carrera, también les doy las gracias por haber estado conmigo desde el inicio hasta el final de esta etapa, haciendo cada cosa posible por acompañarme y no dejarme vencer en esta travesía, ustedes me llenaron de mucha fortaleza, con su amor y cariño infinito que siempre fue visible en cada escalón que fui subiendo, este logro se los dedico a ustedes porque son parte fundamental de mi vida.*

*A mis queridas hermanas Mika y Sofi que siempre han estado presentes a lo largo de este camino, llenándome de fuerzas y apoyo incondicional para poder atravesar cada una de mis metas dentro de mi carrera universitaria. ¡Gracias familia querida por ser siempre mi motor e impulso de llegar hasta el fin de esta meta, los amo!*

*A cada uno de mis amigos que me han apoyado y ayudado en este proceso, a cada uno de los docentes que aportaron con su conocimiento para poder culminar este trabajo.*

*Y finalmente a mi compañera de tesis Ingrid, porque más que todo te has convertido en una amiga incondicional dentro de todo este proceso que hemos atravesado y que con orgullo lo logramos.*

**Andrea Romero**

## DEDICATORIA

*El poder culminar una etapa más de nuestras vidas conlleva trabajo y esfuerzo y detrás de esto existen personas que nos ayudan a progresar y lograr salir adelante. La dedicatoria de este trabajo es especialmente para mis padres Guillermo Tanaí y Amparito Ortiz, quienes a través de mi vida me han ensañado a no rendirme y que cada vez que se presente un obstáculo tengo que superarlo, que todo en esta vida se puede lograr si nos lo proponemos y sobre todo por el gran esfuerzo que han hecho a lo largo de toda mi carrera universitaria, gracias por ser mi pilar y no dejarme decaer en ningún momento.*

*A mi hijo Jared Villavicencio por ser ese motor que día a día me ha impulsado a ser una mejor persona, por ser quien a pesar de su corta edad me apoyó en cada trabajo realizado, en las noches de desvelo y por decirme un tú si puedes.*

*Finalmente agradecer a Andre que más que una compañera se convirtió en una gran amiga y quien durante esta etapa académica me han transmitido su conocimiento y con palabras de aliento ha ayudado a que este sueño se cumpla.*

***Ingrid Tanaí***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Revisión de Antecedentes.....	1
1.2 Problema de Investigación y Justificación .....	4
1.3 Pregunta Directriz de la Investigación.....	5
Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General .....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Hipótesis.....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Marco Teórico Referencial.....	7
2.1.1 Contaminación Hídrica .....	7
2.1.2 Contaminación por Aguas Residuales .....	7
2.1.3 Tecnologías en el Tratamiento de Aguas Residuales.....	8
2.1.4 Humedales Artificiales.....	9
2.1.5 Elementos de los Humedales Artificiales .....	9
2.1.6 Tipos de Humedales Artificiales .....	10
2.1.9 Especies de estudio.....	15
2.2 Marco Legal .....	17
2.2.1 Constitución de la República del Ecuador.....	17
2.2.2 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralizado (COOTAD).....	17
2.2.3 Código Orgánico del Ambiente .....	17



2.2.4 Ley Orgánica de Salud .....	17
2.2.5 Acuerdo Ministerial 097-A del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) 4 de noviembre del 2015 .....	18
2.2.6 Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 .....	18
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>19</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>19</b>
3.1 Área de Estudio .....	19
3.2 Métodos .....	20
3.2.1 Caracterización del afluente .....	20
3.2.2 Plantas utilizadas .....	21
3.2.3 Periodo de Adaptación .....	21
3.2.4 Diseño Experimental.....	22
3.2.5 Diseño de Humedales.....	23
3.2.6 Montaje del Sistema.....	23
3.2.7 Monitoreo del Sistema de Humedales y Evaluación del Desempeño.....	24
3.2.8 Cálculo de Eficiencia de Remoción .....	25
3.2.9 Análisis Estadístico .....	25
3.2.10.. Elaboración de Guía Técnica.....	25
3.3 Materiales y Equipos .....	26
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>27</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>27</b>
4.1 Caracterización de Agua Residual.....	27
4.2 Análisis de resultados .....	28
4.2.1 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos.....	28
4.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno .....	28
4.2.3 Sólidos Suspendidos Totales.....	31
4.2.4 <i>Escherichia coli</i> .....	33

4.3 Guía Técnica.....	35
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>36</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>36</b>
4.1 Conclusiones.....	36
4.2 Recomendaciones .....	37
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>38</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>48</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de estudio.....	20
<b>Tabla 2.</b> Consumo mensual de agua .....	20
<b>Tabla 3.</b> Aumento Gradual de ARD .....	21
<b>Tabla 4.</b> Niveles y tratamientos .....	22
<b>Tabla 5.</b> Materiales y equipos.....	26
<b>Tabla 6.</b> Caracterización de agua residual doméstica.....	27
<b>Tabla 7.</b> Resultados análisis de laboratorio día 7 .....	28
<b>Tabla 8.</b> Resultados análisis de laboratorio día 15 .....	28
<b>Tabla 9.</b> Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH DBO <sub>5</sub> .....	31
<b>Tabla 10.</b> Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH SST.....	33
<b>Tabla 11.</b> Prueba Tukey <i>E. coli</i> a los 7 días.....	35
<b>Tabla 12.</b> Prueba Tukey <i>E. coli</i> a los 15 días.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Clasificación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales .....	10
<b>Figura 2.</b> Sistema de agua superficial libre .....	11
<b>Figura 3.</b> Sistema de flujo subsuperficial .....	12
<b>Figura 4.</b> Humedal subsuperficial de flujo vertical. ....	12
<b>Figura 5.</b> Humedal subsuperficial de flujo horizontal .....	13
<b>Figura 6.</b> Mapa de ubicación del cantón Santa Ana de Cotacachi .....	19
<b>Figura 7.</b> Diseño Experimental.....	22
<b>Figura 8.</b> Diseño humedal.....	23
<b>Figura 9.</b> Porcentajes de remoción de DBO <sub>5</sub> .....	29
<b>Figura 10.</b> Porcentajes de remoción de Sólidos Suspendedos Totales.....	31
<b>Figura 11.</b> Porcentajes de remoción de <i>E. coli</i> .....	33

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES**  
**RENOVABLES**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA MEDIANTE EL**  
**TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO**  
**SUBSUPERFICIAL EN COTACACHI, IMBABURA**

Romero Salgado Andrea Doménica y Tanaí Ortiz Ingrid Estefanía

**RESUMEN**

A nivel mundial el mayor foco de contaminación se presenta principalmente en cuerpos hídricos, generando la degradación de ecosistemas, la proliferación de vectores y aparición de diversas enfermedades. Los humedales artificiales han sido presentados como una tecnología de eficiencia para el tratamiento de aguas residuales domésticas en sectores rurales debido al bajo costo de operación y fácil manejo, convirtiéndose en una alternativa sostenible y económica. El objetivo de la investigación se enfoca en evaluar la eficiencia de remoción de parámetros físicos, químicos y microbiológicos (DBO<sub>5</sub>, SST y *E. coli*) de agua residual doméstica en dos tiempos de retención hidráulico de 7 y 15 días, en un humedal artificial de tipo subsuperficial con las especies *Medicago sativa* (alfalfa), *Zantedeschia aethiopica* (cartucho) y *Canna indica* (achira). El tratamiento a escala piloto con humedales subsuperficiales de flujo horizontal con especies *Medicago sativa*, *Zantedeschia aethiopica* y *Canna indica* lograron una eficiencia de remoción del 50 al 90%, obteniendo una mayor remoción en un tiempo de retención hidráulico de 15 días, siendo el Tratamiento dos (T2), correspondiente a *Medicago sativa* y *Zantedeschia aethiopica* el más eficiente con un mayor porcentaje de remoción entre el 80 a 90% en los parámetros analizados de DBO<sub>5</sub>, SST y *E. coli*.

**Palabras clave:** Humedales construidos, tratamiento de aguas residuales, plantas ornamentales, eficiencia de eliminación.

## ABSTRACT

The focus of contamination is present in mainly of waterbodies, producing the degradation of ecosystems, proliferation of vectors and appearance of various biological diseases. Constructed wetlands have been presented as an efficient technology for the treatment of domestic wastewater in rural areas due to their low operating cost and ease of management, making them a sustainable and economical alternative. The objective of the research was to evaluate the removal efficiency of physical, chemical, and microbiological parameters (BOD<sub>5</sub>, TSS and *E. coli*) of domestic wastewater in two hydraulic retention times, 7 and 15 days, in a subsurface artificial wetland with *Medicago sativa* (alfalfa), *Zantedeschia aethiopica* (cartridge) and *Canna indica* (achira) species. The pilot scale treatment with horizontal flow subsurface wetlands with *Medicago sativa*, *Zantedeschia aethiopica* and *Canna indica* species achieved a removal efficiency of 50 to 90%, obtaining a higher removal in a hydraulic retention time of 15 days, with Treatment two (T2), corresponding to *Medicago sativa* and *Zantedeschia aethiopica* being the most efficient with a higher percentage of removal between 80 to 90% in the parameters analyzed BOD<sub>5</sub>, TSS and *E. coli*.

**Key words:** Constructed wetlands, wastewater treatment, ornamental plants, removal efficiency.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Revisión de Antecedentes

La disponibilidad de agua dentro de cualquier región es muy importante para la vida y el desarrollo económico, pero a través del tiempo se ha generado un deterioro en cuanto a su calidad, convirtiéndose en uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial (Villena, 2018). La contaminación en cuerpos de agua usualmente ocurre debido a vertidos incontrolados de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento previo, afectando de esta manera a especies vegetales y organismos vivos que en la mayoría de casos afecta no solo a especies individuales y poblaciones sino también a comunidades en general debido a la existencia de contaminantes como nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, coliformes fecales, materia orgánica, etc., generando una degradación en su calidad y convirtiéndose en no apta para el consumo (Fernández, 2012).

Por lo cual existen diversas tecnologías a implementarse en el tratamiento de aguas residuales, como las convencionales altamente mecanizadas con un alto consumo de energía o las ecológicas de bajo costo y fácil operación (Zurita et al., 2011). Los humedales artificiales son una de las tecnologías de eficiencia empleada para el tratamiento de aguas residuales, en comparación a los sistemas convencionales estos son de bajo costo, fácil de operar, mantener y poseen un gran potencial de aplicación en países en desarrollo, principalmente en pequeñas comunidades rurales (Kivaisi, 2001). Estos sistemas son diseñados para la depuración de aguas residuales mediante procesos naturales que interactúan con el medio filtrante del sustrato generando una interacción biológica, química y física de los elementos mediante la intervención de la energía solar (Llagas & Gómez, 2006).

Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre, en forma controlada ayudan a la producción de mecanismos, permitiendo la eliminación de contaminantes a partir de procesos físicos, biológicos y químicos presentes en aguas residuales. (Aspirilla et al., 2020). Este tipo de sistemas cuentan con tres funciones principales, por lo cual son considerados como un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales antes de generarse su disposición final a un cuerpo de agua o su reutilización, además utilizan y transforman los elementos a través de microorganismos que fijan físicamente los

contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, logrando niveles de tratamiento consistentes (Castro et al., 2018).

En la aplicación de este sistema, existen estudios en Alemania con una instalación de más de 50 sistemas, Geller (1997), en sus investigaciones muestra una eficacia de depuración con la aplicación de la especie *Phragmites australis*, obteniendo como resultado un nivel de eliminación superior al 90% para parámetros como demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo y nitrógeno. De igual manera Gearheart (1992), en Estados Unidos, California estudió humedales artificiales a lo largo de 10 años, destacando de esta manera la eficiencia de este sistema, el cual fue diseñado para brindar múltiples beneficios sociales y ambientales, es decir, calidad de agua, hábitat de humedales, acceso público, acuicultura y educación ambiental. Su eficacia se mide con la remoción de hasta el 90% de sus contaminantes principales.

Los autores Arias & Brix (2003), destacan el buen funcionamiento de humedales artificiales para tratar la contaminación de aguas residuales, principalmente si se hace énfasis en depuración de materia orgánica y otros compuestos. Hernández (2017), en su investigación realiza la comparación entre carrizo (*Phragmites australis*) y achira (*Canna indica*) teniendo como resultado una capacidad de remoción para ambas especies relativamente similares con un 88.65% frente a 87.65% de contaminantes como Coliformes Fecales, DQO, SST, DBO<sub>5</sub>, aceites y grasas; debido a las mismas condiciones de administración del caudal, tiempo de retención hidráulica, mismas condiciones ambientales y el mismo tipo de medio poroso.

En América Latina se han desarrollado diversos estudios, demostrando la capacidad de humedales artificiales para la remoción significativa de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados del agua residual (Rivas & Paredes, 2014). En Perú se realizó un estudio implementando las especies *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes*, donde se analizan diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, donde se obtuvo una eficiencia de remoción alrededor de un 70% (Nuñez et al., 2019). Además, se prueba la eficiencia de *Zantedeschia aethiopica* con una remoción del 49% respecto a componentes químicos y microbiológicos con un tiempo de retención hidráulico (TRH) correspondiente a 48 horas (Castro et al., 2018).

Los humedales artificiales tienen la capacidad para modificar parámetros cualitativos del agua debido a que el flujo de agua se genera de manera léntica, permitiendo la fijación de



contaminantes considerándolos como una buena alternativa (Bernal, 2014). La investigación realizada por Ramos (2019), en el sector Huatascapa – Puno en Perú consistió en la utilización de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie *Zantedeschia aethiopica*, donde se monitorearon parámetros como demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y fosfatos, teniendo como resultado un promedio de remoción del 85% para estos parámetros.

Por otro lado, en la ciudad de Concepción – Chile se realizó un estudio basado en humedales artificiales de flujo subsuperficial con las especies *Typha latifolia* y *Zantedeschia aethiopica*, obteniendo valores que fluctúan entre el 70 y 94 % de eficiencia (Yévenes, 2017). Estudios en Nariño-Colombia determinaron el nivel de remoción de la carga contaminante de aguas residuales provenientes de la crianza de porcino, para poder realizar esta actividad se tomó en cuenta tres especies: *Schienoplectus californicus*, *Canna Sp* y *Zantedeschia aethiopica* L., demostrando mejores resultados de remoción para sólidos suspendidos totales (SST) y demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) (Pantoja & Tarapues, 2017).

La especie *Zantedeschia aethiopica* ha sido una de las más utilizadas para determinar la remoción de carga contaminante presente en el agua residual (Castro et al., 2018). Es así como en Chachapoyas-Perú se aplicó las especies *Zantedeschia aethiopica* y *Nasturtium officinale* dentro de humedales artificiales, para llevar a cabo el experimento se vació agua residual en un estanque grande como tratamiento testigo y en otros dos estanques se estableció los humedales artificiales, para el análisis del agua se esperó un tiempo de 45 días, en donde los primeros 10 días se presentó un periodo de adaptación para las especies. Se tomaron en cuenta parámetros como: DBO<sub>5</sub>, DQO, pH, Turbidez y OD, antes y después de aplicar las especies, obteniendo como resultado que la planta *Zantedeschia aethiopica* es más eficiente para la remoción de materia orgánica en un 89% (Herrera, 2021).

En Ecuador la contaminación del agua ha sido un problema notable por lo que se han implementado procesos de reutilización del agua residual al bajar su nivel de contaminación, donde se ha realizado varios estudios implementando humedales artificiales con especies que han presentado resultados significativos (Tello & Sánchez, 2019). Aguilar (2020), llevó a cabo la experimentación de sistemas con diferentes

especies de macrófitas ornamentales, dando como resultado que el cartucho, achira y lirio ayudan a disminuir un 86% para DBO5, 80-90% para DQO, 90-95% para sólidos en suspensión, 78% para coliformes fecales y 80% para nitrógeno y fósforo total.

## **1.2 Problema de Investigación y Justificación**

En Ecuador el mayor foco de contaminación se presenta en cuerpos hídricos, proveniente principalmente de descargas de aguas residuales domésticas debido a la inexistencia de sistemas sanitarios y plantas de tratamiento (Ministerio del Ambiente y Agua, 2017). Entre las consecuencias generadas se constata la degradación de los ecosistemas, proliferación de vectores y aparición de diversas enfermedades (Ramos, 2019). Entre las necesidades primordiales que tiene el ser humano está preservar el medio donde vive, para gozar de una mejor calidad de vida, aunque generalmente en zonas rurales es en donde se descarga agua residual sin ningún tipo de tratamiento previo, perjudicando a poblaciones localizadas dentro de las zonas degradadas, generando un impacto creciente en la salud y calidad de vida en general (Burgos et al., 2018).

Existen diversas alternativas que se pueden implementar como son las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), pero aproximadamente a nivel nacional se trata solamente el 12% de las aguas residuales domésticas dejando un 88% sin tratamiento previo que se canaliza directo a quebradas y ríos (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020). La baja cantidad de PTAR distribuidas en el país, se debe a los altos costos de instalación y mantenimiento lo cual genera que las poblaciones más vulnerables se vean en la necesidad de obtener agua de lugares adyacentes sin ningún tipo de tratamiento previo, es por eso importante utilizar sistemas ajustados a las necesidades locales (García, 2018).

Es por eso que se consideran a los humedales artificiales como una alternativa sustentable con relación a otras técnicas tradicionales (Vymazal, 2011). Son considerados como una solución adecuada para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, debido a su bajo costo de inversión, fácil operación y mantenimiento, no requieren de energía y poseen un alto potencial de aplicación en países emergentes (Rodríguez et al., 2020). Además, potencian el valor paisajístico y la conservación de la biodiversidad (Araya, 2017).

El presente proyecto propone la implementación de tres especies: alfalfa (*Medicago sativa*), achira (*Canna indica*) y cartucho (*Zantedeschia Aethiopica*), debido a que la

alfalfa es considerada como el cultivo forrajero más utilizado en el mundo con una gran adaptabilidad al medio y rápida propagación, se toma en cuenta dentro de la investigación al no existir estudios previos de la implementación en humedales artificiales (Delgado, 2015). Las dos últimas especies son de tipo ornamental y han presentado niveles de eficacia significativos en relación con especies comúnmente utilizadas. Por lo cual, se pretende la implementación de sistemas de humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con la finalidad de evaluar la capacidad de remoción de contaminantes de estas especies en el cantón Cotacachi. De esta manera los humedales artificiales plantados con estas especies podrían ser implementados en zonas rurales y de baja densidad poblacional o en cualquier país en vía de desarrollo, debido a que son especies que se pueden encontrar fácilmente dentro de nuestro entorno. Es así que estos sistemas con especies de tipo ornamental y forrajero proporcionarán un mejoramiento estético del paisaje. Además, pueden presentar la posibilidad de obtener un beneficio económico para la mantención del sistema si se utilizan especies ornamentales que permitan la comercialización.

### **1.3 Pregunta Directriz de la Investigación**

- ¿Cómo fluctúan las principales características fisicoquímicas y microbiológicas indicadoras de Calidad de Agua al ser tratadas con humedales artificiales subsuperficiales con las especies *Medicago sativa* (alfalfa), *Canna indica* (achira) y *Zanteteschia aethiopica* (cartucho)?
- ¿Qué tipo de influencia tiene el tiempo de retención hidráulico sobre el rendimiento y efectividad de tratamiento de agua residual de la zona rural de Cotacachi con humedales artificiales de flujo subsuperficial?
- ¿Qué combinación de plantas fitorremediadoras es la que mejor rendimiento presenta a la hora de tratar las aguas residuales mediante el tratamiento por humedales artificiales de flujo subsuperficial?

## **Objetivos**

### **1.3.1 *Objetivo General***

Evaluar la calidad de agua mediante el tratamiento con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal en Cotacachi, Imbabura

### **1.3.2 *Objetivos Específicos***

- Identificar las características fisicoquímicas, microbiológicas e hidráulicas del afluente
- Analizar la calidad del agua en el efluente una vez tratada con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal piloto, a partir del tiempo de retención hidráulico con las especies *Medicago sativa*, *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*
- Elaborar una guía técnica sobre el rendimiento, potencial, factibilidad y manejo de las especies en estudio para el tratamiento potencial de agua residual doméstica de bajo caudal y carga contaminante

### **1.4 Hipótesis**

El agua residual doméstica reduce su carga contaminante al ser tratada con las especies *Medicago sativa* (alfalfa), *Canna indica* (achira) y *Zantedeschia aethiopica* (cartucho)

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Marco Teórico Referencial

A continuación, se presenta la revisión de literatura utilizada para el desarrollo de la investigación.

##### 2.1.1 *Contaminación Hídrica*

La contaminación de los recursos hídricos genera un impacto negativo y amenaza directamente la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, conlleva afectaciones directas dentro de la salud humana no solo a seres humanos y animales sino también al medio natural en general (Gómez, 2018). La contaminación se entiende como toda acción de introducir directa o indirectamente algún tipo de material o cualquier otra sustancia que no pertenece a un medio natural, alterando su calidad y composición química, siendo perjudicial para el ecosistema circundante (Guadarrama et al., 2016).

La calidad del agua puede verse afectada y modificada principalmente por actividades antropogénicas desarrolladas cerca de sistemas fluviales como ríos, lagos entre otros; en donde aguas residuales tanto de origen industrial, doméstico, comercial entre otras son descargadas a ríos con altos niveles de contaminación (Bermeo, 2016). Entre los elementos que contienen se encuentran sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros contaminantes como aceites, grasas e hidrocarburos (Peña, 2012).

##### 2.1.2 *Contaminación por Aguas Residuales*

La mayor parte de actividades humanas generan aguas residuales, a medida que incrementa la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentran en un constante aumento en todo el mundo (Bernal et al., 2002). Por este motivo existe el tratamiento de aguas residuales que se enfoca en remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, que puede encontrarse en forma de partículas en suspensión o disueltas, teniendo la finalidad de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga para cada país o por el tipo de reutilización a la que destinará el agua tratada final (Díaz et al., 2012).

Son las aguas superficiales las que desafortunadamente se encuentran con un mayor nivel de contaminación, debido a descargas directas de aguas residuales sin tratamiento previo

en cuerpos de agua (Sierra, 2011). Las aguas residuales domésticas son mayormente vertidas a cuerpos hídricos generando una disminución en la calidad de agua y una alteración de las condiciones naturales (Díaz et al., 2012).

### ***2.1.3 Tecnologías en el Tratamiento de Aguas Residuales***

La aplicación de tecnología para el tratamiento de aguas residuales gira en torno al mejoramiento de la calidad de agua para que pueda ser reutilizada o vertida bajo los estándares de la normativa legal, sin afección al medio ambiente (Juan Rodríguez et al., 2015). Siendo el principal objetivo la depuración mediante una integración de diferentes tipos de operaciones, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada (WWA, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017).

Dentro del tratamiento de aguas residuales se pueden dividir en dos grandes grupos; primero los tratamientos fisicoquímicos que como su nombre lo indica se involucran procesos físicos (uso de gravedad, filtración, sedimentación, etc.) y de procesos químicos (coagulación, absorción, oxidación, etc.), (Marín, 2003). El segundo tipo comprende la degradación de materia orgánica a través de la actividad de microorganismos que pueden ser sistemas aerobios (requerimiento de oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno), (López et al., 2008). De igual manera existen sistemas naturales contruidos que aprovechan las transformaciones que se realizan en el medio natural para el tratamiento de la depuración de aguas residuales como es el caso de los humedales artificiales (Noyola et al., 2013).

A nivel mundial se han desarrollado diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que se clasifican según su operación, en convencionales y alternativas (Rodríguez et al., 2015). Dentro de los métodos naturales o alternativos se presentan como una opción tecnológica sostenible para las pequeñas y medianas comunidades en la cual se destacan los humedales artificiales que se caracterizan por tener una eficiencia en la remoción de la carga contaminante, reducción de sólidos, supresión de bacterias por procesos como filtración, radiación solar y sedimentación, siendo sus actividades principales, además de la generación de una buena relación de costo beneficio (Vera et al., 2016).

#### **2.1.4 Humedales Artificiales**

Los humedales artificiales (HA) son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, su función se basa en la simulación de los humedales naturales con el objetivo principal de utilizar procesos físicos, químicos y biológicos que se generan de forma natural para la depuración pasiva del agua residual (Blanco, 2014). Los humedales eliminan contaminantes mediante procesos de sedimentación, degradación microbiana, acción directa de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización, remplazando de esta manera el tratamiento secundario e inclusive bajo ciertas condiciones al tratamiento terciario y primario de las aguas residuales (Stearman et al., 2003).

Su funcionamiento se basa en tres principios básicos: actividad bioquímica de microorganismos dentro del sistema, aporte de oxígeno a través de especies durante el día y de un apoyo físico como es el sustrato que sirve de soporte y material filtrante para el humedal, estos elementos principales eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla (Lara, 1999).

Los humedales artificiales poseen tres funciones básicas por el cual son considerados como un tratamiento potencial para aguas residuales, en donde se desarrolla una fijación física de los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de la actividad de microorganismos y logran niveles de tratamiento consistente mediante un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Senhadji et al., 2017).

#### **2.1.5 Elementos de los Humedales Artificiales**

Carvajal et al. (2018), indica que los humedales están constituidos por los siguientes elementos principales para su funcionamiento:

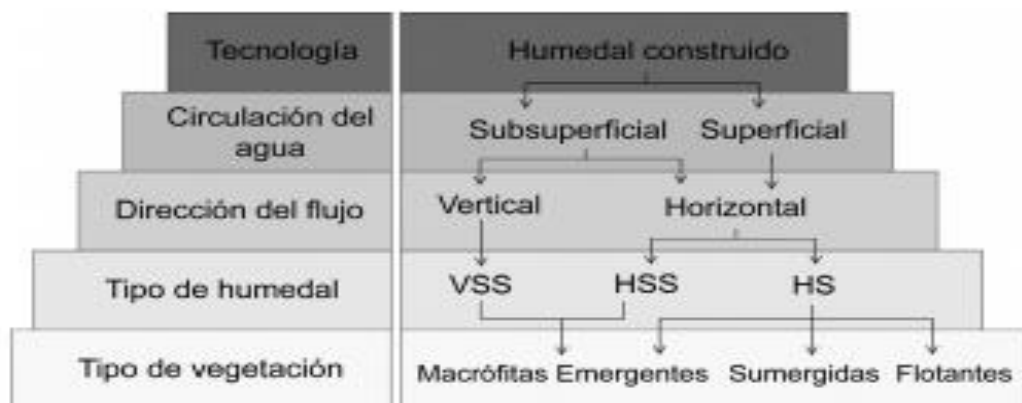
- Agua para tratar: aguas residuales que circulan a través del sustrato filtrante y de la vegetación
- Sustrato: está generalmente compuesto por arena o grava, el cual sirve de soporte para la vegetación y permite la fijación de la población microbiana (*biofilm*) que participa en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales, además debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él.
- Vegetación (macrófitas): las macrófitas se encuentran adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados de agua debido a un sistema desarrollado de grandes

espacios aéreos lo cual permiten la provisión de aire desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas de las especies (Muñoz & Vásquez, 2020). Además, proporcionan una superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual.

- **Microorganismos:** se encargan de realizar el tratamiento biológico, en la zona superior del humedal se encuentran colonias de microorganismos aerobios y dentro del sustrato granular se presentan los microorganismos anaerobios. Dentro de los principales procesos que realizan son la degradación de la materia orgánica, eliminación de nutrientes y desinfección de patógenos (Delgadillo et al., 2010).

### 2.1.6 Tipos de Humedales Artificiales

Dentro de los humedales artificiales se encuentran dos categorías de clasificación de acuerdo con la Figura 1, se tienen Sistemas de Flujo Superficial o Libre (SFS), en el cual el agua circula por sobre la superficie del sustrato y los Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFSS), los cuales a su vez se dividen en Horizontales y Verticales en donde el agua circula a nivel de la superficie del lecho o por debajo del sustrato (Parrao, 2018).



**Figura 1.** Clasificación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales

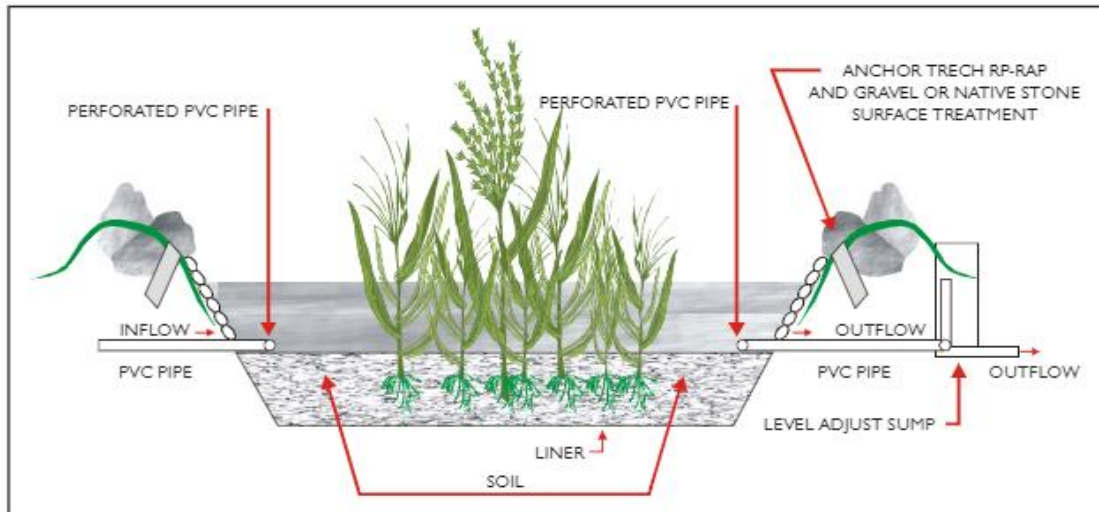
*Nota.* Adaptado de “Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas” (p. 35), por G. Morales et al, 2013, *Theoria*, 22 (1).

#### 2.1.6.1 Humedales de Flujo Superficial.

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula por encima del sustrato a través de los tallos de las plantas, ayudando a que los procesos anaerobios se realicen con mayor facilidad debido a que el agua residual está expuesta directamente a la atmósfera (Soler et al., 2018) (Figura 2). Son utilizados mayormente para tratar aguas



residuales con un tratamiento previo con una profundidad no más de 0,6 m y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (Arteaga et al., 2019).

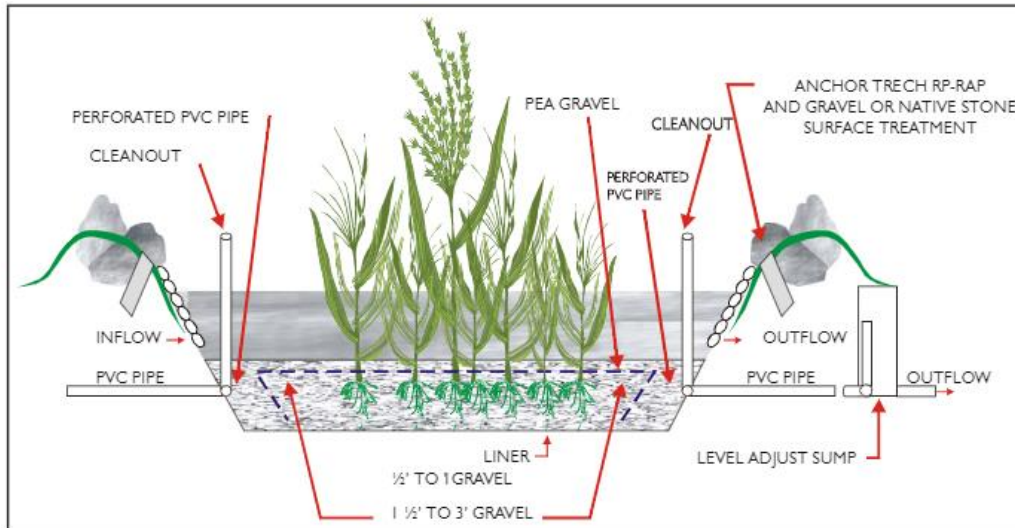


**Figura 2.** Sistema de agua superficial libre

*Nota.* Adaptado de “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de la UNMSM (p. 89), por W. Llagas & E. Gómez, 2006, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 15 (17).

### **2.1.6.2 Humedales de Flujo Subsuperficial.**

Los sistemas de flujo subsuperficial generalmente se utilizan para tratar aguas residuales provenientes de poblaciones pequeñas, se caracterizan por que la circulación del agua se realiza a través de un medio granular subterráneo, con una profundidad de agua cercana a 0,6 m y un pendiente de 1% para facilitar el tránsito del agua mediante el sustrato (Cervantes et al., 2017). La vegetación se encuentra plantada dentro del medio granular y el agua entra en contacto directo con las raíces de las plantas (Castañeda, 2017) (Figura 3). Este tipo de sistema se divide de acuerdo con la circulación del agua en un flujo vertical y horizontal.

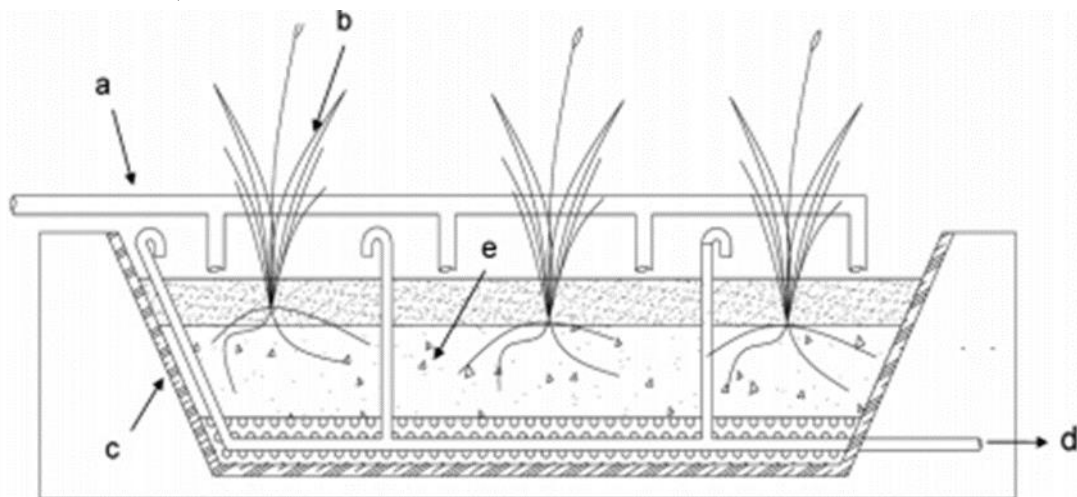


**Figura 3.** Sistema de flujo subsuperficial

*Nota.* Adaptado de “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de la UNMSM (p. 90), por W. Llagas & E. Gómez, 2006, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 15 (17).

- **Humedales subsuperficiales de flujo vertical**

Son humedales en donde su principal característica es que el agua fluye de manera vertical a través de un filtro formado por raíces de plantas acuáticas que hayan sido seleccionadas en conjunto de los microorganismos existente en la superficie (Figura 4), además al tema de aireación es necesario la utilización de tubos que faciliten la entrada de oxígeno que ayudan a la degradación de agentes contaminantes provenientes de las aguas grises (Paredes, 2018).

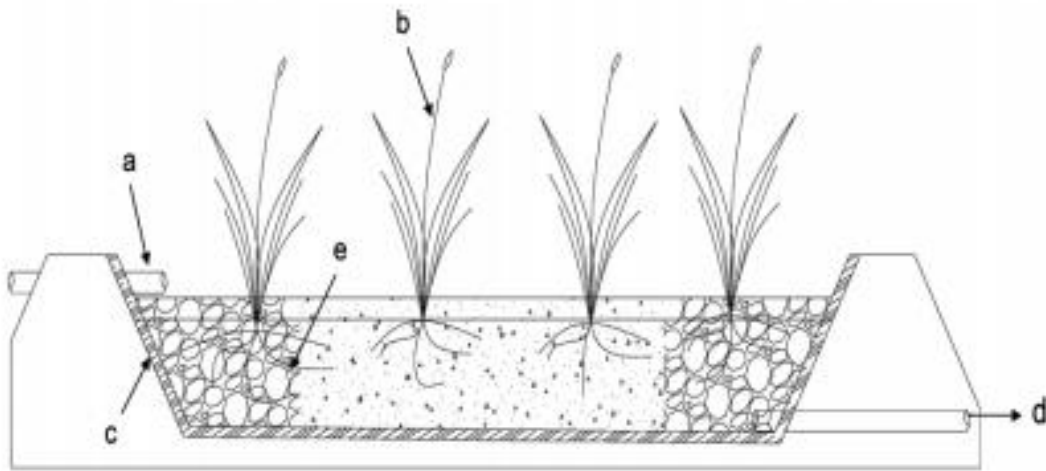


**Figura 4.** Humedal subsuperficial de flujo vertical.

*Nota.* Donde: a) Estructuras de entrada, b) Vegetación emergente c) Impermeabilización, d) Estructuras de salida, e) Medio granular. Adaptado de “Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas” (p. 38), por G. Morales et al, 2013, *Theoria*, 22 (1).

- **Humedales subsuperficiales de flujo horizontal**

En cuanto al sistema de flujo horizontal, el principal componente de este sistema es el sustrato (grava), la cual sirve como medio de soporte para el desarrollo radicular de las especies de macrófitas plantadas en su interior y además sirve para que los microorganismos encargados de la materia orgánica puedan adherirse (Figura 5), la circulación del agua es de forma horizontal y poseen una profundidad entre 0.3 a 0.9 m, además el agua se encuentra entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie (Asprilla et al., 2020).



**Figura 5.** Humedal subsuperficial de flujo horizontal

*Nota.* Donde: a) Estructuras de entrada, b) Vegetación emergente c) Impermeabilización, d) Estructuras de salida, e) Medio granular. Adaptado de “Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas” (p. 38), por G. Morales et al, 2013, *Theoria*, 22 (1).

### **2.1.7 Mecanismos de Remoción de Contaminantes**

Dentro de los humedales artificiales se desarrollan diversos mecanismos de remoción de contaminantes por la interacción conjunta de sus componentes en la cual se destacan procesos biológicos, físicos y químicos dentro del sistema (Muñoz & Vásquez, 2020).

- **Remoción de sólidos en suspensión**

Los sólidos son removidos a través de un proceso de filtración por acción de la arena o grava dentro del sistema. De igual manera las raíces de las especies vegetales en conjunto con el sustrato reducen la velocidad del agua beneficiando la sedimentación de sólidos. Se debe tomar en cuenta un tratamiento previo para evitar obstrucciones dentro del humedal (Rubio & Montenegro, 2018).

- **Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica se da mediante la biodegradación tanto aerobia como anaerobia y en algunos casos es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración cuando se fija a los sólidos suspendidos. El proceso de biodegradación es realizado por los microorganismos presentes en las raíces de las plantas y aquellos que se encuentran adheridos en a la superficie de los sedimentos (Sandoval et al., 2018).

- **Remoción de patógenos**

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores tanto físico, químico y biológicos como la filtración, adsorción, depredación, tiempo de permanencia y el medio granular del sistema (Muñoz & Vásquez, 2020).

### ***2.1.8 Parámetros de Interés para el Tratamiento por Humedales Artificiales***

- ***Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)***

Se considera como la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas en una muestra; se utiliza especialmente para medir el grado de contaminación, dentro de HA la remoción de materia orgánica sedimentable es rápida, en donde cerca del 50% del DBO<sub>5</sub> aplicado es removido en los primeros metros del humedal (Londoño & Marín, 2009).

- ***Sólidos Suspendidos Totales (SST)***

Hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en corrientes de agua superficial o residual; actividades de tipo domésticas, pecuarias, agrícolas e industriales, e inclusive algunos eventos naturales, son fuentes potenciales de aportación de sólidos en suspensión dentro de las aguas residuales (Delgadillo et al., 2010). Dentro de los HA los mecanismos de remoción ocurren por procesos de sedimentación y filtración, se debe mantener la granulometría del medio filtrante entre 10 y 15 mm (Londoño & Marín, 2009).

- ***Escherichia coli***

Uno de los parámetros fundamentales para determinar la eficiencia de un HA se relaciona con la concentración de indicadores de contaminación microbiológica (Ríos et al., 2017). Dentro del grupo de coliformes totales se encuentra *Escherichia coli*, un bacilo corto Gram negativo que es indicadora por excelencia del grupo coliforme fecal debido a su presencia permanente en la flora intestinal del ser humano y animales endotérmicos, siendo usada comúnmente para evaluar los niveles de contaminación fecal (Galeano & Albornoz, 2019).

- ***Potencial de hidrógeno (pH)***

El potencial de hidrógeno representa la acidez o alcalinidad del agua, dentro de todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilicen cualquier sistema biológico de depuración de aguas residuales, trabajan con valores óptimos de pH entre rangos de 5 a 8.5 (Hernández, 2015).

- ***Tiempo de retención hidráulico (TRH)***

Es considerado como el periodo en que permanece el agua residual en contacto con el sustrato, las raíces y en relación con todo el humedal, dentro de este lapso los microorganismos realizan el proceso de descomposición (Rodríguez & Vargas, 2019). De acuerdo con las características de la tecnología y parámetros de operación se estima un TRH dentro de los HA entre un intervalo de 4 a 15 días (Delgadillo et al., 2010).

### ***2.1.9 Especies de estudio***

- ***Alfalfa (Medicago sativa L.)***

Esta especie pertenece a la familia Leguminosea, originaria de oriente medio, se adapta a diferentes pisos climáticos desde los 700 a 2800 msnm permitiendo que se extienda en varios países y su temperatura óptima de crecimiento fluctúa entre los 15 y 25 °C (Delgado, 2015). Su raíz principal y secundarias son de tipo pivotante y la capacidad de penetración es muy rápida, pueden llegar a poseer una longitud de 4 m y una profundidad que varía entre 1.5 a 2 m durante su primera estación de crecimiento (Montes, 2017). Además, cuenta con capacidad de absorber y almacenar una gran cantidad de

organoclorados que ayudan en gran parte descontaminando el suelo y agua (Coyago, 2020).

- **Achira (*Canna indica L.*)**

Planta herbácea perenne perteneciente a la familia Cannacea, la altura promedio es de 1.5 a 3 m, de origen sudamericano, se desarrolla en una gran variedad de climas y suelos, crece sobre todo en lugares húmedos, de rizoma carnoso y ramificado de hasta 20 x 15 cm (Bermeo & Tigse, 2019). La achira ha generado interés a nivel mundial como una tecnología alternativa para la remediación de suelos y agua (Hernández, 2017).

- **Cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica S.*)**

Planta perenne, palustre, emergida ubicadas en bordes de lagos, pantanos, estanques, ríos o cualquier zona del suelo que se mantenga permanentemente húmedo (Benítez et al., 2016). Esta especie posee hojas de gran tamaño de forma lanceolada y color verde oscuro, su raíz es un denominado bulbo o rizoma donde almacena nutrientes con una profundidad de 10 a 15 cm, posee una flor blanca llamativa de uso ornamental y es capaz de alcanzar los 1.5 m de altura (Quimbita, 2015).

## **2.2 Marco Legal**

### ***2.2.1 Constitución de la República del Ecuador***

El artículo 264 establece a los gobiernos municipales cumplir ciertas competencias entre las cuales la número 4 se asocia a la presente investigación estableciendo que estas entidades deben prestar el servicio de depuración de aguas residuales y que no se genere una descarga de manera directa la cual representaría un daño al ecosistema (Constitución del Ecuador, 2008).

### ***2.2.2 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralizado (COOTAD).***

La interferencia de los Gobiernos Autónomos Descentralizados municipales es de suma importancia en cuanto a las descargas de agua residual, el Art. 55 establece los servicios y actividades que debe presentar y realizar cada una de estas entidades en cuanto al manejo de agua residual previo a su descarga ya sea a nivel urbano o rural (Código Orgánico de Organización Territorial Descentralizado, 2019).

### ***2.2.3 Código Orgánico del Ambiente***

En el Capítulo II de los Mecanismos de Control y Seguimiento Ambiental en el Art.196, en relación con el tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales deberán contar con la infraestructura técnica para la instalación de sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales, de conformidad con la ley y la normativa técnica expedida para el efecto. Asimismo, deberán fomentar el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización, siempre y cuando estas recuperen los niveles cualitativos y cuantitativos que exija la autoridad competente y no afecte la salubridad pública. Cuando las aguas residuales no puedan llevarse al sistema de alcantarillado, su tratamiento deberá hacerse de modo que no perjudique las fuentes receptoras, los suelos o la vida silvestre (Código Orgánico del Ambiente, 2017).

### ***2.2.4 Ley Orgánica de Salud***

La descarga de agua residual sin previo tratamiento afecta a la salud sobre todo en zonas rurales donde no se implementan sistemas de tratamiento, por lo que la aplicación de humedales sería una de las mejores opciones, apegándose al Art. 103 donde se prohíbe a

toda persona, natural o jurídica, descargar o depositar aguas en ríos, mares, canales, quebradas, lagunas, lagos y otros sitios similares (Ley Orgánica de Salud, 2015).

#### ***2.2.5 Acuerdo Ministerial 097-A del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) 4 de noviembre del 2015***

En el presente trabajo se establecen límites máximos permisibles para cada uno de los parámetros analizado de acuerdo al Anexo 1 de la norma de calidad ambiental y de descargas de efluentes al recurso agua en donde se plasman los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado; así también como los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos y los métodos y procedimientos para la determinación de la presencia de contaminantes en el agua

#### ***2.2.6 Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025***

En base al Eje de Transición Ecológica se establece el objetivo 13 hace referencia exclusivamente a **Promover la gestión integral de los recursos hídricos** en donde una de las principales políticas establecidas en este objetivo es proteger, regenerar, recuperar y conservar el recurso hídrico y sus ecosistemas asociados, por sistemas de unidades hidrográficas (Planificación, 2021).



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se establece los métodos a seguir para la implantación de humedales artificiales.

#### 3.1 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona rural “La Compañía” ubicada a 1.5 km de la zona urbana en el cantón Santa Ana de Cotacachi en la provincia de Imbabura, es el cantón más extenso de los seis que conforman la provincia, posee una superficie de 1809 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el cantón de Urcuquí; al sur con el cantón de Otavalo y la provincia de Pichincha; al este con el cantón Antonio Ante y al oeste con la provincia de Esmeraldas (Figura 6). Dentro del cantón se presentan tres zonas principales, la andina con temperaturas que oscilan entre los 14 a 22 °C y las zonas subtropical y tropical con una temperatura que oscila entre los 16 a 32 °C. El cantón Cotacachi está constituido por diez parroquias, de las cuales dos son urbanas: El Sagrario y San Francisco. Las parroquias rurales son: Quiroga, Imantag, Cuellaje, Apuela, García Moreno, Peñaherrera, Plaza Gutiérrez y Vacas Galindo (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi, 2015).

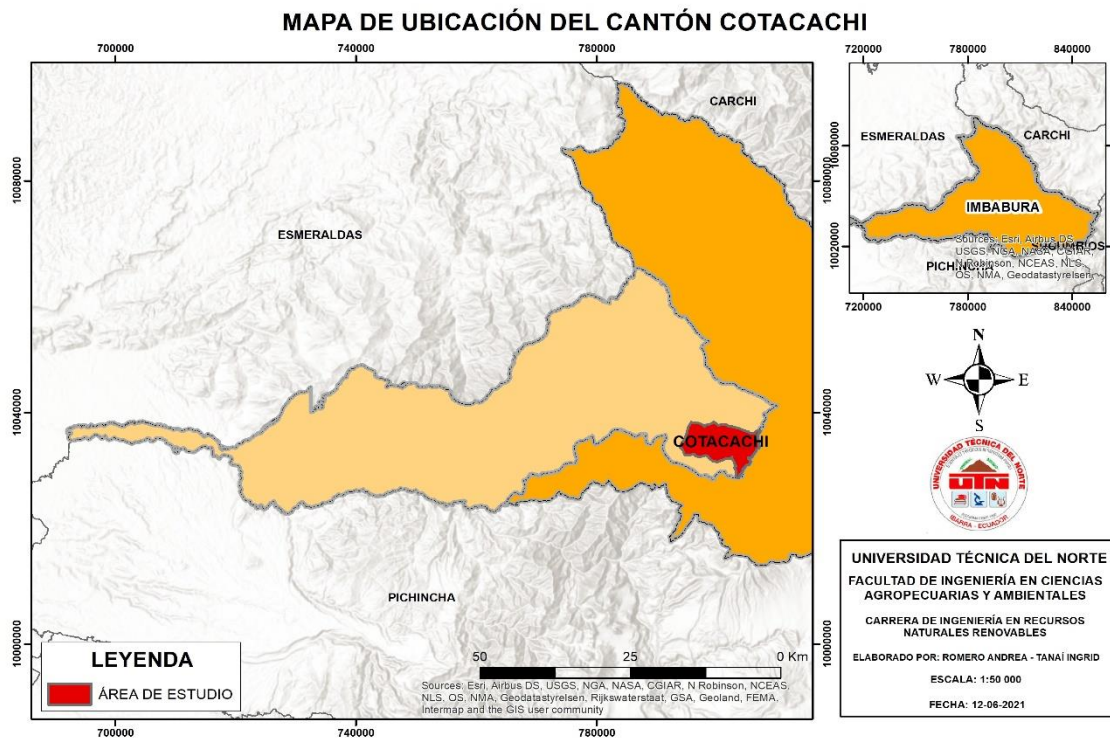


Figura 6. Mapa de ubicación del cantón Santa Ana de Cotacachi

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterización del afluente

El efluente seleccionado para la operación de los humedales artificiales fue tomado en la salida del pozo séptico de la vivienda con aguas residuales domésticas. La recolección de muestras de agua del estudio se estableció de acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN) 2176:2013 en relación con las técnicas de muestreo que se establecen y con la NTE INEN 2169:2013 en donde se establece que se debe llenar los frascos completamente y taparlos de tal manera que no exista aire sobre la muestra, limitando así la interacción de la fase gaseosa y la agitación durante el transporte para su posterior análisis dentro del Laboratorio de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I). En la Tabla 1 se exponen los parámetros de estudio y su respectivo método de análisis de acuerdo con el laboratorio.

**Tabla 1.** Parámetros de estudio

Parámetro	Unidad	Método
DBO <sub>5</sub>	mg/L	Standard Methods 5210 D
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	Standard Methods 25400
<i>E. coli</i>	UFC/ 100 ml	Standard Methods 9222 J

*Nota.* Metodología establecida del Laboratorio de EMAPA-I

De acuerdo con las características hidráulicas, se definió el caudal medio diario con base a la información proporcionada del servicio de agua potable suministrada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Santa Ana de Cotacachi, que de acuerdo con López & Rodríguez (2016), se toma el consumo promedio mensual de los últimos meses de la vivienda, dividido en relación con el número de días del mes para la obtención del valor de consumo diario. Los datos obtenidos del consumo de agua por meses se encuentran detallados en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Consumo mensual de agua

Periodo	Noviembre- Diciembre	Diciembre- Enero	Enero- Febrero	Febrero- Marzo	Marzo- Abril	Abril- Mayo	Promedio
Consumo [m <sup>3</sup> /mes]	5	5	7	7	25	4	8.83

El valor de consumo promedio de la vivienda equivale a  $8.83 \frac{m^3}{día}$

El consumo del valor medio diario se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo medio diario} = \frac{\text{Consumo medio mensual} \left[ \frac{m^3}{\text{día}} \right]}{30}$$

### 3.2.2 Plantas utilizadas

Para el desarrollo de los humedales artificiales se propuso la utilización de las especies alfalfa (*Medicago sativa*), achira (*Canna indica*) y cartucho (*Zanteteschia aethiopica*). Estas dos últimas especies presentan eficiencias significativas dentro de la remoción de contaminantes de un 80 a 90% (Hernández, 2017; Herrera, 2021). Mientras que la alfalfa (*Medicago sativa*) se optó por las testistas por ser una especie de fácil propagación y adaptación de sembrío en cualquier época del año, con la finalidad de conocer si presenta una eficiencia de remoción significativa dentro de la aplicación de humedales artificiales. Las especies se mantuvieron un periodo de crecimiento alrededor de 5 meses para la adaptación a los humedales artificiales.

Una vez seleccionado el tipo de plantas a sembrar, se calcula el número de plantas necesarias dentro del sistema en función del área total de los humedales, la densidad de plantas en los humedales para cada tratamiento es del orden de 3 a 4 plantas/m<sup>2</sup> (Vidal & Hormazábal, 2018). Además, la elección de las especies se realizó teniendo en cuenta características anatómicas iguales de cada especie con una densidad de siembra de 6 ejemplares a 10 cm de distancia en cada tratamiento.

### 3.2.3 Periodo de Adaptación

Dentro del establecimiento de las plantas se mantuvo un periodo de adaptación durante un lapso de cuatro semanas, con la finalidad de establecer un proceso progresivo de adaptación de las plantas al agua residual doméstica (ARD), evitando posibles impactos negativos en el desarrollo de las especies (González & Hernández, 2020). En la Tabla 3 se muestra los porcentajes de riego durante las cuatro semanas.

**Tabla 3.** Aumento Gradual de ARD

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

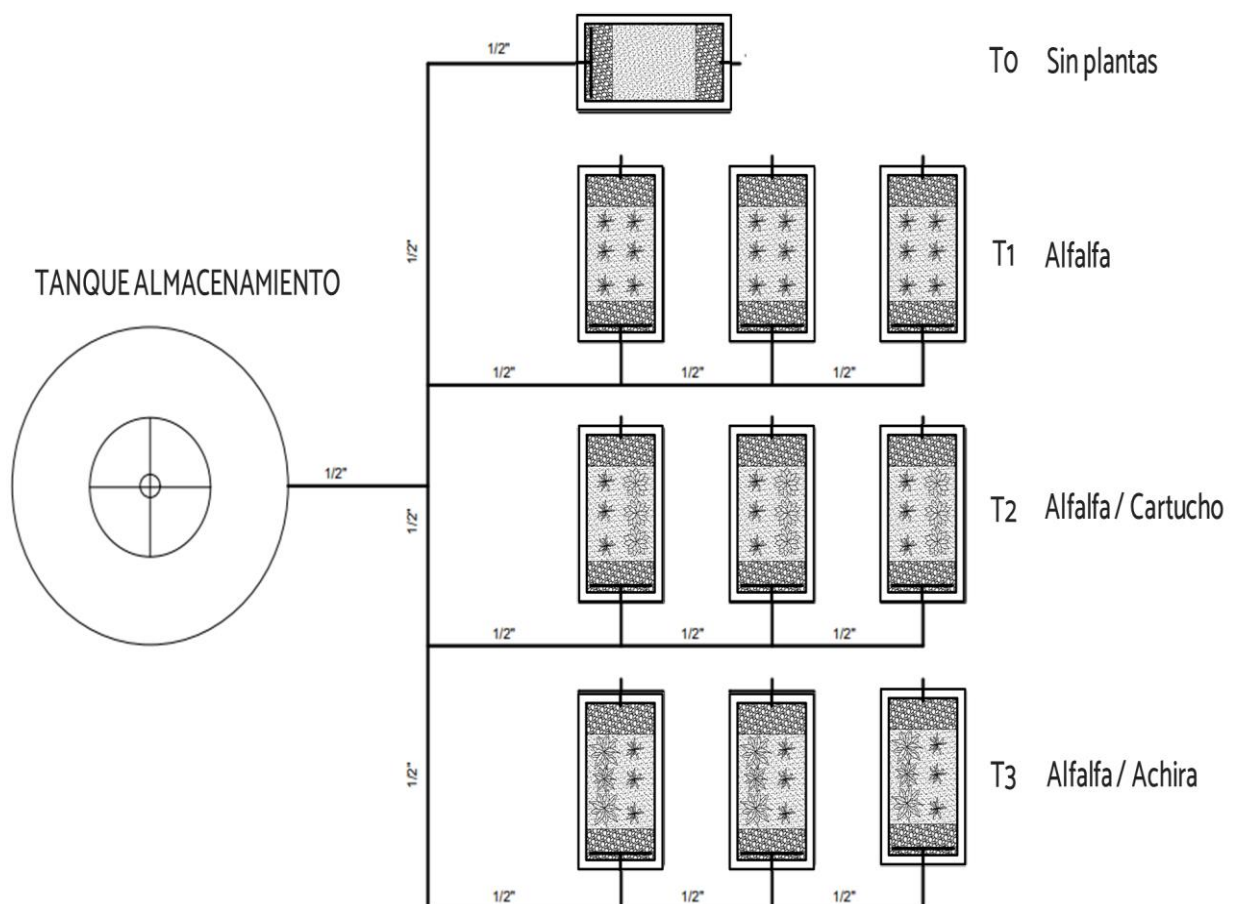
Nota. Adaptado de (González & Hernández, 2020)

### 3.2.4 Diseño Experimental

La presente investigación fue de carácter experimental y estuvo sujeta a un Diseño Completamente al Azar (DCA); se realizaron tres tratamientos y un testigo control; a cada tratamiento se le efectuaron tres réplicas, con un total de 10 unidades experimentales, como se presenta en la Tabla 4. Con respecto a las combinaciones de cada tratamiento, el sustrato fue el mismo para todos, solamente variaron las especies. Para los humedales se aprovechó el agua residual doméstica del pozo séptico proveniente de la vivienda.

**Tabla 4.** Niveles y tratamientos

Nivel	Tratamiento
T0	Tratamiento control, sin plantas
T1	<i>Medicago sativa</i>
T2	<i>Medicago sativa</i> y <i>Canna indica</i>
T3	<i>Medicago sativa</i> y <i>Zantedeschia aethiopica</i>

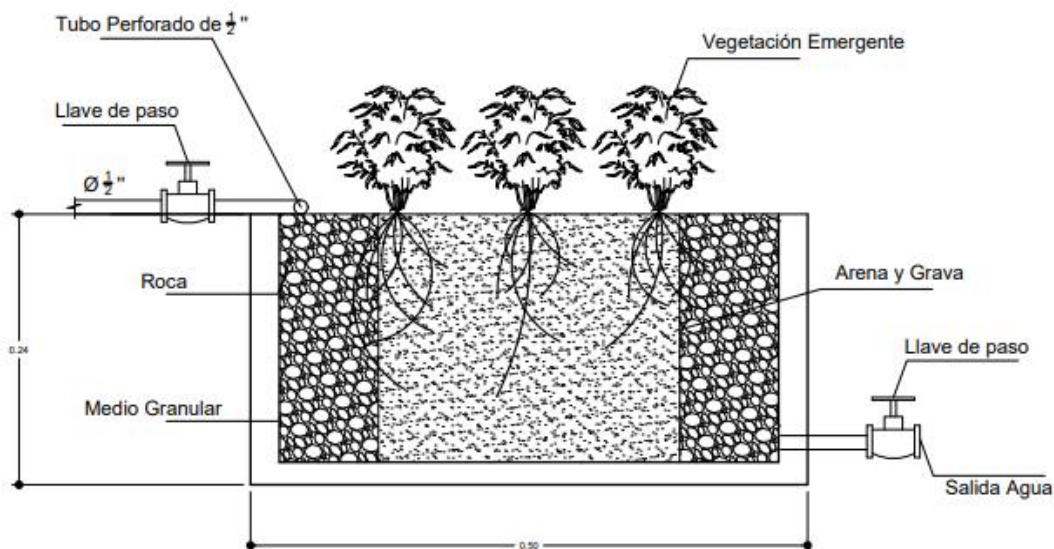


**Figura 7.** Diseño Experimental

### 3.2.5 Diseño de Humedales

Para el diseño y construcción de cada humedal artificial se tomó en cuenta la metodología establecida a partir de Zúñiga & Feriz (2021).

Dentro de la implementación de los humedales se utilizaron 10 canecas las cuales tenían las siguientes dimensiones: 50 cm de largo, 28 cm de ancho y 24 cm de altura. Cada humedal contenía roca, grava y arena que fueron aplicados por capas con el orden de mayor a menor tamaño con la final de proporcionar una porosidad del 35% como lo recomienda la Agencia de Protección Ambiental (1993). En la base de los humedales se realizó una excavación de tierra hasta obtener una pendiente del 1% con la finalidad de tener un flujo continuo (López, 2018). De acuerdo con Lobato (2018), es recomendable considerar una proporción de largo ancho 2:1 para la reducción de DBO<sub>5</sub>. Además, en la parte inferior de cada humedal se encuentra una salida que es controlada con una válvula para la toma de muestras del agua tratada (Mendoza & Párraga, 2021).



**Figura 8.** Diseño humedal

### 3.2.6 Montaje del Sistema

Para el montaje del sistema se colocó rocas tanto en la entrada como la salida, con la finalidad de evitar taponamientos y obstrucción dentro del sistema (Mendoza & Párraga, 2021). Se aplicó en la base una capa de grava, seguido de una capa de arena de 5 cm de espesor encima y una capa de tierra de 5 cm de espesor, el ingreso del agua residual

doméstica generada de la vivienda se realizó a través de una tubería de PVC de ½, facilitando su ingreso al sistema de tratamiento, en la parte inferior se colocó una válvula para el control de la salida del efluente tratado (Torres et al., 2018). Se aplicó un sistema con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto en la entrada como salida con la finalidad de obtener condiciones de flujo uniformes (Castañeda, 2018). Las especies *Medicago sativa*, *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica* fueron sembradas en el sistema dos semanas antes de realizar el análisis para su debida adaptación y estabilización en el medio (Castro et al., 2018). Respecto a las raíces de las especies utilizadas estas fueron colocadas aproximadamente 5 cm debajo de la capa de tierra del humedal, se saturó con agua hasta la superficie del humedal para mantener el suelo húmedo durante el periodo de retención y el efluente fue recolectado a nivel del suelo (Aguilar, 2020).

### **3.2.7 Monitoreo del Sistema de Humedales y Evaluación del Desempeño**

Una vez dosificada el agua residual de manera intermitente en cada humedal, la toma de muestras fue realizada en los dos tiempos de retención hidráulico de 7 y 15 días. En el periodo del día uno hasta el día 15 el humedal fue alimentado y vaciado diariamente, tomando únicamente la muestra del día 7 y 15 a la salida de cada uno de los humedales, completando un total de veinte muestreos. En cada una de las muestras se tomó un volumen de 3L en total para el análisis de los parámetros, según los requerimientos del laboratorio EMAPA-I y EMAPA-O.

Se realiza una homogenización del agua residual del afluente por medio de agitación dentro del tanque de almacenamiento para la alimentación de los humedales artificiales, lo cual consiste en amortiguar por laminación las variaciones de caudal, con la finalidad de conseguir un caudal lo más constante posible (Pallarés, 2016). Respecto a la cantidad de riego aplicado a cada uno de los tratamientos este correspondió a un valor de 3.5L mismo que fue establecido a partir del área superficial de los contenedores, el riego se realizó en horario fijo establecido de acuerdo con las actividades generadas dentro de la vivienda, correspondiente a las 7:00 am en la mañana y en la tarde a las 18:00 pm consideradas horas pico; a su vez el riego fue de manera intermitente dentro de cada humedal permitiendo una mejor irrigación en los sistemas.

### **3.2.8 Cálculo de Eficiencia de Remoción**

El cálculo de eficiencia de remoción se lo realizó a cada uno de los parámetro de estudio, es decir del DBO<sub>5</sub>, SST y *E.coli*; en cuanto al parámetro de pH no se aplicó la eficiencia de remoción debido a que se considera como un parámetro de control. El cálculo de la eficiencia de remoción se dio a través de la aplicación de una relación matemática, que permite analizar el comportamiento de las concentraciones iniciales del afluente en relación con los resultados de los análisis de laboratorio después del paso por el sistema de depuración de aguas residuales (efluente), (Rodríguez & Durán, 2006).

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

**Donde:**

*ER*= Eficiencia de remoción

*C<sub>e</sub>*= Concentración inicial del parámetro (afluente)

*C<sub>s</sub>*= Concentración final del parámetro (efluente)

### **3.2.9 Análisis Estadístico**

Dentro del análisis estadístico se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks con un nivel de significancia del 95% (p=0.05) para verificar la normalidad de los datos en las muestras tomadas. Posteriormente, se determinó la diferencia significativa entre los tratamientos T0, T1, T2 y T3 para la remoción de contaminantes evaluando los siguientes parámetros: DBO<sub>5</sub>, SST y *E. coli*, mediante la aplicación de la prueba estadística de ANOVA con un nivel de significancia del 95%. Posteriormente se aplicó la prueba estadística de Tukey para conocer si existe una similitud o diferencia entre los tratamientos.

### **3.2.10 Elaboración de Guía Técnica**

La guía técnica es un documento que va dirigido al público en general sobre conocimientos técnicos de algún área. Una adecuada documentación proporciona información específica sobre las ventajas y desventajas, características y funcionalidades, de igual manera los beneficios de dicho proyecto (Universidad Nacional Autónoma de México, 1994).

Dentro de la guía se dará a conocer acerca del manejo y potencial de las especies en estudio para el tratamiento de aguas residuales domésticas, a través de la descripción de

procesos que se llevaron a cabo para la implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Elementos de la guía técnica de encuentran a continuación:

- Carátula del procedimiento
- Presentación
- Índice del manual
- Introducción del manual
- Objetivos del manual
- Procedimientos
- Resultados
- Conclusiones
- Glosario
- Bibliografía

### 3.3 Materiales y Equipos

A continuación, se detallan los materiales, equipos y software utilizados para la realización del proyecto (Tabla 5).

**Tabla 5.** Materiales y equipos

<b>Materiales</b>	<b>Equipo</b>	<b>Software</b>
Grava	Flexómetro	Infostat
Arena		
Contenedores de plástico	Computador	SPSS
Plántulas de <i>M. sativa</i>	Cámara digital	
Plántulas de <i>C.indica</i>		
Plántulas de <i>Z. aethiopica</i>		
Codos		
Tubos PVC		
Válvulas		



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la fase experimental de la presente investigación se obtuvieron los siguientes resultados, lo cuales se encuentran relacionados con los objetivos planteados.

#### 4.1 Caracterización de Agua Residual

Los parámetros analizados para la caracterización del afluente fueron DBO<sub>5</sub>, SST, *E. coli* y pH, las muestras de agua residual fueron recolectadas directamente del afluente a tratar (pozo séptico) y envasadas en frascos según las indicaciones establecidas del laboratorio EMAPA-I. De acuerdo con los parámetros analizados, se puede observar que no existe una carga contaminante alta en relación con lo que establece la normativa ambiental vigente dentro del Acuerdo Ministerial 097 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Anexo 1, Tabla 9 (Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce). En la Tabla 6 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del afluente:

**Tabla 6.** Caracterización de agua residual doméstica

Parámetros	Unidades	Concentración inicial del agua residual doméstica	TULSMA
DBO <sub>5</sub>	mg/L	100	100 mg/L
SST	mg/L	67	130g/L
<i>E.coli</i>	UFC/100ml	548 x 10 <sup>3</sup>	-
pH	-	7	6-9

De acuerdo con las características hidráulicas del afluente se tomó en cuenta el cálculo del caudal mediante el consumo medio diario de la vivienda en la cual se tiene como resultado lo siguiente:

$$\text{Consumo medio diario} = \frac{\text{Consumo medio mensual} \left[ \frac{m^3}{\text{día}} \right]}{30}$$

$$\text{Consumo medio diario} = \frac{8.83 \left[ \frac{m^3}{\text{día}} \right]}{30} = 0.29 \left[ \frac{m^3}{\text{día}} \right]$$

El caudal medio mensual es 8.83 m<sup>3</sup>/ mes siendo un promedio de cinco meses de consumo, por lo cual al dividir al número de días obtuvimos un consumo medio diario de 0.29 m<sup>3</sup>/día.

Los resultados obtenidos realizados en la vivienda de estudio se encuentran bajo los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente, además el caudal fue establecido a partir del consumo mensual de los últimos cinco meses de la vivienda para poder obtener el consumo medio diario. En el estudio realizado por Hernández (2017), los resultados iniciales obtenidos del afluente sobrepasan los límites máximos permisibles los cuales disminuyeron con la aplicación de los humedales artificiales y el caudal fue establecido a partir del afluente y efluente.

## 4.2 Análisis de resultados

### 4.2.1 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos

En la Tabla 7 se observan los parámetros de estudio por tratamiento, estos valores corresponden a las medias de las réplicas de los tres tratamientos del primer análisis realizado en el laboratorio EMAPA-I y los porcentajes de remoción por cada tratamiento.

**Tabla 7.** Resultados análisis de laboratorio día 7

Parámetros	Unidad	LMP	A.R inicial	T1	% Remoción	T2	% Remoción	T3	% Remoción
DBO <sub>5</sub>	mg/L	100	125	50.66	59.5	29.6	76.3	40.6	67.5
SST	mg/L	130	106.4	59.6	44	52.7	50.4	62.5	41.3
<i>E.coli</i>	UFC/ 100ml	----	492x10 <sup>3</sup>	6752	98.6	6283	98.7	6800	98.6

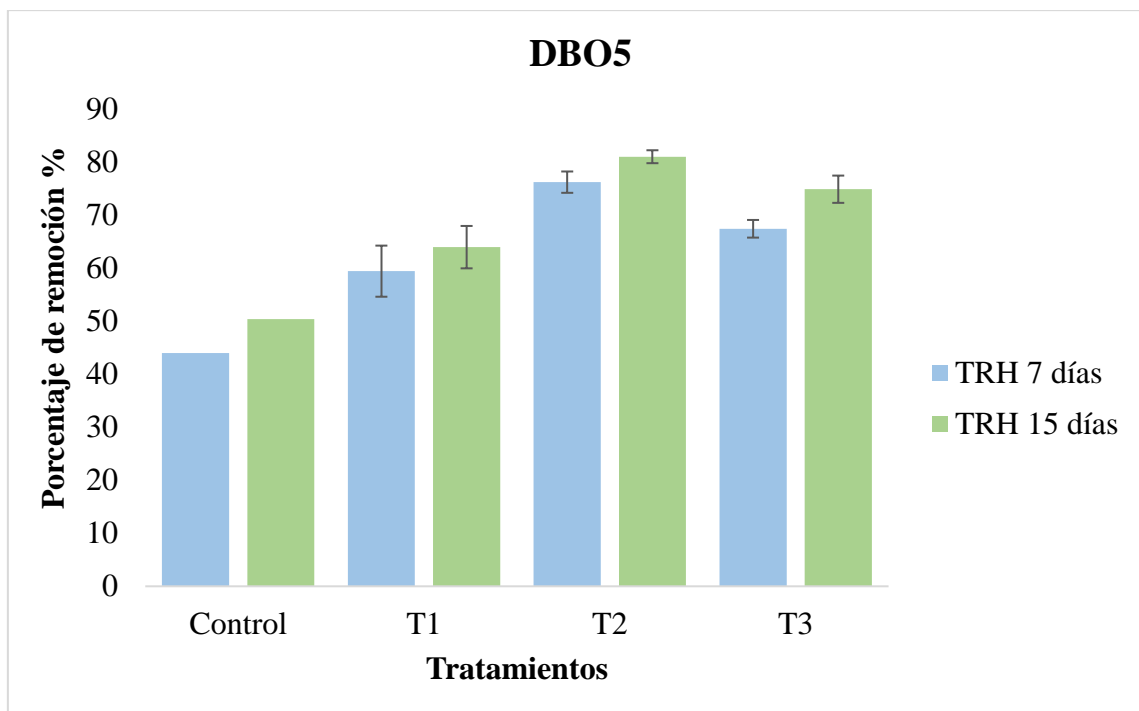
La Tabla 8 nos indica los valores correspondientes a las medias de las réplicas de los tres tratamientos del segundo análisis a los 15 días, realizado en el laboratorio EMAPA-O, además se muestran los porcentajes de remoción alcanzado por cada tratamiento.

**Tabla 8.** Resultados análisis de laboratorio día 15

Parámetros	Unidad	LMP	A.R inicial	T1	% Remoción	T2	% Remoción	T3	% Remoción
DBO <sub>5</sub>	mg/L	100	125	45	64	23.6	81.1	31.3	74.9
SST	mg/L	130	106.4	62.43	41.3	40.6	61.9	52.3	50.8
<i>E.coli</i>	NMP/ 100ml	2000	92080	9413.	89.9	4673.	94.9	6120	93.4
				3		3			

### 4.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno

Se analizó el porcentaje de remoción de los dos TRH en la aplicación de los tres tratamientos más el control, teniendo los siguientes resultados como se observa a continuación en la Figura 9.



**Figura 9.** Porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub>

En la figura 9, se observa los porcentajes de remoción de los dos tiempos de retención hidráulica aplicados para cada réplica de los tratamientos y el testigo, existiendo una desviación estándar baja para cada tratamiento. Se valora que el T2 correspondiente al humedal con las especies *Medicago sativa* y *Zantedeschia aethiopica* presentó un mayor porcentaje en relación con los demás tratamientos, obteniendo una remoción del 76.3% para un TRH de 7 días y de un 81.1% para un TRH de 15 días, aumentando su remoción en un 4.8%. De igual manera el T3 reporta una eficiencia de remoción con valores del 67.5% a un TRH de 7 días y un 74.9% a un TRH de 15 días.

En el análisis estadístico se aplicó un ANOVA de doble vía empleando las variables Tratamientos y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), obteniéndose como resultado para la variable Tratamiento un valor de  $p = <0.0001$ , existiendo una diferencia significativa dentro de los tratamientos aplicados, en cuanto al TRH se obtiene un valor de  $p = 0.0950$  dando a conocer que no existe una diferencia significativa dentro de los dos tiempos de retención hidráulica (7 y 15 días). La interacción de Tratamiento por TRH arrojó un valor de  $p = 0.3844$ , manifestando que no existe una diferencia significativa para la remoción de DBO<sub>5</sub>.

De acuerdo con Morales et al (2013), concluyen que esta especie ornamental *Zantedeschia aethiopica* presenta una eficiencia de remoción en la aplicación de humedales subsuperficiales que fluctúa entre el 76-82% para este parámetro. Por otra

parte Hernández (2017), señala una eficiencia de remoción del 85% con la especie *Canna indica* al igual que Sandoval et al (2019), indicando una eficiencia de remoción del 86%. De igual manera dentro del T3 se obtuvo una eficiencia de remoción del 74,9% en un THR de 15 días obteniendo una similitud en cuanto la eficiencia reportada dentro de los estudios para la especie *Canna indica* en conjunto con *Medicago sativa*. La evaluación de la especie *Medicago sativa* dentro del T1 se puede observar que posee una menor eficiencia en cuanto a las demás especies con una remoción del 50-60% para DBO<sub>5</sub>. Por lo cual en los tratamientos T2 y T3, la especie *Medicago sativa* al establecerse dentro de tratamientos mixtos se puede evidenciar que su potencial de remoción aumenta, principalmente con la especie *Zantedeschia aethiopica*.

La utilización de especies de tipo ornamental cada vez ha ido en aumento debido al mejoramiento escénico, se destaca además la construcción de humedales piloto en México en donde para el tratamiento de aguas residuales con una concentración de 115.5 mg/L de DBO<sub>5</sub> se obtuvo resultados de remoción entre 80.4 y 83.3% (Rodríguez et al., 2019), datos que contrastan con estudios realizados por otros autores en donde también se han implementado estos sistemas de flujo subsuperficial obteniendo porcentajes de remoción de 95.44%, 100% y 99.36% siendo la especie *Canna indica* la que mejores resultados arrojó (Acosta et al., 2016), lo cual dentro del presente estudio se constata que la utilización de especies ornamentales mejora la eficiencia de remoción para la disminución de la carga contaminante inicial.

En lo concerniente al DBO<sub>5</sub> en la tabla 9 se observa que la prueba estadística aplicada de Tukey determinó la existencia de tres grupos homogéneos, por lo cual los tratamientos tienen diferente depuración de materia orgánica. Es decir que los tratamientos T2 y T3 son homogéneos y difieren significativamente de los tratamientos T1 y T0 en los dos tiempos de retención hidráulica. Por lo cual el mejor tratamiento con una mayor eficiencia de remoción de contaminantes dentro de los dos tiempos de retención hidráulica es T2 por el resultado de sus medias.

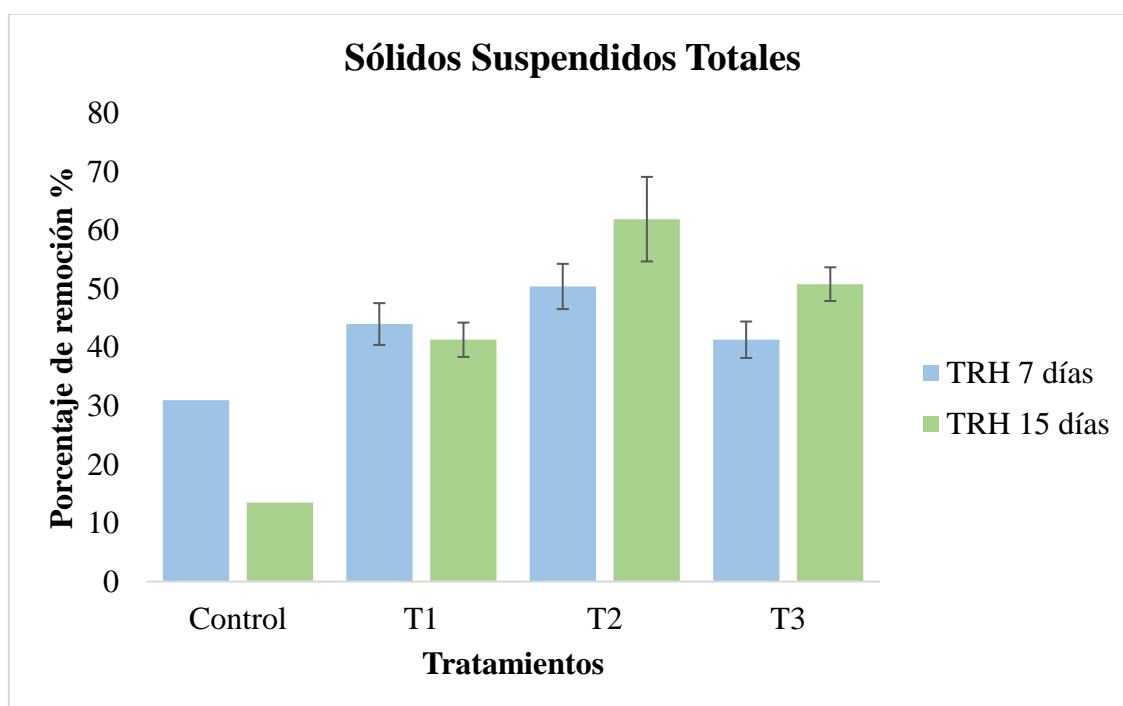
**Tabla 9.** Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH DBO<sub>5</sub>

<b>Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.31778</b>					
<i>Error: 9.7778 gl: 12</i>					
Tratamiento	TRH	Medias	N	E. E	Grupo
2	15	23.67	3	1.81	A
2	7	23.67	3	1.81	A
3	15	31.33	3	1.81	A
3	7	31.33	3	1.81	A
1	15	45.00	3	1.81	B
1	7	48.33	3	1.81	B
0	15	62.00	1	3.13	C
0	7	70.00	1	3.13	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

### 4.2.3 Sólidos Suspendidos Totales

En la Figura 10 se presentan los valores de SST correspondientes a cada tratamiento con sus respectivas repeticiones y en los dos tiempos de retención hidráulica.



**Figura 10.** Porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Totales

En cuanto a parámetros físicos en la muestra inicial se analizó la presencia de Sólidos Suspendidos Totales obteniendo un valor de 106.4 mg/L, dato que fue utilizado en el cálculo de porcentaje de remoción de cada uno de los tratamientos incluido el testigo. En

las muestras analizadas el valor de este parámetro disminuyó debido al proceso de filtración y acción de las especies utilizadas dentro del estudio, generando como resultado que T1 y T0 presentaron los porcentajes más bajos de remoción, mientras que T2 y T3 presentan porcentajes más elevados, siendo T2 correspondiente al humedal de *Medicago sativa* y *Zantedeschia aethiopica* el mejor tratamiento al poseer un porcentaje superior al 50% sobre todo en el TRH 15 días, el cual que arrojó un valor de 61.9%.

Se analizó estadísticamente mediante la aplicación de un ANOVA de doble vía empleando las variables Tratamientos y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), obteniéndose como resultado para la variable Tratamiento un valor de  $p = <0.0001$ , existiendo una diferencia significativa dentro de los tratamientos aplicados, en cuanto al TRH se obtiene un valor de  $p = 0.8675$  dando a conocer que no existe una diferencia significativa dentro de los dos tiempos de retención hidráulica (7 y 15 días). En cuanto a la interacción de Tratamiento por TRH arrojó un valor de  $p = 0.0003$ , manifestando que si existe una diferencia significativa para la remoción de SST.

El T3 correspondiente a las especies *Medicago sativa* y *Canna indica* presentó porcentajes valores de remoción de un 40 a 50%. Dentro del estudio de Hernández (2017), se presenta el análisis de la especie *Canna indica* obteniendo porcentajes de remoción de 88.77%, de igual manera en otros estudios realizados en sistemas a escala piloto para remoción de SST se han obtenido porcentajes superiores al 60% (Ortiz, 2018). Esto se debe a que se tiene un mayor tiempo de monitoreo dentro del estudio de los parámetros, de igual manera se evidencia un mayor porcentaje de remoción en el estudio realizado por Martínez (2014), correspondiendo a un valor de remoción del 90%. Estos valores difieren dentro del presente estudio debido a que solamente se proyectó un tiempo de estudio de 15 días.

En cuanto a la especie *Zantedeschia aethiopica* implementada dentro del estudio realizado por Jamanca (2017), se evidencia un porcentaje de remoción 49.58% el cual es menor a los porcentajes obtenidos en este estudio, aunque la diferencia no es muy significativa. Los porcentajes de remoción varían según la densidad de las especies como se demostró en la investigación realizada por Ramos (2019), en donde *Zantedeschia aethiopica* fue sembrada en 3 humedales en diferentes densidades y todos presentaron una remoción  $>85\%$ , mientras que en humedales a escala laboratorio o piloto los niveles de remoción de contaminantes pueden ser menores, dentro de este estudio con humedales

piloto se evidencia que el T2 fue el que presentó mejor porcentajes de remoción entre un 50% y 62%.

En las Tabla 10 se puede apreciar que la prueba estadística aplicada de Tukey determinó que existen cuatro grupos que difieren significativamente en cuanto a tratamiento por TRH, siendo el T2 con un TRH de 15 días más eficiente debido a su media para la remoción de SST.

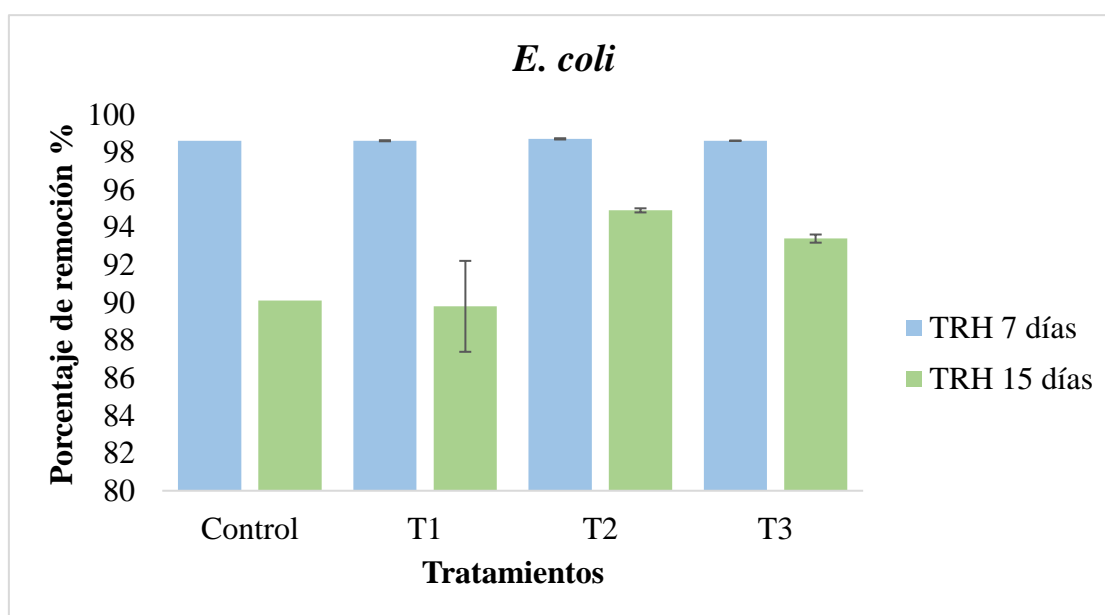
**Tabla 10.** Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH SST

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=12. 03066						
Error: 11.0483 gl: 12						
Tratamiento	TRH	Medias	N	E.E	Grupo	
2	15	40.57	3	1.92	A	
3	15	52.30	3	1.92	A	B
2	7	57.73	3	1.92	B	
1	7	59.60	3	1.92	B	
1	15	62.43	3	1.92	B	C
3	7	62.50	3	1.92	B	C
0	7	73.60	1	3.32	C	
0	15	92.00	1	3.32	D	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### 4.2.4 *Escherichia coli*

En la Figura 11 se presentan los valores de *E. coli* correspondientes a cada tratamiento con sus respectivas repeticiones y en los dos tiempos de retención hidráulica.



**Figura 11.** Porcentajes de remoción de *E. coli*

En el gráfico correspondiente a la remoción de *E. coli* se evidencia que hay un porcentaje de remoción muy alto en todos los tratamientos y en los dos tiempos de retención hidráulica, en ambos casos los porcentajes de remoción se presentan desde el 89.9% pero al igual que en los otros parámetros el T2 fue el que mayor eficiencia presentó al poseer porcentajes de remoción de 98.7% y 94.9% siendo el TRH de 7 días el más alto. Esto se debió a que la principal vía de eliminación de *E. coli* en humedales artificiales está relacionada con procesos físicos como la sedimentación y retención de biopelículas adheridas al sustrato, además que los procesos biológicos como la depredación y la competencia por parte de microorganismos como los protozoos también contribuyen a alcanzar una eficiencia del 100% (Headley et al., 2013). Otro parámetro de diseño más eficaz para la eliminación de dichos microorganismos es un sustrato poroso, que consta de rocas, grava o lodo. Este mecanismo junto con las raíces de las especies y la gravedad permite que se asiente gran cantidad de sólidos microbianos adheridos (Mairi et al., 2012).

Otros autores como Morató et al. (2014), obtuvieron eficiencias de remoción del 99% para *E.coli* , debido al tiempo de retención hidráulica (TRH) que de acuerdo con Wu et al (2016), destacan la importancia del TRH en la eliminación de bacterias indicadoras de contaminación, debido a que se aumenta la exposición de las bacterias a procesos de eliminación como la sedimentación, la adsorción de materia orgánica, la depredación y el impacto de las toxinas de microorganismos y las plantas, en base a esto se evidenció que los porcentajes obtenidos de *E. coli* en el estudio presentan similitudes con los porcentajes de otros estudios.

En los reportes de eficiencia de remoción para parámetros microbiológicos de diferentes autores se ha demostrado que no existen porcentajes por debajo del 90% esto se demuestra en el estudio realizado por (Cabrera & Ojeda, 2021), donde se obtienen eficiencias del 99, 97% lo cual indica que el agua después de pasar por un humedal es óptima para realizar una descarga a un cuerpo receptor y también ser utilizada en el sector agrícola según los resultados obtenidos. La altitud puede llegar a ser uno de los factores que pueden llegar a influir dentro de la remoción de contaminantes presentes en agua residual, pero se ha demostrado que los humedales son eficientes para la remoción de *E. coli* en alturas sobre los 2400 msnm empleando tiempos de retención hidráulicos entre 5 y 9 días proporcionando eficiencias de un 99% (Padrón, 2018), demostrando así que los porcentajes de remoción obtenidos en este estudio son similares a los estudios realizados



con anterioridad, ya que se presenta una remoción que sobrepasa el 90% en cada uno de los tratamientos aplicados en los dos tiempos de retención hidráulica establecidos de 7 y 15 días.

En la Tabla 11 se puede apreciar que la prueba estadística aplicada de Tukey determinó la existencia de un grupo homogéneo T3 y T1, diferenciándose significativamente de T2 y T0, siendo T2 el tratamiento con mayor eficiencia de remoción para un TRH de 7 días.

**Tabla 11.** Prueba Tukey *E. coli* a los 7 días

<b>Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=13, 00076</b>				
<i>Error: 14. 1044 gl: 6</i>				
Tratamiento	Medias	N	E.E	Grupo
T2	6283.33	3	70.77	A
T3	6752.67	3	70.77	B
T1	6800.00	3	70.77	B
T0	7680.00	1	122.58	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

En la Tabla 12 se identifica la existencia de dos grupos homogéneos, siendo el T2 el más eficiente para un THR de 15 días debido al valor de media.

**Tabla 12.** Prueba Tukey *E. coli* a los 15 días

<b>Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4467. 69436</b>				
<i>Error: 1665655. 5556 gl: 6</i>				
Tratamiento	Medias	N	E.E	Grupo
T2	4673.33	3	745.13	A
T3	6120.00	3	745.13	A B
T0	9080.00	1	1290.6'	A B
T1	9413.33	3	745.13	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

### 4.3 Guía Técnica

En el cumplimiento del último objetivo de la investigación se elaboró una guía técnica del uso y eficiencia de los humedales artificiales (Anexo 3) con información relevante del estudio presentando sobre la factibilidad, potencial y rendimiento en cuanto a la eficiencia de remoción de las especies de estudio.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

La carga contaminante inicial del afluente con los parámetros de estudio DBO<sub>5</sub>, SST y *E. coli*, presentó una notable disminución de su concentración una vez tratada el agua residual en los humedales artificiales con las tres especies establecidas *Medicago sativa*, *Zantedeschia aethiopica* y *Canna indica* en el tiempo de estudio de 15 días, obteniendo valores que se ajustan a los Límites Máximos Permisibles que establece la normativa legal vigente en Ecuador para la descarga de aguas residuales en cuerpos hídricos.

La evaluación de la eficiencia de remoción de la especie a prueba dentro del estudio, *Medicago sativa* presentó valores de remoción media dentro de los parámetros de DBO<sub>5</sub> y SST, mientras que para *E. coli* el porcentaje fue altamente eficiente en los dos TRH. Se concluye además que el emplear un caudal intermitente permitió mantener las propiedades morfológicas de la especie en la aplicación de humedales artificiales.

Se observó que la mayor disminución de los parámetros de estudio tanto fisicoquímicos y microbiológicos tienen una mejor remoción en un TRH de 15 días, debido a que el agua se encuentra en mayor contacto con el sustrato y las especies vegetales, siendo el T2 correspondiente a las especies *Medicago sativa* y *Zantedeschia aethiopica* el más viable y con mayor remoción para su implementación.

#### **4.2 Recomendaciones**

Se recomienda someter la especie *Medicago sativa* propuesta dentro de la investigación a un mayor tiempo de estudio para determinar si aumentaría su eficiencia de remoción dentro de la aplicación de humedales artificiales y el análisis de otros parámetros con un riego intermitente debido a que mantiene sus características morfológicas.

Combinar la tecnología de humedales artificiales con tratamientos primarios alternos de tipo físicos y químicos para evitar la inhibición del funcionamiento de los humedales artificiales con el fin de crear sistemas más eficientes en términos de remoción de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*.

Tener en cuenta las condiciones climatológicas tropicales en relación con el periodo de precipitaciones abundantes, implementando una estructura de protección para evitar la saturación del humedal y no afectar su funcionamiento.

## REFERENCIAS

- Acosta, C., Silván, R., & Ocaña, G. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias Y Agropecuarias*, 5, 1–20.
- Aguilar, D. (2020). Diseño de un humedal artificial de flujo sub-superficial para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Internacional SEK. *Universidad Internacional SEK*, 1–58.
- Araya, P. (2017). *Reducción de coliformes fecales en humedales artificiales de flujo subsuperficial*. Universidad del Bío-Bío.
- Arias I., C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17–24. <https://doi.org/10.18359/rcin.1321>
- Arteaga, V., Quevedo, A., Del Valle, D., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. (2019). State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 319–342. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Asprilla, W., Ramírez, J., & Rodríguez, D. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Ingenierías USB Med*, 11(1), 65–73. <https://doi.org/10.21500/20275846.4558>
- Benítez, E., Granados, B., Roa, M., Rodríguez, S., & Vargas, A. (2016). *Plantas Acuáticas (macrófitas) Como Bioindicadores de la Calidad del Agua del Caño Palomero de Yopal*. Fundación Universitaria de San Gil.
- Bermeo, E., & Tigse, W. (2019). *Islas Flotantes Artificiales con achira (Canna indica), como alternativa para la remoción de Nitratos y Fosfatos de agua procedente del rio Cutuchi*. Universidad Técnica Cotopaxi.
- Bermeo, M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales*.

Bernal, D., Cardona, D., Galvis, A., & Peña, M. (2002). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Universidad Del Valle*, 1995, 19–27.

Bernal, O. (2014). Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domésticas en el campus UMNG-Csjicá con fines de reusó. *Universidad de Bogotá*.

Blanco, I. (2014). *Aplicación de humedales artificiales para la depuración de purines de granjas porcinas*. Universidad de León.

Burgos, B., López, R., & Ramírez, A. (2018). La revolución verde, el desarrollo agrícola, la industria y la economía en Ecuador. Provincia El oro. Estudio de caso. *Revista Científica Agroecosistemas*, 2(6), 178–184.

Cabrera, P. A. M., & Ojeda, C. A. (2021). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial horizontal para tratar los efluentes de un colegio rural en Colombia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(3), 3488–3499. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-056>

Carvajal, A., Zapattini, C., & Quintero, C. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *DisTecD. Diseño y Tecnología Para El Desarrollo*, 5, 88–108.

Castañeda, L. (2017). Revisión de principales investigaciones realizadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 25(1), 83–89.

Castañeda, L. (2018). Revisión de principales investigaciones realizadas en Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamerica. *ResearchGate*.

Castro, L., Pérez, Y., Mariño, C., & Cruz, M. (2018a). Eficiencia de tratamiento de las aguas domésticas mediante HAFSV con la especie *Zantedeschia aethiopica* en Viquez – Lurigancho (Perú). *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(2), 16–28. <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i2.1094>

Cervantes, S. P., Londoño, Y. A., Gutiérrez, F. R., & Peñuela, G. A. (2017). Evaluación de humedales artificiales de flujo subsuperficial en la remoción de diferentes

concentraciones de ibuprofeno empleando *Cyperus papyrus*. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(5), 105–116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-07>

Código Orgánico de Organización Territorial Descentralizado. (2019). *Código Orgánico de Organización Territorial Descentralizado (COOTAD)*.

Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Código Orgánico del Ambiente* (p. 40).

Constitución del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*.

Coyago, L. D. (2020). *Determinación De Organoclorados Por Bioacumulación En Dos Especies Vegetales (Lactuca Sativa L) Y (Medicago Sativa) En Procesos De Fitorremediación En Suelos Agrícolas En La Parroquia De Perucho Del D.M.Q. En El Periodo De Marzo 2019 – Febrero 2020*.

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

Delgado, D. (2015a). La alfalfa (*Medicago sativa*): origen, manejo y producción. *Conexagro JDC*, 5 (1), 27–43.

Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14 (1), 78–97.

Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Revista Química Viva*, 11, 147–170.

Galeano, K., & Albornoz, D. (2019). *Eficiencia de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS) en la remoción de contaminantes microbiológicos de aguas residuales domésticas: Una revisión*. Universidad El Bosque.

García, J. (2018). *Propuesta metodológica de indicadores de evaluación de sustentabilidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas orientados al sector rural*. Escuela Politécnica Nacional.

Gearheart, R. (1992). Use of constructed wetlands to treat domestic wastewater, city of Arcata, California. *Water Science and Technology*, 26 (7), 1625–1637.

Geller, G. (1997). Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: summary of long-term scientific and practical experiences; recommendations. *Water Science and Technology*, 35(5), 157–155. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00106-6)

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Santa Ana de Cotacachi 2015-2035*.

Gómez, O. (2018). Contaminación de agua en países de bajos y medianos recursos es un problema de salud pública global. *Revista de La Facultad de Medicina*, 66 (1), 7–8.

González, A. M., & Hernández, O. (2020). *Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el Cantón Militar de Apiay, Villavicencio (META) [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás]*.

Guadarrama, R., Kido, J., Roldan, G., & Salas, M. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2 (5), 1–10.

Headley, T., Nivala, J., Kassa, K., Olsson, L., Wallace, S., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R. (2013). Escherichia coli removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: Effects of design and plants. *Ecological Engineering*, 61, 564–574. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2013.07.062>

Hernández, A. (2015). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Garceta Grupo editorial.

Hernández, W. (2017). *Tratamiento de aguas residuales empleando las especies achira (Canna indica) y carrizo (Pragmites australis) a través de humedales artificiales, Chalamarca*. Universidad César Vallejo.

Herrera, L. (2021). *Eficiencia de las plantas acuáticas Nasturtium officinale W. T. Aiton Y Zantedeschia aethiopica L. en la remoción de aguas residuales domésticas, Distrito de Levanto, Chachapoyas, Amazonas, 2018*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Gestión de agua potable y saneamiento*.

- Jamanca, G. (2017). *Eficiencia en la remoción de nutrientes (N,P) y sólidos suspendidos empleando la especie Zantedeschia aethiopica (Cartucho) aplicando en el humedal de flujo horizontal piloto; en el centro poblado Tuyu Ruri-Marcará.*
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 16, 545–560.
- Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales.* Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ley Orgánica de Salud. (2015). *Ley orgánica de salud del Ecuador. Registro O.*
- Llagas, W., & Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 16 (17).
- Lobato, G. (2018). *Diseño de jardín depurador piloto para tratamiento de aguas residuales en la Hostería Garceta-Sol.*
- Londoño, L., & Marín, C. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua sintética.* Universidad Tecnológica de Pereira.
- López, A., De la Barrera, J., Vallejo, R., & Barahona, C. (2008). Estudio comparativo entre un proceso fisicoquímico y un biológico para tratar agua residual de rastro. *INCI*, 33(7), 490–486.
- López, E., & Rodríguez, M. (2016). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial como tratamiento de agua residual doméstica en la Vereda Bajos de Yerbabuena en el Municipio de Chía, Cundinamarca.* Universidad de la Salle.
- López, L. (2018). *para el Tratamiento de aguas Residuales.* 1–91.
- Mairi, J. P., Lyimo, T. J., & Njau, K. N. (2012). Performance of subsurface flow constructed wetland for domestic wastewater treatment. *Tanzania Journal of Science*, 32(2), 1–14.
- Marín, R. (2003). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas.* Editorial Díaz de Santos.



Martínez, P. (2014). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*.

Mendoza, C., & Párraga, A. (2021). *Evaluación de tres tipos humedales artificiales (ornamental, forrajero, alimenticio) como depurador de aguas residuales grises en el bosque de la ESPAM*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de MANABÍ  
MANUEL FÉLIX LÓPEZ.

Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2016). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*. 1–407.

Ministerio del Ambiente y Agua. (2017). *Las descargas de aguas residuales son controladas por el Ministerio del Ambiente*.

Montes, J. (2017). Evaluación de la capacidad fitoextractora en *Medicago sativa* L. para disminuir la concentración de plomo en suelos contaminados con relaves mineros ubicados en el distrito de Coayllo, Cañete - Lima, Perú. *Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 1*, 1–81.

Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria, 22*(1), 33–46.

Morató, J., Codony, F., Sánchez, O., Pérez, L., García, J., & Mas, J. (2014). Key design factors affecting microbial community composition and pathogenic organism removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 1–9.

Muñoz, K., & Vasquez, M. (2020). *Estudio de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales artificiales de cinco especies de macrófitas*. Universidad Privada del Norte.

Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. In *Revista de Derecho Ambiental* (Issue 10). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>

Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Nuñez, E., Saboya, N., & Cruz, M. (2019). Fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 5, 46–63.

Ortiz, M. (2018). Depuración del efluente en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial utilizando dos medios porosos. *Universidad Autónoma Del Estado de México*.

Padrón, J. (2018). Evaluación del desempeño de un sistema piloto de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas en ecosistemas de montaña. *Universidad de Cuenca*.

Pallarés, C. (2016). Diseño y dimensionamiento de la línea de agua de una PTAR procedente de un matadero porcino. *Universidad Jaume I*.

Pantoja, H., & Tarapues, G. (2017). Remoción carga contaminante con Humedales artificiales de tipo piloto sub-superficial horizontal (HAFSSh), Granja Botana, Nariño. *Universidad de Nariño*.

Paredes, P. (2018). Estudio del comportamiento de la DBO en un humedal artificial de flujo vertical para tratar agua gris. *Research Gate, January*.

Parrao, L. (2018). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de aguas Residuales Domesticas*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Peña, C. (2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: estado del arte. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22 (2), 39–61.

Planificación. (2021). Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 Aprobado. In *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025* (pp. 43-48-85–90).

Quimbita, M. (2015). *Respuesta del cultivo de cala (Zantedeschia sp) a la aplicación foliar complementaria con tres abonos de frutas a tres dosis*. Universidad Central del Ecuador.

Ramos, M. (2019). *Producción de Flor de Alcatraz (Zantedeschia aethiopica) a partir de Aguas Residuales Domésticas en Humedales Artificiales de Flujo Sub Superficial en el sector de Huatascapa – Puno, Perú*.

Ríos, S., Agudelo, R., & Gutiérrez, L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35 (2), 236–247. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>

Rivas Hernández, A., & Paredes Cuervo, D. (2014). Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. *Segunda Conferencia Panamericana En Sistemas de Humedales Morelia, Michoacán, México*, 1–189.

Rodríguez, J., & Durán, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 21(1), 25–33.

Rodríguez, J., García, C., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Tecnura*, 19 (46), 146–164. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>

Rodríguez, M., Konnerup, D., Brix, H., & Arias, C. (2020). Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences during the Last Decade. *Water*, 12, 1744. <https://doi.org/doi:10.3390/w12061744>

Rodríguez, N., Sánchez, S. G., Ponce, B., & Noguez, J. (2019). Uso de *Canna glauca* para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un humedal artificial de flujo superficial. *Revista de Energía Química y Física*, 6(18), 53–60. <https://doi.org/10.35429/jcpe.2019.18.6.53.60>

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

Rubio, J., & Montenegro, A. (2018). *Humedal Artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3ra Brigada de Fuerzas Especiales, batallón de servicios N° 300, Distrito de Rioja, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín*. Universidad Nacional de San Martín.

Sandoval, J., Malo, B., Cartagena, J., & Rubio, D. (2018). Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre. *Revista Mutis*, 8(1), 34–42. <https://doi.org/10.21789/22561498.1368>

- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019). Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Senhadji, K., Ruiz, M., & Rodríguez, J. P. (2017). Estado ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: Una evaluación prospectiva. *Colombia Foresta*, 20 (2), 181–191.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: Evaluación y Diagnóstico*. Ediciones de la U.
- Soler, C., Crespi, R., Soler, E., & Pugliese, M. (2018). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre superficial con macrófitas acuáticas flotantes. *Ingeniería Del Agua*, 22(2), 69. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8596>
- Stearman, K., George, D., Carlson, K., & Lansford, S. (2003). Pesticide Removal from Container Nursery Runoff in Constructed Wetland Cells. *Journal of Environmental Quality*, 32(4), 1548–1556. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1548>
- Tello, L. G., & Sánchez, A. A. (2019). La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador. Necesidad de su reversión desde las políticas públicas con enfoque bioético. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 5(9), 1053–1102. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v5i9.7946>
- Torres, J., Magno, J., Pineda, R., & Cruz, M. (2018). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(2), 41–64. <https://doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>
- United States Environmental Protection Agency. (1993). *Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial*.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (1994). *Guía técnica para la elaboración de manuales de procedimientos* (U. N. A. de México, Ed.).
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7 (3).

Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Humedales Construidos. Diseño y Operación* (Universida).

Villena, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35 (2), 304–308.  
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25, 478–490.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>

Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, 45 (1).  
<https://doi.org/10.1021/es101403q>

Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. (2016). Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of The Total Environment*, 541, 8–22.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.09.047>

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*. UNESCO.

Yévenes, E. (2017). Factibilidad de la implementación de la especie *Zantedeschia aethiopica* en humedales artificiales de flujo subsuperficial. *Universidad Del BíoBío*.

Zúñiga, Juan., & Feriz, Daniel. (2021). Implementación de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para la fitorremediación de aguas mieles de café, en la finca La Clanera, vereda La Chorrera del municipio de Timbío, Cauca. *ConCiencia*, 11, 48–65.

Zurita, F., Castellanos, O., & Rodríguez, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 139–150.

## ANEXOS

### Anexo 1. Registro fotográfico

#### Anexo 1a) Adquisición de plántulas de alfalfa, achira y cartucho



#### Anexo 1b) Seguimiento de crecimiento de plantas y adaptación a agua residual doméstica



#### Anexo 1c) Toma de muestras para análisis inicial de agua residual doméstica





**Anexo 1d) Construcción de humedales artificiales a escala piloto**



**Anexo 1e) Adaptación de especies a los humedales artificiales**





## Anexo 1f) Toma de muestras de agua tratada mediante humedales artificiales



## Anexo 2. Reporte de análisis de laboratorio



INFORME DE RESULTADOS			FIT-INFORMES-REQ7_S_B Versión 05	
Informe de Resultados Nro: IRRE22-266			Pág. 1 de 2	
<b>DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:</b>				
Cliente: Ingrid Tanai				
Dirección: La Dolorosa de Priorato				
Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec			Teléfono: 0979834820	
Tipo de Muestra: Agua Residual				
Identificación muestra cliente: Muestra # 1				
Fecha de recepción laboratorio: 9 de Junio de 2022				
Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAI051			Toma de muestra realizada por: El cliente	
Código de Laboratorio: MER22-012			Fecha de realización de ensayos: 9-12/06/2022	
Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I			Fecha de emisión informe: 21 de Junio de 2022	
<b>RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS</b>				
PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO MFR22-018	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Sólidos Suspendedos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	145.8	130
<b>RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS</b>				
PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO MER22-018	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg/l	150	100
<b>RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS</b>				
PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	436x10 <sup>3</sup>	N/A





**INFORME DE RESULTADOS**

FIT-INFORMES-REQ7.8\_B  
Versión 05

Informe de Resultados Nro: IRRE22-266

Pág. 1 de 2

**DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:**

Cliente: Ingrid Tanai

Dirección: La Dolorosa de Priorato

Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec

Teléfono: 0979834820

Tipo de Muestra: Agua Residual

Identificación muestra cliente: Muestra # 1

Fecha de recepción laboratorio: 05 de Julio del 2022

Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAIO51

Toma de muestra realizada por: El cliente

Código de Laboratorio: MER22-018

Fecha de realización de ensayos: 05-12/07/2022

Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I

Fecha de emisión informe: 15 de Julio del 2022

**RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	<sup>(1)</sup> LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	149,7	130

**RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	<sup>(1)</sup> LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg /l	40	100

**RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	<sup>(1)</sup> LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			ITEM DE ENSAYO	
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	6800	N/A



INFORME DE RESULTADOS

FIT-INFORMES-REQ7-R\_B  
Versión 05

Informe de Resultados Nro: IRRE22-266

Pág. 1 de 2

DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:

Cliente: Ingrid Tanai

Dirección: La Dolorosa de Priorato

Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec

Teléfono: 0979834820

Tipo de Muestra: Agua Residual

Identificación muestra cliente: Muestra # 1

Fecha de recepción laboratorio: 9 de Junio de 2022

Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAI051

Toma de muestra realizada por: El cliente

Código de Laboratorio: MER22-018

Fecha de realización de ensayos: 30-12/06/2022

Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I

Fecha de emisión informe: 11 de Julio del 2022

RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MFR22-018	
Sólidos Suspendedos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	56.2	130

RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	Standard Methods 5210 D	mg/l	50	100

(\*)

RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			ITEM DE ENSAYO	
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	6800	N/A



INFORME DE RESULTADOS

FIT-INFORMES-REQ7\_B\_B  
Versión 05

Informe de Resultados Nro: IRRE22-266

Pág. 1 de 2

DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:

Cliente: Ingrid Tanaí

Dirección: La Dolorosa de Priorato

Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec

Teléfono: 0979834820

Tipo de Muestra: Agua Residual

Identificación muestra cliente: Muestra # 2

Fecha de recepción laboratorio: 9 de Junio de 2022

Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAI051

Toma de muestra realizada por: El cliente

Código de Laboratorio: MER22-019

Fecha de realización de ensayos: 30-12/06/2022

Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I

Fecha de emisión informe: 11 de Julio del 2022

RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MFR22-018	
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	55.4	130

RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg /l	30	100

RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			ITEM DE ENSAYO	
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	6400	N/A



INFORME DE RESULTADOS

FIT-INFORMES-REQ7.8\_B  
Versión 05

Informe de Resultados Nro: IRRE22-266

Pág. 1 de 2

DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:

Ciente: Ingrid Tanaí

Dirección: La Dolorosa de Priorato

Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec

Teléfono: 0979834820

Tipo de Muestra: Agua Residual

Identificación muestra cliente: Muestra # 3

Fecha de recepción laboratorio: 9 de Junio de 2022

Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAI051

Toma de muestra realizada por: El cliente

Código de Laboratorio: MER22-020

Fecha de realización de ensayos: 30-12/06/2022

Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I

Fecha de emisión informe: 11 de Julio del 2022

RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MFR22-018	
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	61	130

RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg /l	40	100

RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			ITEM DE ENSAYO	
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	6800	N/A

INFORME DE RESULTADOS

FIT-INFORMES-REQ7.8\_B  
Versión 05

Informe de Resultados Nro: IRRE22-266

Pág. 1 de 2

DATOS SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE:

Cliente: Ingrid Tanai

Dirección: La Dolorosa de Priorato

Correo electrónico: ietanaio@utn.edu.ec

Teléfono: 0979834820

Tipo de Muestra: Agua Residual

Identificación muestra cliente: Muestra # 4

Fecha de recepción laboratorio: 9 de Junio de 2022

Autorización orden de trabajo N°: OTELABEMAPAI051

Toma de muestra realizada por: El cliente

Código de Laboratorio: MER22-027

Fecha de realización de ensayos: 30-12/06/2022

Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I

Fecha de emisión informe: 11 de Julio del 2022

**RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MFR22-018	
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	73.6	130

**RESULTADOS PARÁMETROS QUÍMICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			MER22-018	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg /l	70	100

**RESULTADOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS**

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	ITEM DE ENSAYO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
			ITEM DE ENSAYO	
E. coli (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	6900	N/A

### Anexo 3. Análisis estadísticos

#### Prueba estadística ANOVA DBO<sub>5</sub>

<i>Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)</i>						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	3550.47	7	507.21	51.87	<0.0001	
Tratamiento	3501.80	3	1167.27	119.38	<0.0001	
TRH	32.11	1	32.11	3.28	0.0950	
Trat*TRH	32.47	3	10.82	1.11	0.3844	
Error	117.33	12	9.78			
Total	3667.80	19				

#### Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH DBO<sub>5</sub>

<b>Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.31778</b>						
<i>Error: 9.7778 gl: 12</i>						
Tratamiento	TRH	Medias	N	E.E	Grupo	
2	15	23.67	3	1.81	A	
2	7	23.67	3	1.81	A	
3	15	31.33	3	1.81	A	
3	7	31.33	3	1.81	A	
1	15	45.00	3	1.81	B	
1	7	48.33	3	1.81	B	
4	15	62.00	1	3.13	C	
4	7	70.00	1	3.13	C	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### Prueba estadística ANOVA SST

<i>Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)</i>						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	2618.40	7	374.06	33.86	<0.0001	
Tratamiento	2058.98	3	686.33	62.12	<0.0001	
TRH	0.32	1	0.32	0.03	0.8675	
Trat*TRH	478.62	3	159.54	14.44	0.0003	
Error	132.58	12	11.05			
Total	2750.98	19				

*Prueba estadística Tukey interacción Tratamiento por TRH SST*

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=12. 03066						
Error: 11.0483 gl: 12						
Tratamiento	TRH	Medias	N	E.E	Grupo	
2	15	40.57	3	1.92	A	
3	15	52.30	3	1.92	A	B
2	7	57.73	3	1.92	B	
1	7	59.60	3	1.92	B	
1	15	62.43	3	1.92	B	C
3	7	62.50	3	1.92	B	C
4	7	73.60	1	3.32	C	
4	15	92.00	1	3.32	D	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Anexo 4. Guía del uso y eficiencia de humedales artificiales subsuperficiales con las especies Alfalfa (*Medicago sativa*), Cartucho (*Zantedeschia aethiopica*) y Achira (*Canna indica*).**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

# GUÍA DEL USO Y EFICIENCIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES

Ejemplo aplicativo para Alfalfa (*Medicago sativa*), Cartucho  
(*Zantedeschia aethiopica*) y Achira (*Canna indica*)

AUTORAS: ROMERO SALGADO ANDREA DOMENICA  
TANAÍ ORTIZ INGRID ESTEFANÍA

IBARRA 2023



# PRESENTACIÓN

Este documento se basa en el conocimiento del uso y el nivel de eficiencia de tres especies aplicadas dentro de humedales artificiales: Alfalfa (*Medicago sativa*), Cartucho (*Zantedeschia aethiopica*) y Achira (*Canna indica*).

El documento consta de dos partes; una primera donde se describen las generalidades de los humedales artificiales y la descripción de las especies de estudio, con el objetivo de conocer las características principales de las especies para la aplicación y análisis dentro del humedal artificial. La idea es dar a conocer el nivel de eficiencia de las tres especies a estudio, entregándole al lector de la guía una serie de herramientas conceptuales del manejo, adaptación y el nivel de eficiencia de cada especie estudiada.

La segunda parte muestra los porcentajes de remoción de contaminación por cada parámetro estudiado (DBO5, Sólidos Suspendidos Totales y *E. coli*), de acuerdo con cada tratamiento aplicado, con la finalidad de conocer que especie posee una mayor eficiencia para la descontaminación de aguas residuales mediante la aplicación de humedales artificiales subsuperficiales.

Los autores agradecen por su amable contribución a la realización de este estudio a nuestro tutor MSc. Santiago Cabrera y asesores MCs. Renato Oquendo y MCs. Jorge Granja.



# **GUÍA DEL USO Y EFICIENCIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES**

## **CONTENIDOS**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>GENERALIDADES</b>	<b>3</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES</b>	<b>4</b>
<b>MANEJO DE LAS ESPECIES</b>	<b>9</b>
<b>RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DE LAS ESPECIES</b>	<b>10</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>17</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>18</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>19</b>



# INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales son una de las tecnologías de eficiencia empleada para el tratamiento de aguas residuales, en comparación a los sistemas convencionales estos son de bajo costo, fácil de operar, mantener y poseen un gran potencial de aplicación en los países en desarrollo, principalmente en pequeñas comunidades rurales (Kivaisi, 2001).

Estos sistemas son diseñados y construidos para la utilización de los procesos naturales de la

vegetación presente en los humedales, los suelos y los conjuntos microbianos asociados (Mymazal, 2005).

La depuración del agua ocurre por la interacción entre elementos que componen el humedal y fenómenos físicos, químicos y biológicos que se producen dentro del sistema con la intervención solar como principal fuente de energía (Llagas & Gómez, 2006).



# OBJETIVOS

**1**

Fomentar la utilización de alfalfa (*Medicago sativa*), achira (*Canna indica*) y cartucho (*Zantedeschia aethiopica*) en humedales artificiales

Conocer las principales características de las especies de estudio y la eficiencia de remoción que presentan dentro del tratamiento de depuración de aguas residuales con humedales artificiales.

**2**

HUMEDALES ARTIFICIALES UNA ALTERNATIVA SOSTNIBLE



# GENERALIDADES



## AGUA RESIDUAL

La generación de las aguas residuales son consecuencia de las actividades humanas de una población y que poseen una composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales y domésticos, que hayan sufrido una degradación en su calidad original (Castañeda y Flores, 2013).

①

## HUMEDAL ARTIFICIAL

Son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, su función se basa en la simulación de los humedales naturales con el objetivo principal de utilizar procesos físicos, químicos y biológicos que se generan de forma natural para la depuración pasiva del agua residual (Blanco, 2014).



②

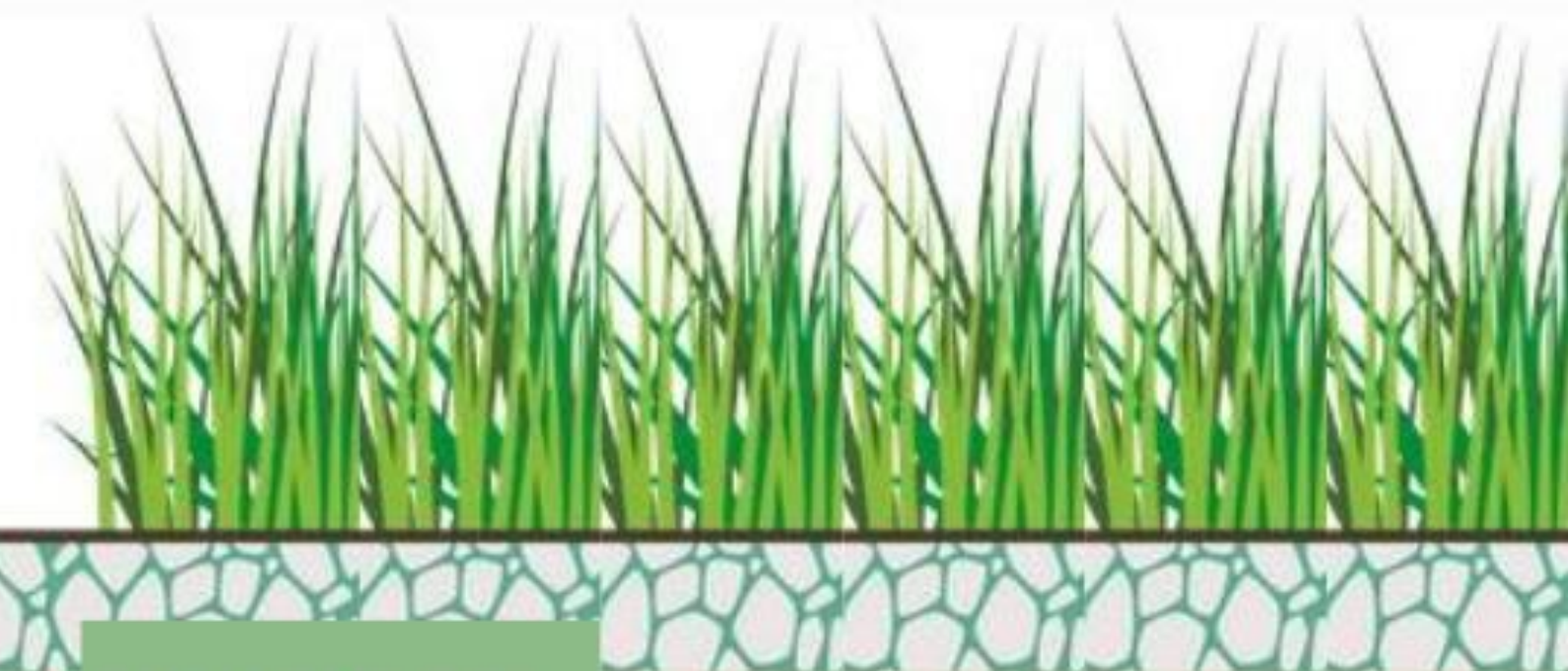
## HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL



La circulación del agua se realiza a través de un medio granular subterráneo, la vegetación se encuentra plantada dentro del medio granular y el agua entra en contacto directo con los rizomas y raíces de las plantas (Castañeda, 2017)



# HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES



## ELEMENTOS DE UN HUMEDAL

- Agua para tratar
- Sustrato
- Vegetación
- Microorganismos

## VENTAJAS DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

- Alta reducción de DBO5, sólidos suspendidos y patógenos
- No tienen problemas de mosquitos los cuales se presentan en un humedal de flujo superficial
- No requiere energía eléctrica
- Bajos costos de implementación y operación
- No necesita una gran cantidad de personal
- Tratamiento ambiental amigable

# ESPECIES APLICADAS DENTRO DEL HUMEDAL

## Fitorremediación en humedales artificiales

### ESPECIES

- 1 Alfalfa (*Medicago sativa*)
- 2 Cartucho (*Zantedeschia aethiopica*)
- 3 Achira (*Canna indica*)

Dentro de los humedales artificiales se desarrollan diversos mecanismos de remoción de contaminantes por la interacción conjunta de sus componentes en la cual se destacan procesos biológicos, físicos y químicos dentro del sistema (Muñoz & Vasquez, 2020).



# ALFALFA

*Medicago sativa*

Reino: Plantae  
División: Magnoliophyta  
Clase: Magnoliopsida  
Orden: Fabales  
Familia: Fabaceae  
Género: *Medicago*  
Especie: *Medicago sativa*



## Descripción morfología

Esta especie pertenece a la familia Leguminosea, originaria de oriente medio, se adapta a diferentes pisos climáticos desde los 700 a 2800 msnm permitiendo que se extienda en varios países y su temperatura óptima de crecimiento fluctúa entre los 15 y 25 °C (Delgado, 2015). Su raíz principal y secundarias son de tipo pivotante y la capacidad de penetración es muy rápida, pueden llegar a poseer una longitud de 4 m y una profundidad que varía entre 1.5 a 2 m durante su primera estación de crecimiento (Montes, 2017).

## Siembra

La alfalfa puede sembrarse en el ciclo otoño-invierno. En las regiones que tienen inviernos muy fríos se hacen siembras de primavera, aunque el momento óptimo es al terminar el verano o comenzando el invierno, a fin de conseguir la germinación de las semillas antes de las heladas.





# CARTUCHO

*Zantedeschia aethiopica*

- Reino: Plantae  
División: Magnoliophyta  
Clase: Liliopsida  
Orden: Arales  
Familia: Araceae  
Género: *Zantedeschia*  
Especie: *Zantedeschia aethiopica*



## Descripción morfología

Esta especie posee hojas de gran tamaño de forma lanceolada y de color verde oscuro, su raíz es un denominado bulbo o rizoma donde almacena nutrientes con una profundidad de 10 a 15 cm, posee una flor blanca llamativa de uso ornamental y es capaz de alcanzar los 1.5 m de altura (Quimbita, 2015)

## Siembra

Se reproduce por un rizoma semejante a un bulbo, aunque también se puede hacer varias plantas por división a finales de invierno o principios de primavera. En zonas extremadamente cálidas esta operación se puede realizar también en otoño. No necesita mucha profundidad, ya que hay que enterrar el rizoma entre 10 o 15 cm.

# ACHIRA

*Canna indica*

Reino: Plantae  
División: Angiospermae  
Clase: Liliopsida  
Orden: Zingiberales  
Familia: Cannaceae  
Género: *Canna*  
Especie: *Canna indica*



## Descripción morfología

Planta herbácea perenne perteneciente a la familia Cannacea, su altura promedio es de 1.5 a 3 m, es de origen sudamericano, se desarrolla en una gran variedad de climas y suelos, crece sobre todo en lugares húmedos, de rizoma carnoso y ramificado de hasta 20 x 15 cm (Bermeo & Tigse, 2019).

## Siembra

La achira es una especie que puede propagarse semilla asexual o vegetativamente por rizomas o cormos, esta última técnica es la más utilizada por los agricultores por ser más eficiente, es decir, es más rápida.



# MANEJO DE LAS ESPECIES

El manejo de las especies en los humedales artificiales fue de manera progresiva con la finalidad de establecer un periodo de adaptación tanto para la aplicación dentro del sistema como para la adaptación de riego con agua residual doméstica (ARD).

## ADAPTACIÓN AL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA (ARD)

Aumento gradual de ARD durante 4 semanas



## ADAPTACIÓN AL SISTEMA

Las especies fueron sembradas dentro del sistema con una densidad de 3 plantas por especie, con un tiempo de adaptación de dos semanas. El riego se realizó mediante un sistema de tuberías tipo flauta permitiendo que el agua se riegue de manera horizontal dentro del humedal para una mejor filtración, por cada humedal se realizó un riego de 3.5 litros diarios de manera intermitente





# RESULTADOS

EFICIENCIA DE REMOCIÓN

## TRATAMIENTOS

T0= Testigo

T1= Alfalfa

T2= Alfalfa+ Cartucho

T3= Alfalfa + Achira



# Análisis DBO5

Analisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

44% - 50.4%



TO

Dentro del testigo se observa un rendimiento a los 7 días de 44% y a los 15 días de 50.4% de eficiencia de remoción.

T1

El alfalfa presenta un rendimiento medio, con un TRH de 15 días presentó un eficiencia del 64 % de remoción.

59.5% - 64%





# Análisis DBO5

Análisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

76.3% - 81.1 %



T2

El Cartucho + Alfalfa presenta una alta eficiencia en la remoción del DBO5, con un 81.1 %, siendo el mejor tratamiento.

T3

La Achira + Alfalfa presenta una eficiencia en la remoción del 67.5% al 74.9% en los 15 días.

67.5% - 74.9 %



# Análisis SST

Analisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

31% - 13.5%



TO

El testigo presenta un bajo rendimiento en la eliminación de sólidos suspendidos totales.

44% - 41.3%



T1

El alfalfa presenta un rendimiento medio, con un TRH de 15 días presentó un eficiencia del 41.3 % de remoción.



# Análisis SST

Analisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

50.4% - 61.9%



T2

El Cartucho + Alfalfa presenta una alta eficiencia en la remoción del 61.9 %, siendo el mejor tratamiento.

T3

La Achira + Alfalfa presenta una eficiencia en la remoción del 41.3% al 50.8% en los 15 días.

41.3% - 50.8%





# Análisis *E.coli*

Analisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

98.6% - 90.1%



TO

Dentro del testigo se observa un rendimiento óptimo de eliminación de *E.coli* con un resultado mayor al 90%.

T1

El alfalfa presenta un rendimiento alto en los primeros 7 días de tratamiento con un 98.6% de remoción.

98.6% - 89.8%





# Análisis *E.coli*

Analisis de los  
TRH: 7 y 15  
días

## Eficiencia de remoción

98.7% - 94.9%



T2

El Cartucho + Alfalfa presenta una alta eficiencia de remoción a los 7 días de estudio con el 98.7% de remoción, siendo el mejor tratamiento aplicable

T3

La Achira + Alfalfa presenta una eficiencia en la remoción del 98.6% al 93.4% en los 15 días.

98.6% - 93.4%



# CONCLUSIONES

**1**

La utilización de especies ornamentales y forrajera tuvo como finalidad potenciar el uso de estas especies que son fáciles de manejar, propagar y cuidar dentro de humedales artificiales, además de obtener resultados positivos en la disminución de contaminación.

El tratamiento de Alfalfa + Cartucho presenta una eficiencia de remoción viable para la aplicación dentro de humedales artificiales con la finalidad de disminuir la carga contaminante de las aguas residuales domésticas.

**2**

**HUMEDALES ARTIFICIALES UNA ALTERNATIVA SOSTNIBLE**

# GLOSARIO

- **Humedal artificial**

Los humedales artificiales son sistemas acuáticos diseñados para remover o disminuir los contaminantes presentes en el agua residual, replicando los procesos que ocurren de manera natural en los ecosistemas acuáticos.

- **Agua residual**

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica.

- **DBO5**

Demanda Biológica de Oxígeno, indica la cantidad de oxígeno que las bacterias y otros seres vivos minúsculos consumen durante 5 días a una temperatura de 20°C en una muestra de agua para la degradación aeróbica de las sustancias contenidas en el agua.

- **Sustrato**

Es cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en contenedores, cuyo propósito es brindar anclaje y soporte a la planta.

- **Microorganismos**

Un microorganismo es un organismo diminuto que solamente se puede observar a través de un microscopio. Se trata de un ser vivo unicelular que también puede mencionarse como microbio.

# BIBLIOGRAFÍA

- Bermeo, E., & Tigse, W. (2019). Islas Flotantes Artificiales con achira (*Canna indica*), como alternativa para la remoción de Nitratos y Fosfatos de agua procedente del río Cutuchi. Universidad Técnica Cotopaxi
- Blanco, I. (2014). Aplicación de humedales artificiales para la depuración de purines de granjas porcinas. Universidad de León.
- Castañeda, L. (2017). Revisión de principales investigaciones realizadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 25(1), 83–89
- Castañeda, A., & Flores, H. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 3 (5).
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 16, 545–560.
- Llagas, W., & Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 16 (17).
- Montes, J. (2017). Evaluación de la capacidad fitoextractora en *Medicago sativa* L. para disminuir la concentración de plomo en suelos contaminados con relaves mineros ubicados en el distrito de Coayllo, Cañete - Lima, Perú. *Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur*, 1, 1–81.
- Muñoz, K., & Vasquez, M. (2020). Estudio de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas con humedales artificiales de cinco especies de macrófitas. Universidad Privada del Norte.
- Quimbita, M. (2015). Respuesta del cultivo de cala (*Zantedeschia* sp) a la aplicación foliar complementaria con tres abonos de frutas a tres dosis. Universidad Central del Ecuador
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25, 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>

# REFERENCIAS FIGURAS

- Figura 1. Historia de la vida. Recuperado de: [www.historiadelavida.editorialeces.com](http://www.historiadelavida.editorialeces.com)
- Figura 2. Imagen Agropecuaria. Recuperado de: [www.imagenagropecuaria.com](http://www.imagenagropecuaria.com)
- Figura 3. Hoffmann, H; Platzer, C; Winker & Von Muench, E. (2011). Recuperado de: [www.ecotec.unam.mx](http://www.ecotec.unam.mx)