



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Diseño de un humedal artificial para tratamiento de agua residual generada a partir de un invernadero para producción en sistema hidropónico con sustrato.

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Autor: Romero Mejía, Diego Andrés

Director: Donoso Pantoja, Natalia Carolina

LOJA

2024



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2024

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular

Loja, 08 de mayo del 2023

Magister

Mercedes Villa Achupallas

Directora de la carrera de Ingeniería Ambiental

Loja.

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Diseño de un humedal artificial para tratamiento de agua residual generada a partir de un invernadero para producción en sistema hidropónico con sustrato, realizado por Diego Andrés Romero Mejía ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Natalia Carolina Donoso Pantoja, PhD.

C.I.:1715848436

Correo electrónico: ncdonoso@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Diego Andrés Romero Mejía, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Diseño de un humedal artificial para tratamiento de agua residual generada a partir de un invernadero para producción en sistema hidropónico con sustrato, de la carrera de Ingeniería Ambiental, específicamente de los contenidos comprendidos en: capítulo I marco teórico, capítulo II metodología, capítulo III resultados y discusión, conclusiones, bibliografía y apéndices, siendo Natalia Carolina Donoso Pantoja, directora del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo. Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”, en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Diego Andrés Romero Mejía

C.I.: 1900505718

Correo electrónico: daromero21@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Esta dedicatoria lo he realizado con humildad y esfuerzo demostrando superación e interés en el desarrollo de mi trabajo de investigación para poder convertir mi sueño en realidad.

Mi dedicatoria sincera en primera instancia es a Dios por ser pilar fundamental en fortalecer mis creencias, mi corazón e iluminar mi mente de sabiduría y por haber puesto en mi camino a personas muy valiosas que han sido mi soporte y mi ayuda en este largo camino de estudio académico. Además de convertir en realidad mi sueño de culminar con éxito mi proyecto de investigación.

A mis padres, por darme la vida, su apoyo incondicional en la parte moral y económica, quienes con su comprensión me brindaron conocimientos de educación y formación para ser una persona de bien. Sobre todo, por darme la mejor herencia de una carrera profesional para mi futuro. Gracias por creer y confiar en mí.

Agradecimiento

A Dios por brindarme la salud, inteligencia e iluminarme con sabiduría de fortaleza mental y emocional para ayudarme a culminar con éxito el estudio universitario

De igual manera mi agradecimiento a la Universidad Técnica Particular de Loja, por permitirme obtener mi carrera profesional de Ingeniería y mi gratitud a la Dra. Natalia Carolina Donoso Pantoja directora de tesis, por brindarme la orientación adecuada en los conocimientos requeridos y atención a mis consultas para el desarrollo de mi tesis.

Finalmente, agradecer a mi familia quienes me inspiraron constantemente alcanzar mis anhelos que, con su apoyo moral, comprensión y paciencia me ayudaron a salir adelante en este largo transcurso de estudio.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria	V
Agradecimiento.....	VI
Índice de contenido	VII
Índice de tablas	X
Índice de figuras	XI
Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo uno.....	5
Marco Teórico	5
1.1. Aguas Residuales	5
1.1.1. Problemática del agua residual en el mundo	5
1.1.2. Problemática de aguas residuales agrícolas.....	5
1.1.3. Estado actual del agua residual agrícola en Ecuador	6
1.1.4. Sistema de invernadero hidropónico y sus aguas residuales	6
1.2. Parámetros de caracterización del agua residual proveniente de un invernadero hidropónico.	7
1.2.1. Parámetros físicos	7
1.2.1.1. Temperatura.	7

1.2.1.2.	Turbidez.....	8
1.2.1.3.	Color.....	8
1.2.1.4.	Conductividad eléctrica (CE).....	8
1.2.1.5.	Sólidos Totales (ST).....	8
1.2.2.	Parámetros Químicos y Biológicos	9
1.2.2.1.	Potencial hidrógeno (pH).....	9
1.2.2.2.	Demanda Química del Oxígeno (DQO).	9
1.2.2.3.	Demanda Biológica del Oxígeno (DBO ₅).	9
1.2.2.4.	Nitrógeno total (TN).....	9
1.2.2.6.	Hierro (Fe).....	10
1.2.2.7.	Cobre (Cu).....	10
1.2.2.8.	Manganeso (Mn).....	10
1.2.2.9.	Zinc (Zn).....	11
1.2.2.10.	Plomo (Pb).	11
1.2.3.	Parámetros Microbiológicos	11
1.2.3.1.	Coliformes fecales.	11
1.3.	Técnicas de tratamiento	11
1.3.1.	Humedales artificiales.....	12
1.3.1.1.	Humedal Artificial de Flujo Superficial (HAFS).	12
1.3.1.2.	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS).....	13
1.3.1.2.1	Humedal Artificial de flujo horizontal (HAFH).	13
1.3.1.2.2	Humedales de Flujo Vertical (HFV).	14
1.3.1.3	Humedales Artificiales Híbridos.....	15

1.3.1.4	Humedales con inyección de aire.....	15
1.3.2	Componentes y requerimiento de construcción de los humedales artificiales	16
1.4	Marco Legal.....	17
1.4.1.	Normativas suplementarias nacionales.....	17
1.4.1.1.	Constitución de la República del Ecuador 2008.	17
1.4.1.2.	Texto unificado de Legislación Secundario del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.	17
1.4.1.2.1	Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua	18
Capítulo dos	19
Metodología.....		19
2.1.	Área de estudio.....	19
2.2.	Muestreo y recolección de la muestra	20
2.3.	Caracterización física, química y biológica de las muestras de agua	21
2.4.	Parámetros físicos.....	22
2.4.1.	Conductividad Eléctrica (CE)	22
2.4.2.	Color real	22
2.4.3.	Sólidos Totales (ST).....	22
2.4.4.	Sólidos Suspendedos Totales (SST)	23
2.5.	Análisis de parámetros químicos	23
2.5.1.	Potencial Hidrogeno (pH)	23
2.5.2.	Oxígeno Disuelto (OD)	23
2.5.4.	Aceites y grasas.....	24

2.5.5.	Nitrógeno total.....	24
2.5.6.	Metales.....	24
2.6.	Parámetros biológicos	24
2.6.1.	Demanda bioquímica del Oxígeno (DBO5).....	24
2.7.	Análisis de parámetros microbiológicos	25
2.7.1.	Coliformes fecales	25
2.8.	Diseño de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales agrícolas	25
Capítulo tres.....		27
3.	Resultados y Discusión.....	27
3.1.1.	Color Real	28
3.1.2.	Sólidos Totales y Sólidos Suspendedos	28
3.1.3.	Nitrógeno Total.....	29
3.1.4.	Coliformes Fecales	29
3.2.	Metales Pesados.....	30
3.5.	Medición de caudal.....	32
3.6.	Diseño de humedal artificial para emplearlo en la zona de estudio.....	34
Conclusiones		37
Recomendaciones		39
Referencias		40

Índice de tablas

Tabla 1	Métodos y Técnicas de Ensayo	21
Tabla 2	Resultados de parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos.....	27

Tabla 3 Resultados de metales pesados en muestras de agua.....	30
Tabla 4 Registro de mediciones para determinación del caudal.....	32
Tabla 5 Resultados de caudales promedio en diferentes periodos del día	33
Tabla 6 Caudales de descarga del invernadero y agua residual doméstica.....	34
Tabla 7 Parámetros considerados y valores utilizados para el cálculo del área del humedal.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama esquemático de un HAFS	13
Figura 2 Esquema de la Sección Transversal de un HFH.	14
Figura 3 Esquema de la Sección Transversal de un Humedal de Flujo Vertical	15
Figura 4 Ubicación de la Zona de Estudio en la Comunidad Ñamarin	20
Figura 5 Modelo del Humedal Artificial de Flujo Horizontal.....	36

Resumen

Una de las comunidades más antiguas del cantón Saraguro es Ñamarín. Caracterizada por la práctica de turismo comunitario, y huertos caseros conservar sus tradiciones ancestrales, y escenarios paisajísticos. Tomando en consideración la calidad de agua de recursos hídricos en la zona, el presente estudio busca su preservación, a través de la evaluación del potencial de implementación de un sistema de tratamiento de agua residual, para aguas de riego producidas en un invernadero hidropónico. Para el desarrollo, se consideró la toma de muestra de agua de riego, agua residual después del riego, y agua residual doméstica que en conjunto serían tratadas por el sistema denominado, humedales artificiales con para su futura reutilización en el cultivo. Para el muestreo, se consideraron dos temporadas invierno y verano. Para caracterizar el agua residual y definir el diseño del sistema se realizaron análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, cuyas concentraciones se compararon con el Acuerdo Ministerial 097-A. Como resultado se presenta el diseño del sistema de tratamiento de flujo subsuperficial con un área de 54m² que aseguraría un efluente apto para reutilización para actividades de riego.

Palabra claves: humedales artificiales, aguas residuales agrícolas, sistema hidropónico.

Abstract

One of the oldest communities in the Saraguro canton is Ñamarín. Characterized by the practice of community tourism and home gardens to preserve their ancestral traditions and scenic landscapes. Considering the water quality of the hydrological resources in the area, this study aims to preserve them through the assessment of the potential implementation of a wastewater treatment system for irrigation water produced in a hydroponic greenhouse. The development involved sampling irrigation water, post-irrigation wastewater, and domestic wastewater, all of which would be treated by the proposed system, artificial wetlands, for future reuse in cultivation. Sampling was conducted in both winter and summer seasons. Physicochemical and microbiological parameter analyses were performed to characterize the wastewater and define the system's design. The concentrations were compared with Ministerial Agreement 097-A. The result is the design of a subsurface flow treatment system with an area of 54m², ensuring an effluent suitable for reuse in irrigation activities.

Key words: constructed wetlands, agricultural wastewater, hydroponic greenhouse.

Introducción

El agua es un elemento indispensable para los seres vivos como sustento de vida y desarrollo de varias actividades, tales como la producción de alimentos y desarrollo económico (Raymundo Montes, 2017). Esta comunidad con alrededor de 18 familias impulsa el turismo comunitario, por lo que mantener una gestión eficiente del sector hídrico tanto su consumo como desecho de aguas residuales, es primordial (Ochoa, 2018). En este contexto el presente trabajo de investigación se plantea con el fin de evaluar el potencial de gestión de aguas residuales provenientes de un invernadero hidropónico, y un hogar junto a este, a través de un sistema de tratamiento no convencional, conocido como humedales artificiales. Estos poseen la capacidad de reducir nutrientes, materia orgánica, organismos patógenos u otros contaminantes que pueden encontrarse en aguas residuales (Hdidou et al., 2022).

Para el desarrollo del presente trabajo se consideró un objetivo general que comprende el diseñar un humedal artificial útil para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un invernadero hidropónico. Para lograrlo se establecieron dos objetivos específicos, el primero, caracterizar el agua de riego a la salida del sistema de regadío, considerando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, el caudal y su variación, y el segundo, presentar los requerimientos en cuanto al área y diseño para la construcción del humedal artificial. Es importante destacar que esta evaluación fue propuesta, desde inicios de la construcción del invernadero, por lo que, una vez culminada la obra, se evidencia la necesidad de tratar un agua residual adicional, como es el agua doméstica proveniente del hogar junto al invernadero en estudio. Además, para lograr una gestión integral del recurso agua, se evalúa el potencial de reutilización del agua tratada.

En conjunto a través de los capítulos desarrollados en el marco teórico se expone la necesidad del tratamiento de aguas residuales y cómo solventarla a través del diseño e implementación de un sistema de tratamiento conocido como humedal artificial. Para lograr esto en la metodología se describe los diferentes procedimientos llevados a cabo tanto en el campo como en el laboratorio para evaluar la calidad del agua de riego disponible, a la salida del invernadero hidropónico y la descarga de agua residual urbana. Junto con la

determinación del caudal de las descargas se determina el diseño del humedal artificial que se espera implementar en el área disponible alrededor del invernadero.

En el capítulo de resultados y discusión, se presentan las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados, y comparados con la normativa vigente del Acuerdo Ministerial 097-A Tabla 3 y Tabla 9 (Ministerio del Ambiente, 2015). La interpretación de resultados permite definir los parámetros de diseño del humedal artificial. En conclusiones que responden a los objetivos planteados y se presentan recomendaciones para investigaciones futuras.

Este trabajo fue posible realizarlo gracias a la apertura del dueño y persona responsable del cuidado del invernadero, quienes por su interés con el cuidado ambiental evaluarán los resultados presentados en este trabajo, para implementar el sistema de tratamiento. Entre la limitante que este proyecto puede presentar es el costo de implementación. Al poseer agua de riego a un costo mínimo que no supera los \$10 dólares anuales, y no evidenciar evidentes afectaciones a la salud de los responsables del invernadero o comunidad aguas abajo, la retribución económica para el dueño del invernadero es nula. Sin embargo, se espera que las partes interesadas puedan hacer buen uso de la información y los beneficios expuestos en este estudio, para la toma de decisiones.

Esta investigación es pertinente para transferir conocimientos a propietarios de invernaderos sobre la importancia del manejo sostenible del agua. En caso de su implementación en el invernadero hidropónico en estudio, la comunidad tendrá un modelo a seguir, para su réplica y en consecuencia el tratamiento adecuado de aguas residuales y su reutilización. De esta manera este proyecto presente una técnica de tratamiento viable, económica, amigable con el ambiente, presentando recomendaciones a futuro para su aplicación y generación de nuevas investigaciones.

Capítulo uno

Marco Teórico

1.1. Aguas Residuales

Las aguas residuales resultan del consumo de agua superficial o subterránea en el desarrollo de actividades antrópicas ya sean urbanas, industriales o agrícolas (Quispe Pérez et al., 2020). Los contaminantes en aguas residuales en los ecosistemas de agua dulce se presentan de manera disueltas, suspendidas o en estado coloidal aumentando la concentración y transmisión de patógenos, y la incidencia de toxicidad por metales pesados tanto en humanos como biodiversidad acuática (Wear et al., 2021).

1.1.1. Problemática del agua residual en el mundo

La escasez del agua y control de la contaminación de recursos hídricos son los mayores retos que amenazan el desarrollo sostenible de las poblaciones en todo el mundo (Durán-Sánchez et al., 2020). Las aguas residuales generadas no siempre mantienen un tratamiento adecuado, lo que llega afectar directamente a la vida acuática, desde la cadena alimentaria hasta su hábitat.

En la actualidad, la gestión adecuada de las aguas residuales sigue siendo un gran desafío que enfrenta la sociedad. Los contaminantes que se disuelven en las aguas residuales son diversos, entre los más destacados se encuentran los nutrientes, compuestos patógenos, sedimentos, químicos inorgánicos, metales pesados, productos de petróleo, farmacéuticos y compuestos orgánicos sintéticos (Durán-Sánchez et al., 2020).

1.1.2. Problemática de aguas residuales agrícolas

La calidad de aguas residuales agrícolas provenientes de actividades de cultivos, se generan a partir del crecimiento poblacional a medida de satisfacer la creciente demanda de alimentos, intensificando un elevado uso de insumos prácticos para aumentar y mejorar la calidad de los cultivos. La producción de cultivos comúnmente es acompañada por el uso de materias como pesticidas y fertilizantes químicos (FAO, 2017). Actividades como riego agrícola, limpieza de equipos y procesamiento de productos agrícolas generan aguas residuales agrícolas.

En los últimos años, la contaminación del agua por medio de residuos de insumos agrícolas se ha convertido en un problema crítico para los seres humanos y el entorno del ecosistema sobre la cadena alimentaria con efectos nocivos (Mo et al., 2018).

1.1.3. Estado actual del agua residual agrícola en Ecuador

El Gobierno del Ecuador entra en vigor en suministrar agua segura y de alta disponibilidad para sus habitantes. No obstante, se sostiene que hasta los últimos años las fuentes de agua dulce del país se encuentran contaminadas de materia orgánica y sustancias tóxicas (Philipp, 2020). Wingfield et al., (2021) exponen que hasta el año 2020 un 73% de la población ecuatoriana no presenta acceso a agua de buena calidad, y a su vez evidencia eventos de escasez de esta. Las fuentes más comunes de contaminación del agua en Ecuador son los desechos urbanos, la contaminación minera, extracción de petróleo y los agroquímicos (Kleinberg, 2021).

Entre los años 2010 y 2014, Ecuador utilizó más de 15.000 toneladas métricas de agroquímicos asociadas al uso de productos de pesticidas que incluyen fungicidas, insecticidas, herbicidas, etc. (Nicolopoulou-Stamati et al., 2016). Aunque estos insumos químicos ayudan a promover el crecimiento y cuidado de los cultivos, ciertos fragmentos son desechados llegando a almacenarse en el entorno natural (Deknock et al., 2019).

La mayoría de residuos agroquímicos conducen directamente hacia cuerpos de agua por escorrentía, ocasionando un aumento en niveles de nitrógeno y fósforo (Kleinberg, 2021). Un desequilibrio de estos nutrientes puede inducir a la eutrofización provocando zonas de hipoxia, que reducen la biodiversidad y el aumento de algas que originan problemas de sabor y olor, que comisionan la calidad del agua y el abasto de alimento acuático (Kleinberg, 2021).

1.1.4. Sistema de invernadero hidropónico y sus aguas residuales

La producción de cultivos a campo abierto se ve obstaculizada por diversos desafíos. El aumento de la urbanización ha obligado a trasladar las actividades agrícolas cada vez a áreas más distantes. Además, factores climáticos adversos, como inundaciones, sequías y la ausencia de sistemas de riego, han contribuido a la disminución de producción de alimentos. Ante esta situación, surge la necesidad de explorar o implementar nuevas tecnologías con el

objetivo de mejorar tanto la cantidad como la calidad del alimento disponible (Morales et al., 2020). Se conoce como sistema hidropónico a la actividad de cultivo de plantas a través de soluciones acuosas fortificadas de nutrientes en lugar de tierra para cultivar, bajo un invernadero (Delrue et al., 2021). Los sistemas hidropónicos se dividen en sistemas abiertos, donde la solución nutritiva excedente no se recicla, y sistemas cerrados, donde el exceso de flujo de nutrientes de las raíces se recolecta y se recicla nuevamente al sistema, dichos nutrientes sirven como requisito básico de combustible para el desarrollo del cultivo (Richa et al., 2020).

El sistema hidropónico que utiliza sustratos es llamado sistema abierto, por lo general presentan una solución nutritiva entre los 20% agua y 40% de nutrientes (nitrato, fosfato y sulfato), salinidad y pobres en materia orgánica (Delrue et al., 2021). Estos desechos, descartados directamente, son causantes de un impacto negativo en el medio ambiente. Además, los sistemas abiertos son considerados como técnicas derrochadoras, debido alto nivel de solución drenada como desecho (Rodríguez et al., 2016).

1.2. Parámetros de caracterización del agua residual proveniente de un invernadero hidropónico.

La caracterización de agua residual agrícola es esencial para evaluar su calidad, tomar decisiones sobre métodos de tratamientos que sean efectivos, económicos, técnicamente viables y lograr cumplir con la normativa ambiental vigente (Tak et al., 2012). Esta caracterización se realiza mediante la medición de parámetros físicos, químicos y biológicos.

1.2.1. Parámetros físicos

1.2.1.1. Temperatura.

La temperatura es uno de los componentes físicos más significativos en el agua, influyen en la aceleración o demora de un proceso biológico, siendo importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos dependen de la temperatura. Comúnmente la temperatura del agua residual suele ser más elevada que la del agua libre de contaminantes (Ayuque & Poma, 2022).

1.2.1.2. Turbidez.

La turbidez de las aguas residuales es considerada como una medida de pérdida de su transparencia por motivos carga de material particulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua. Para determinar la presencia de turbiedad se utiliza un turbidímetro, y esta se expresa en unidades nefelometrías de turbiedad (NTU) (Delgadillo, Camacho, Pérez , & Andrade, 2014).

1.2.1.3. Color.

El agua residual presenta coloraciones variables dependiendo de la cantidad de materia orgánica y productos químicos utilizados en el sistema. El color del agua se mide a través de unidades de platino/cobalto (Pt/Co). El color de una muestra de agua se clasifica de dos maneras: color aparente (consta de componentes disueltos y suspendidos) y color real (a parencia después de la filtración) (Hassan Omer, 2019).

1.2.1.4. Conductividad eléctrica (CE).

La conductividad eléctrica es un indicador de concentración de nutrientes disueltos y sales del agua. Este parámetro de conductividad es comúnmente utilizado para establecer la amplitud del agua de riego su medida es micro o milisiemen por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) / (mS/cm) medidos en un conductímetro (Ayuque Milagros & Poma Vidal, 2022).

1.2.1.5. Sólidos Totales (ST).

Los sólidos totales hacen referencia a la cantidad total de materia solida presente en el agua, estos se manifiestan de diferente forma, la primera en solidos suspendidos en forma de partículas finas o coloides, y solidos disueltos como sustancias que no se pueden ver a simple vista (Delgadillo et al., 2014).

1.2.1.6. Solidos Suspendidos Totales (SST)

Los sólidos suspendidos es el parámetro que indica la cantidad de solidos presentes en suspensión en cuerpos de aguas, los cuales pueden ser separados a través de métodos de laboratorio. Las aguas con abundantes sólidos suspendidos generalmente afectan negativamente a la calidad de agua y pueden ser estéticamente no satisfactorias (Chacón Chaquea, 2017).

1.2.2. Parámetros Químicos y Biológicos

1.2.2.1. Potencial hidrógeno (pH).

Es una medida que determina si una sustancia es ácida, neutra o alcalina, calculando el número de iones de hidrogeno. Muchas de las propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración de ion hidrogeno en solución. El tipo de medida escala exterioriza valores a una escala de 0 a 14. Siendo valores de pH menores de 7 indican que el líquido es ácido, los valores mayores a 7 indican una sustancia alcalinidad y los valores con un pH de 7 indican que la sustancia es neutra (Frías Quiñones & Montilla Cabudiva, 2016).

1.2.2.2. Demanda Química del Oxígeno (DQO).

Describe la técnica de medir el equivalente a la materia orgánica e inorgánica oxidable a través de uso de agentes químicos oxidantes fuertes (Delgado Carreño, 2016). Su concentración se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L). Los valores de DQO en teoría 50% más elevados que los valores de DBO para la misma muestra (Hassan Omer, 2019).

1.2.2.3. Demanda Biológica del Oxígeno (DBO₅).

Cantidad de oxígeno necesario para llevar a cabo actividades de oxidación biológica en componentes de aguas residuales. La DBO₅ mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en aguas residuales. Se considera el consumo de oxígeno durante transcurso de 5 días en oscuridad y a una temperatura de 20°C, su concentración se expresa en mg/L (Frías & Montilla, 2016).

1.2.2.4. Nitrógeno total (TN).

El indicador de nitrógeno total hace referencia a las cantidades de nitrógeno utilizadas para el crecimiento vegetal de sistemas de invernadero, abordando todas las medidas de varias formas de nitrógeno incluyendo nitratos, nitritos, amonio, compuestos orgánicos nitrogenados (HACH, 2015). Si el agua residual posee concentraciones de nitrógeno superior a 50 mg/L forman aguas enriquecidas en nutrientes, originando la eutrofización (Jiménez Monroy et al., 2016).

1.2.2.5. Aceites y Grasas (A y G)

Los aceites y grasas tienen como característica principal la insolubilidad en el agua. La procedencia de este componente tiene su origen principalmente de actividad antropogénica. Al presentarse concentraciones elevadas de aceites y grasas produce problemas de transferencia de oxígeno además de presentar películas envolventes de floculas biológicas que impiden el desarrollo de la biodiversidad en el agua (López & Andrés, 2018).

1.2.2.6. Hierro (Fe).

La presencia de hierro en aguas residuales agrícolas se encuentra relacionado con varios factores y prácticas comunes en la agricultura, incluyendo su presencia natural en suelos ricos en hierro o como uso de fertilizantes y productos químicos como un macronutriente en la agricultura (Rodríguez Huamani, 2022). Este elemento se caracteriza por los cambios de oxidación, Fe^{+2} (ferroso) o Fe^{+3} (férrica). Siendo el Fe^{+3} la forma más abundante en el sistema de las plantas e importante en los sistemas redox (Beltrano & Giménez, 2015).

1.2.2.7. Cobre (Cu).

El cobre es utilizado comúnmente en la agricultura como fertilizante y fungicida en la protección de cultivos. Además, el elemento se destaca como macronutriente esencial para mantener un correcto metabolismo en los seres vivos, no obstante, al presentarse en concentraciones altas tiende a ser tóxico para ecosistemas acuáticos (Méndez et al., 2009). Una gran concentración de cobre en el organismo es capaz de dañar ciertos organismos del cuerpo o peor aún, la muerte (Chávez Cárdenas, 2019).

1.2.2.8. Manganeseo (Mn).

El manganeso en concentraciones normales favorece el crecimiento de las plantas, vía fertilizantes o abonos químicos (Lovera Muñoz, 2019). Sin embargo, en altas concentraciones en las aguas residuales agrícolas puede tener impactos negativos en el medio ambiente acuático. Este metal es considerado un micronutriente para la nutrición vegetal, siendo la más conocida en el desarrollo fotosintético del cultivo e interviene como activador de numerosas enzimas (Beltrano & Giménez, 2015). En pequeñas cantidades

genera turbiedad y disminución de la calidad estética de los cuerpos hídricos (Chirinos Málaga, 2022).

1.2.2.9. Zinc (Zn).

El zinc es un metal poco soluble tiene la capacidad de adherirse a sedimentos y lodos de cuerpos hídricos. En la intervención del hombre se presentan como productos de fertilizantes fosfatados y pesticidas que contienen cadmio en la agricultura (Mancilla-Villa et al., 2023). Este metal a menudo se encuentra en aguas residuales de actividades agrícolas, si se manifiesta en elevadas concentraciones puede tener efectos negativos en los organismos acuáticos y en la calidad del agua, causando toxicidad para todo ecosistema acuático (Beltrano & Giménez, 2015).

1.2.2.10. Plomo (Pb).

Este metal presenta una baja movilidad lo que le permite depositarse en la franja de los efluentes, pero a medida que las actividades humanas como la agricultura se intensifican en las cercanías de los recursos hídricos, su concentración puede resultar tóxica para los seres vivos, organismos del suelo, agua, plantas y animales (Mancilla-Villa et al., 2023). El Pb puede provocar daños a la salud del cuerpo humano e impactos de la biodiversidad de los alrededores (Ojeda, 2022).

1.2.3. *Parámetros Microbiológicos*

1.2.3.1. Coliformes fecales.

Son indicadores de calidad, debido a que su mayoría son de origen fecal proveniente del microorganismo del género *E. coli*, alcanzado un rango de temperatura óptimo (45°C) para su crecimiento (Frías & Montilla, 2016).

1.3. Técnicas de tratamiento

Frente a la necesidad de tratamiento de aguas residuales ocasionados por sectores agrarios, se presentan técnicas innovadoras y eficientes, que son de bajos costos, sencillos requerimientos de operación y mantenimiento.

1.3.1. Humedales artificiales

Los humedales artificiales, se presentan como técnicas naturales diseñadas por el hombre, para el tratamiento de aguas residuales que pueden ser efectuadas de manera sostenible y amigable con el ambiente. Los humedales artificiales imitan las condiciones óptimas de tratamiento que se pueden encontrar en los humedales naturales, con adaptabilidad en distintos lugares y condiciones ambientales (Hadidi, 2021).

Es considerada una tecnología respetuosa con el medio ambiente, desempeñando un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Según Hadidi, (2021a) los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales sustituyeron los procesos y objetivos convencionales de tratamiento de aguas residuales para crear un sistema de tratamiento sostenible y sólido.

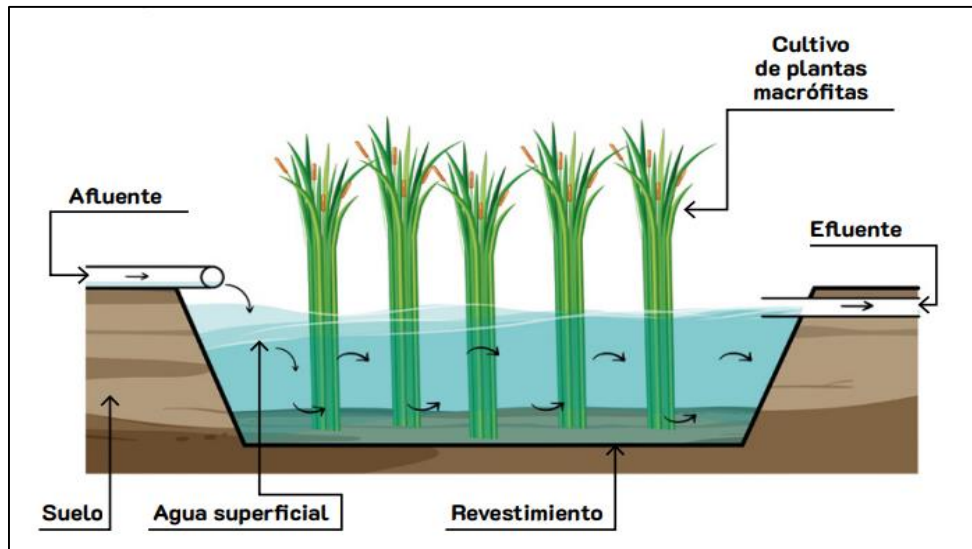
La capacidad de los humedales en el tratamiento de aguas residuales está definida principalmente por la hidrología, el modo de alimentación del afluente, el tipo de especies de plantas acuáticas, la tasa de carga superficial, el sustrato, la temperatura y la disponibilidad de microorganismos (Mustafa et al., 2021). Los humedales artificiales se pueden subdividir en flujo superficial y flujo subterráneo, considerando algunas combinaciones entre esto, también conocidos como humedales híbridos y aquellos que cuentan con la inyección de aire, como son los humedales aireados (Doto et al., 2017).

1.3.1.1. Humedal Artificial de Flujo Superficial (HAFS).

El humedal de flujo superficial (HASF), se caracteriza por comprender una cuenca poco profunda, suelo u otro medio para soportar las raíces de la vegetación, y una distribución de control de agua (Hadidi, 2021). Tiene macrófitas que imitan humedales naturales y, como efecto, se espera una gran diversidad de actividad silvestre (insectos, moluscos, aves, mamíferos, etc.) dentro de la gran área de tierra necesitada (Retta et al., 2023). En la figura 1, se muestra la representación del HAFS.

Figura 1

Diagrama esquemático de un HAFS



Nota. Representación gráfica tomada de (Gonzalez-Diaz et al., 2022).

Las aguas residuales que se tratan en estos sistemas representan generalmente un tratamiento que permite la eliminación de sólidos totales suspendidos (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO_5), patógenos, como las bacterias y los virus, y otros contaminantes (Retta et al., 2023).

1.3.1.2. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS).

Los humedales de tratamiento de flujo subsuperficial se subdividen en humedales de flujo horizontal (HHF) y humedales de flujo vertical (HFV) acatando la dirección del flujo de agua, en estos dos tipos de humedales la grava que es generalmente utilizada como sustrato, que está saturado y plantado con plantas precisas para humedales, además de mantener el nivel del agua por debajo de la superficie (Dotro et al., 2021).

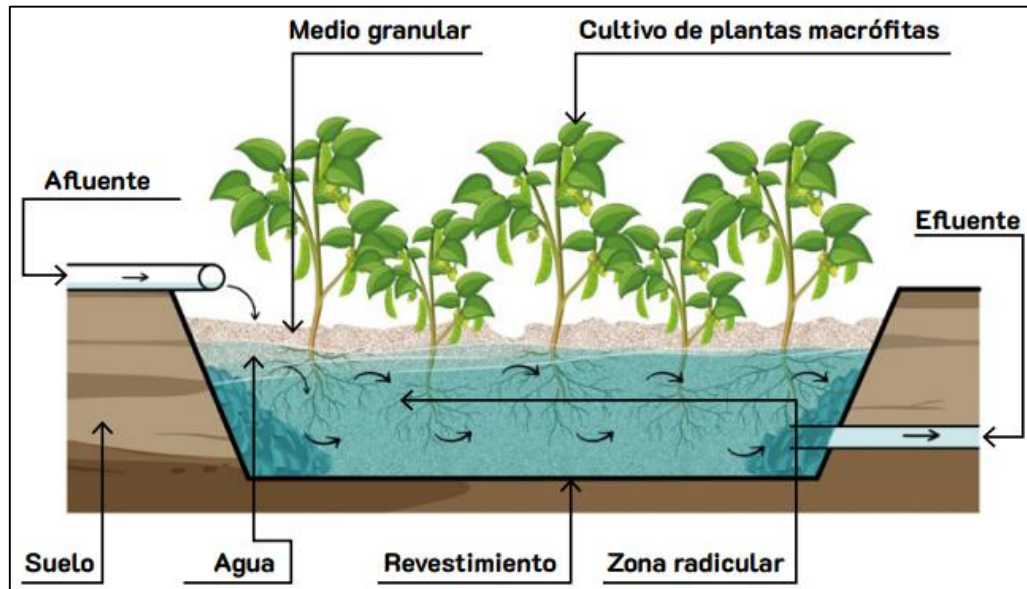
1.3.1.2.1 Humedal Artificial de flujo horizontal (HAFH).

En el caso de los humedales de FH, el agua entra al sistema de tratamiento por un extremo, fluye lentamente en forma horizontal través de un medio poroso (sistema radicular de plantas macrófitas) y se recoge en el extremo opuesto de la cama. La profundidad de los HAFH varían entre 0.3 m y 1.0 m, sin embargo, un valor de 0.5 m resulta ser común para tratamiento de aguas residuales agrícolas (Gonzalez-Diaz et al., 2022). Todo el lecho se

encuentra protegido por una combinación de plástico y una membrana geotextil (Dotro et al., 2021). El modelo del humedal artificial de flujo horizontal se puede observar la figura 2.

Figura 2

Esquema de la Sección Transversal de un HAFH



Nota. Representación gráfica tomada de (Gonzalez-Diaz et al., 2022).

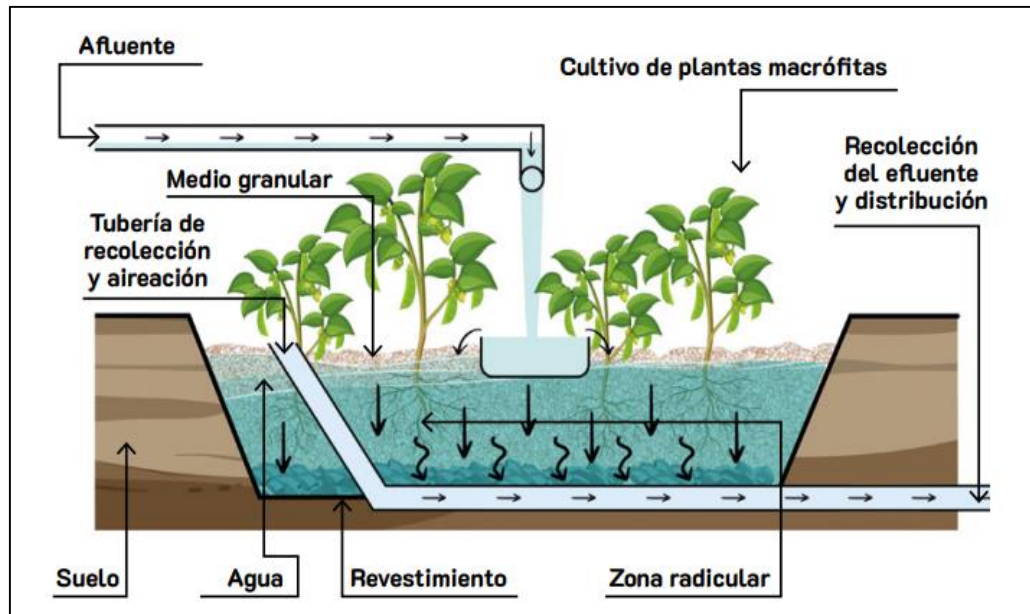
Los HAFH son capaces de eliminar DBO_5 , SST, y TN siendo eficaces para la desnitrificación a condiciones de que haya suficiente nitrato y carbono presente en la columna de agua (Dotro et al., 2021).

1.3.1.2.2 *Humadales de Flujo Vertical (HFV).*

En este tipo de humedal el agua residual es vertida de forma vertical a través de un campo de raíces filtrantes hasta el fondo del sistema (Gonzalez-Diaz et al., 2022). Todo el lecho se encuentra aislado por un terreno circundante por medio de una combinación de revestimientos de plástico y una membrana geotextil (Dotro et al., 2021). En la figura 3, se muestra el modelo de un HFV.

Figura 3

Esquema de la Sección Transversal de un Humedal de Flujo Vertical



Nota. (Gonzalez-Diaz et al., 2022).

Este tipo de modelo de humedal generalmente, los contaminantes son degradados aeróbicamente. Son útiles para la degradación de materia orgánica (DBO₅ o DQO), nitrógeno amoniacal, sólidos totales y organismos patógenos (Dotro et al., 2021).

1.3.1.3 Humedales Artificiales Híbridos.

Los diferentes tipos de humedales pueden ser combinados con el fin de lograr una mayor eficacia en el tratamiento, en especial para la eliminación de nitrógeno y patógenos. En este caso, las ventajas de los sistemas de FH y FV se combinan para complementarse entre sí (Hoffmann et al., 2011). Además, los sistemas híbridos pueden utilizar una combinación de sistemas basados en agua y sustrato dependiendo de las necesidades de tratamiento, el clima, el suelo y la energía disponible (Cross et al., 2023).

1.3.1.4 Humedales con inyección de aire.

Los humedales para tratamiento aireados (HTA) son un tipo avanzado de sistemas de humedales para tratamiento, que permiten una eliminación más eficiente de contaminantes de las aguas residuales debido a la mayor disponibilidad de oxígeno. Este tipo de sistema es

excelente para el tratamiento de aguas residuales con altas cargas orgánica y para minimizar la huella ecológica (Cross et al., 2023).

El sistema de humedales aireados usa una bomba de aire conectada a una red subsuperficial de tuberías de distribución de aire para introducir burbujas al agua a tratar, sirve para incrementar la transferencia de oxígeno, permitiendo un desempeño eficaz con respecto a la nitrificación y desnitrificación, remoción de materia orgánica recalcitrante de forma intermitente (Dotro et al., 2017).

1.3.2 Componentes y requerimiento de construcción de los humedales artificiales

Los humedales artificiales requieren cuatro componentes: revestimiento, medio de distribución (sustrato), vegetación y un sistema de drenaje subterráneo, entre los materiales más comunes y confiables se encuentran el cloruro de polivinilo (PVC) (Hadidi, 2021a). Estos componentes de humedales son sistemas que congregan diferentes unidades que trabajan juntas para certificar que se logre el propósito de depuración, además la elección de humedales artificiales depende de las condiciones ambientales, así como de cuán apropiados sea la interacción y mantenimiento de los componentes para el tratamiento de aguas residuales agrícolas (Omondi & Atalitsa, 2020).

Agua: los humedales se forman sobre sustratos que están totalmente sumergidos en agua, donde una capa subsuperficial relativamente impermeable evita que el agua superficial se filtre en el suelo. La hidrología se rige como factor fundamental en el diseño de humedales artificiales, debido a que dependiendo del flujo se logra la remoción de ciertos contaminantes principalmente por procesos físicos como precipitación o químicos como nitrificación y desnitrificación (Omondi & Atalitsa, 2020).

Sustrato: dentro de los humedales artificiales los sustratos pueden ser arena, grava, roca y materiales orgánicos. Ofrecen sustento a muchos de los organismos vivos en los humedales, actúan como fuente permeable sobre el movimiento del agua a través del humedal (Omondi & Atalitsa, 2020). Además, permite la remoción de contaminantes a través de filtración, adsorción, suministro de electrones, apoyo al crecimiento de las plantas y la producción microbiana (Ji et al., 2022).

Vegetación: En funcionamiento del sistema humedales artificiales se encuentran numerosas especies de vegetación, se presentan tanto como plantas vasculares como no vasculares, actuando como principales puntos de detención y captura de los componentes contaminantes a través de procesos biológicos naturales de la flora (Omondi & Atalitsa, 2020).

1.4 Marco Legal

1.4.1. Normativas suplementarias nacionales

1.4.1.1. Constitución de la República del Ecuador 2008.

Capítulo segundo, segunda sección: del medio ambiente; Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumakkawsay.

Capítulo segundo, segunda sección: del medio ambiente; Art. 395.- Declara que las políticas de la gestión ambiental se aplicaran en cualquier parte del Estado y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional. La participación de las personas será activa y permanente en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales. *Art. 396.-* El Estado será el encargado de aportar las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, adoptando medidas protectoras eficientes y oportunas (Ecuador, 2021).

1.4.1.2. Texto unificado de Legislación Secundario del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio Ambiente (TULSMA) es la norma técnica ambiental dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de estos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, 2015).

En Ecuador se ha establecido una norma (TULSMA) tramitada por la normativa vigente de Acuerdo Ministerial 097-A, mantiene el objetivo primordial de controlar y prevenir la contaminación ambiental de los recursos del agua (Ministerio del Ambiente, 2015). Se prohíbe la descarga de residuos líquidos sin tratar hacia los cuerpos receptores, canales de

conducción de agua a embalses, canales de riego o canales de drenaje pluvial, provenientes agroquímicos u otras sustancias tóxicas, entre algunos (MAE, 2015).

1.4.1.2.1 Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua

El libro VI Anexo I El Libro VI Anexo I “Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes: Recurso Agua”, establece los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos y las normas generales de descarga de efluentes, para el presente se tomarán en cuenta la Tabla 3: Criterios de calidad de aguas para riego agrícola, y Tabla 9: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, 2015).

Capítulo dos

Metodología

2.1. Área de estudio

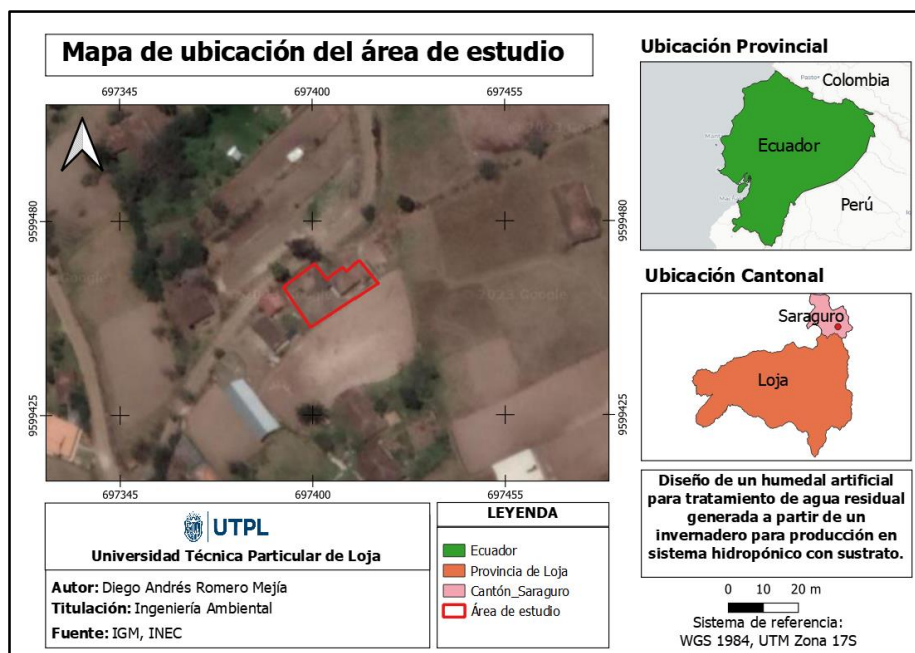
El presente estudio se realizó en la comunidad de Ñamarín, poblado ubicado en el cantón Saraguro de la provincia de Loja. El cantón Saraguro se caracteriza por la producción agropecuaria. La comunidad Ñamarin preserva dicha actividad para su estabilidad económica, pues impulsa el turismo comunitario integrando a los visitantes en sus actividades, como la preparación de los alimentos en cocina de leña, elaboración de tejidos, el cultivo de la tierra y actividades ganaderas (Ochoa, 2018). Los cultivos hidropónicos a pesar de haber ganado aceptación en Cuenca, Tungurahua, El Quinche (Villegas, 2021), está iniciando en la comunidad de Ñamarin.

De esta manera, la presente investigación se llevó a cabo en el primer invernadero con sistema hidropónico con sustrato ubicada en la comunidad. Se encuentra dentro de los paralelos 0696873 latitud; 0599802 longitud y está a una altura de 2086 msnm.

En la figura 4 se presenta una imagen de la ubicación de la zona de estudio, donde se determinaron tres puntos de muestreo de agua. El primero representa el cuerpo de agua de captación para examinar las condiciones en las que se encuentra el agua que suministra el sistema hidropónico. El segundo, representa la descarga del invernadero, que recolecta toda el agua infiltrada a través del sistema del invernadero. Por último, el tercer punto representa la descarga del hogar de la propietaria del sistema. Este punto se consideró con el fin de asegurar que no solo el agua residual agrícola, pero también doméstica sea tratada, además de que el humedal una vez implementado mantenga sus niveles de agua estables.

Figura 4

Ubicación de la Zona de Estudio en la Comunidad Ñamarin



Nota. Zona de la instalación del invernadero con sistema hidropónico.

Dentro de la zona de estudio, se elaboró una entrevista con el propósito de obtener información directa de la responsable del mantenimiento y control de actividades que mantienen el sistema hidropónico, y a un poblador del área para conocer sobre el uso y saneamiento de las aguas residuales. En el Apéndice A. se presenta la encuesta llevada a cabo a los dos pobladores mencionados.

2.2. Muestreo y recolección de la muestra

La toma de muestras se dividió en dos fases considerando temporadas de invierno y verano, con el propósito de evaluar si existe variación de los parámetros fisicoquímicos principalmente en el agua de captación, o si por efectos de dilución por el agua lluvia, cambian las condiciones del agua residual. Además, se registró la variación del caudal en ambas descargas, para definir el diseño del humedal artificial.

Para la medición del caudal del agua residual que llegaría al humedal, se consideró un método volumétrico que consistió en la recolección de agua en un recipiente de volumen conocido en un determinado tiempo. Esta técnica de medición se aplicó durante un día completo, tomando mediciones del volumen de agua en un lapso de 30 minutos.

Las herramientas que se utilizaron para la recolección de muestras y determinación de parámetros fisicoquímicos fueron botellas de plástico de policloruro de vinilo, recipientes plásticos esterilizados para análisis microbiológicos de 250 ml y envases ámbar de 1L para la determinación de aceites y grasas. Adicional se aseguró el uso de etiquetas de identificación, hojas de campo para el registro de valores de parámetros in situ y datos de geolocalización. Para esto fue necesario un GPS, un termohigrómetro y un multiparámetro con sondas de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura del agua. Las muestras se colocaron dentro de un cooler para su traslado al laboratorio analítico, donde se preservaron a 4°C.

2.3. Caracterización física, química y biológica de las muestras de agua

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron en el laboratorio de ingeniería ambiental de la UTPL. La tabla 1 presenta los parámetros considerados en este estudio. Para asegurar la precisión de los análisis, todas las muestras fueron analizadas a temperatura ambiente, es decir a una temperatura entre 20 a 25°C.

Tabla 1

Métodos y Técnicas de Ensayo

Ensayo	Unidad	Método de ensayo	Técnica de ensayo
pH	-	AOAC, 973.41	Potenciométrico
Conductividad Eléctrica	μS/cm	AOAC, 973.40	Potenciométrico
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	SM 5220 D	Espectrofotométrico
Demanda Biológica de Oxígeno	mg/l	SM 5210 D	Respirométrico
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	SM2540-D	Gravimétrico
Sólitos Totales	mg/l	SM 2540 B	Gravimétrico
Color verdadero	PtCo	SM 2120-C	Espectrofotométrico
Aceites y Grasas	mg/l	SM 5520-D	Gravimétrico
Nitrógeno Total	mg/l	SM 4500-Norg - B	Volumétrico
Coliformes Fecales	NMP/100ml	ISO 9308-2-2012	Conteo de placas
Hierro	mg/l	US EPA 3015; SM3111 B	Espectrofotométrico
Cobre	mg/l	US EPA 3015; SM3111 B	Espectrofotométrico
Plomo	mg/l	US EPA 3015; SM3111 B	Espectrofotométrico
Manganeso	mg/l	US EPA 3015; SM3111 B	Espectrofotométrico

Zinc	mg/l	US EPA 3015; SM3111 B	Espectrofotométrico
-------------	------	-----------------------	---------------------

Nota. En esta tabla se pueden visualizar los distintos métodos y pruebas empleados en la práctica de laboratorio.

2.4. Parámetros físicos

2.4.1. Conductividad Eléctrica (CE)

El análisis de la conductividad eléctrica se basó en el método AOAC 973.40 en el equipo conductímetro de modelo SevenCompact S230-Mettler Toledo. Se introdujo el electrodo en la muestra de agua hasta que se estabilice su lectura y se procedió a registrar los valores de conductividad con unidades en $\mu\text{S/cm}$ y mS/cm . Para evitar interferencias con respecto a la medición, se toma en cuenta que la muestra se encuentre a temperatura ambiente y mantener el equipo limpio, enjuagar y secar el electrodo antes y después de las lecturas para cada muestra.

2.4.2. Color real

Se empleó el método SM 2120-C. La lectura de 25 ml de muestra filtrada se realiza mediante un espectrofotómetro a una longitud de onda de 455 nanómetros. Los valores obtenidos se expresen en unidades de (Pt/Co).

2.4.3. Sólidos Totales (ST)

Se aplicó el método de SM 2540-D a través de la medición gravimétrica. Se trabajó a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para tara de material y evaporación de agua. Previo a la toma de 100 ml de muestra, esta se agitó por 1 minuto en el equipo de agitador magnético (GFL 3018 y Schudder- Gemini BV). Para cuantificar la concentración de sólidos totales se empleó la ecuación 1.

Ec.1

$$\text{Sólidos Totales (ST)} = (\text{Peso final de la capsula (g)} - \text{Peso inicial de la capsula (g)}) * 10000$$

2.4.4. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Su determinación se basó en el método de SM 2540-D, se trabajó siguiendo las mismas especificaciones que sólidos totales con la diferencia que los sólidos suspendidos se retienen en filtros de tamaño de poro de 1.5 μm .

Para la filtración de la muestra se utilizó un embudo Buchner. Para determinar la concentración de los SST se utilizó la ecuación 2.

Ec. 2

$$(SST) = \left(\frac{((\text{Peso final del filtro (g)} - \text{Peso inicial del filtro (g)}) * 1000 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right))}{\text{Volumen de muestra (ml)}} \right)$$

2.5. Análisis de parámetros químicos

2.5.1. Potencial Hidrogeno (pH)

Para la determinación de pH se aplicó el método AOAC 973.41 utilizando un pH-metro digital modelo SevenCompact pH-meter S220, Mettler Toledo previamente calibrado. Se introdujo el electrodo, en el vaso de precipitación con muestra, sin tocar las paredes ni el fondo del recipiente, ya que esto podría afectar la lectura. Se esperó a que la lectura del pH se estabilice y se registró el valor indicado en la pantalla del pH-metro. Después de cada medición, se limpió el electrodo con agua desionizada y se secó suavemente con papel.

2.5.2. Oxígeno Disuelto (OD)

Se llevó a cabo la medición de oxígeno disuelto por medio del método AOAC 973.40 utilizando el equipo multímetro (HQ 40d-A). Este parámetro al igual que pH y conductividad fueron medidos en el campo, y en el laboratorio solamente por método de comprobación o control de calidad de estabilidad de las muestras. Sin embargo, para propósitos de análisis los datos in situ son los considerados.

2.5.3. Demanda Química del Oxígeno (DQO)

La DQO se determinó con el método de ensayo SM 5220 D utilizando el espectrofotómetro marca HACH DR 2800. Se consideró para este propósito, mediciones de rango bajo que detecta concentraciones de 3 a 150 mg/L a una longitud de onda de 430 nm.

2.5.4. Aceites y grasas

Se siguió el método SM 5520-D aplicando una técnica de ensayo gravimétrico. Se utilizó el equipo analítico de extracción Soxhelt líquido-líquido usando hexano como solvente para la extracción de aceites y grasas. Se utilizó 1 litro de muestra de agua con un pH ajustado a 2 con HCl. La grasa existente en la muestra se retiene en 1 gramo de tierra de diatomeas que previo a la extracción con hexano se lleva a sequedad a una temperatura de 105 °C por un periodo de 30 minutos. Para la determinación de aceites y grasas se usó la ecuación 4.

Ec. 4

$$\text{Aceites y Grasas} = \left(\frac{\text{Peso final de la capsula (g)} - \text{Peso inicial de la capsula (g)}}{\text{volumen de muestra (ml)}} \right) * 10000$$

2.5.5. Nitrógeno total

Para la determinación del nitrógeno total se utilizó el método SM 4500-Norg-B por medio de la técnica volumétrica en el equipo digestor Macro Kjeldahl, la cual consta de tres etapas de trabajo. La primera etapa incluye procesos de digestión, seguida de una etapa de destilación y por último una etapa de titulación. A continuación, se muestra la ecuación 3 utilizada para determinar la concentración de nitrógeno total en la muestra.

Ec. 3

$$\text{Nitrógeno Total } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Volumen del viraje} * \text{normalidad del ácido} * \text{Peso Molecular} * 100}{\text{Volumen de muestra}}$$

2.5.6. Metales

La determinación de metales pesados se basó en el método US ESPA 3015; SM 3111 B, su técnica de ensayo se sustentó por espectrofotometría a través del equipo de absorción atómica de llama (marca Perkin Elmer y modelo AA400). Todas las muestras fueron digeridas, en el sistema de digestión de microondas (LUTPL-MMC-32) previo a la lectura de metales (hierro, cobre, manganeso, zinc y plomo).

2.6. Parámetros biológicos

2.6.1. Demanda bioquímica del Oxígeno (DBO5)

Para determinar la demanda bioquímica del oxígeno se siguió el método de SM 5210 D. Se utilizaron botellas con cabezal o sensor VELP para medir la cantidad de oxígeno

consumido en el transcurso de cinco días a 20°C en la incubadora (VELP SCIENTIFICA IVS-47, obteniendo las lecturas directas en mgDBO₅/l.

2.7. Análisis de parámetros microbiológicos

2.7.1. Coliformes fecales

La determinación de coliformes fecales se basó en la norma ISO 9308-22012 por medio de técnicas de conteo de placas utilizando el quipo ESCO e incubadora blinder. Se trabajó con 100 ml de muestra o solución de muestra con agua bufferada, añadidas en un Boeco previamente esterilizado junto con el reactivo colilert-18. Se procedió a verter la solución dentro de una placa de medición, la placa se cubrió en el equipo Sellador de bandejas (Quanti-Tray PLUS) y se resguardado dentro de una incubadora blander (LUTPL-IB-19) durante 18 horas a una temperatura 44.4 °C. Acto seguido se retiró las placas de la incubadora y se realizó la identificación de los pocillos teñidos de amarillo para cuantificar Coliformes a través de la tabla IDEXX Quanti-Tray/2000 MPN.

2.8. Diseño de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales agrícolas

Para el diseño de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, se debe considerar diversas variables de estudio como parámetros hidráulicos, el tipo de humedal, la caracterización de la zona referente al tipo de agua residual, el área del terreno, clima y la vegetación (Dotro et al., 2017). Entre los parámetros fisicoquímicos se considera la concentración de DBO₅ y Nitrógeno total (Vidal & Hormazábal, 2018). Para el presente estudio se aplicó el modelo PKC que considera una constante de la tasa de eliminación del área (k), las concentraciones de fondo (C*) y la hidráulica no idealizada en condiciones de estado estacionario, siendo eficaz para la eliminación de contaminantes como DQO, nitrógeno amónico (NH⁴⁺ - N), nitrato (NO³⁻), TP, TN y SST (Singh et al., 2022).

Ec 5. Enfoque P-k-C*:

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Donde:

A = área, (m²)

P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional

Q = cantidad de aguas residuales, (m³/año)

k_a = constante de área de primer orden, (m/año)

C_i = concentración de entrada, (mg/L)

C_o = concentración de salida, (mg/L)

C* = concentración de fondo, (mg/L)

Ec 6. Tiempo de retención hidráulica nominal

$$\tau = \frac{\text{Volumen del liquido}}{\text{Caudal}} = \frac{\varepsilon V}{Q_i} = \frac{\varepsilon h A}{Q_i}$$

donde:

τ = tiempo de retención hidráulica nominal (teórico), d

ε = porosidad (fracción de volumen del humedal ocupado por el agua), adimensional

h = profundidad del agua en el humedal, m

A = Área superficial del humedal, m²

Q_i = Caudal de entrada o afluente, m³ /d

Capítulo tres

3. Resultados y Discusión

Tabla 2

Resultados de parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos

	Físicos				Químicos						Biológicos	Microbiológicos
	Temp. (°C)	Color (Pt/Co)	ST (mg/l)	SST (mg/l)	pH	CE (µS/cm)	OD (mg/l)	DQO (mg/l)	NT (mg/l)	A y G (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	CF (NMP/100ml)
LMP Tabla 3	NA	NA	NA	NA	6-9	NA	Mínimo 3	NA	NA	Ausencia película visible	NA	1000
LMP Tabla 9	condición natural ±3	Inapreciable en dilución 1/20	1600	130	6-9	NA	NA	200	50	30	100	2000
Captación												
Muestreo 1	15.3	53	58	2	8.08	29.4	8.82	<LC	5.6	1	<LC	6090
Muestreo 2	14.9	100	72	6	7.73	37.4	8.95	<LC	26.6	2.3	<LC	14420
Muestreo 3	15.9	41	103	4	8.32	40.3	8.53	<LC	9.8	1.1	<LC	14000
Muestreo 4	15.3	136	91	14	8.36	35.4	7.92	<LC	4.2	0.8	<LC	Ausencia
Descarga Invernadero												
Muestreo 1	15.4	260	355	2	7.26	314	8.82	101	8.68	1.4	15	173290
Muestreo 2	16.5	297	246	93	7.54	190.9	7.06	75	212.8	1.3	44	4860
Muestreo 3	16.1	227	316	4	7.88	314	6.91	62	20.16	1.6	<LC	Ausencia
Muestreo 4	18.3	296	486	4	7.66	438	6.95	71	6.72	0.9	<LC	Ausencia
Descarga Doméstica												
Muestreo 1	16.2	381	191	24	7.8	221	6.8	<LC	9.24	1.4	<LC	17890
Muestreo 2	13.6	414	2644	1313	7.72	390	6.07	<LC	36.4	2.2	<LC	Ausencia
Muestreo 3	14.6	500	416	52	7.67	159.8	6.51	47	6.44	1.9	<LC	Ausencia
Muestreo 4	16.9	195	448	30	7.63	392	6.98	69	6.16	2.3	12	Ausencia

Nota. Los datos se presentan de tal manera que los muestreos 1 y 2 representan valores de muestreo realizados en verano y los dos muestreos 3 y 4 en invierno. Las concentraciones marcadas en rojo indican los valores que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles (LMP) ya sea para la Tabla 3 o 9 del Acuerdo Ministerial 097-A. NA = no aplica, puesto que no se encuentra el parámetro normado.

La tabla 2 presenta valores de los diferentes parámetros medidos tanto en el campo como parámetros in situ (pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno disuelto y Temperatura), tomados en cuenta debido a la naturaleza específica y Temperatura, y parámetros ex situ medidos en el laboratorio de ingeniería ambiental. Los primeros dos muestreos corresponden al periodo de verano, mientras que los dos siguientes se llevaron a cabo en invierno.

Para el análisis de resultados y definición del diseño del sistema de tratamiento, los resultados de los parámetros fueron comparados con las Tablas 3 y 9 del Acuerdo Ministerial 097-A. En aquellas ocasiones, que los parámetros como color, sólidos totales, sólidos suspendidos, y nitrógeno total sobrepasan los límites máximos permisibles los valores se indican en color rojo.

3.1.1. Color Real

Los datos obtenidos para el punto de captación presentan valores que oscilan entre 53 Pt/Co a 136 Pt/Co, los cuales se encuentran dentro del rango del límite permisible de la Tabla 3. Por otro lado, para los puntos de descargas sus valores son más elevados, dentro del tercer muestreo presentan valores de 297 Pt/Co y 500 Pt/Co, datos que se encuentran fuera de los límites permisibles correspondiente a la Tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097-A.

El motivo de tener un resultado elevado de color real en épocas de invierno se da por la presencia de lluvia que arrastra consigo una mayor cantidad de sólidos de la acequia hacia la captación, lo cual se puede comparar con los resultados de sólidos totales y suspendidos que también demuestran concentraciones elevadas en épocas de invierno. No obstante, en épocas de verano también se obtuvo concentraciones elevadas, como es el caso del muestreo 2 del punto de captación, dando a entender que se llegan a presentar actividades ganaderas y agrícolas que intervienen en el cauce del agua.

3.1.2. Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos

La mayoría de los resultados de ST y SST se encuentra dentro de los límites máximos permisibles de la Tabla 3 y la Tabla 9 del Acuerdo Ministerial 097-A. Sin embargo, en el punto de descarga doméstica del muestreo 2 presentan variaciones de 2644 mg/l y 1313 mg/l, datos que sobrepasan los límites permisibles de la Tabla 9 del AM 097-A. El aumento de sólidos

totales y suspendidos presente en este muestro se da debido a las actividades domésticas llevadas a cabo previo al muestreo, lo que genera la presencia de materia orgánica y el arrastre de contaminantes químicos en la superficie del agua.

El tratamiento de humedales artificiales de flujo horizontal presenta opción de remoción para sólidos totales y sólidos suspendidos. La eliminación se da por procesos físicos como la sedimentación y la filtración de acuerdo con la degradación microbiana aeróbica y anaeróbica dentro del sustrato (Thalla et al., 2019).

3.1.3. Nitrógeno Total

Los valores obtenidos de nitrógeno total demuestran variaciones de valores que oscilan de cantidad bajas 4.2 mg/l a valores altos de 212.8 mg/l. Este último valor corresponde al punto de descarga de invernadero del muestreo 2 presentando un valor que sobrepasa los límites máximos permisibles. Un mecanismo de eliminación de nitrógeno dentro del sistema de humedales artificiales es esencialmente un proceso microbiano, que consiste en una nitrificación seguida de una desnitrificación (Shukla et al., 2021).

3.1.4. Coliformes Fecales

Los niveles de coliformes fecales en los tres puntos de muestreo, sobre todo en las primeras etapas de muestreos, sobrepasan los límites máximos permisibles. Se deduce que la presencia de coliformes fecales se ve afectado por la presencia de la actividad ganadera aguas arriba del punto de captación, ya que estos animales en ciertos tramos de la acequia tienen fácil acceso al interior de la misma para beber agua y lo que les permite dejar residuos de heces o urea, influyendo a la alta presencia de coliformes.

La remoción de coliformes fecales a través de humedales artificiales incluye la sedimentación, la extinción natural, la temperatura, la oxidación, la química desfavorable del agua, la exposición de radiación (Thalla et al., 2019).

3.2. Metales Pesados

Tabla 3

Resultados de metales pesados en muestras de agua

	Cobre (Cu) mg/l	Plomo (Pb) mg/l	Manganeso (Mn) mg/l	Zinc (Zn) mg/L	Hierro (Fe) mg/L
LMP Tabla 3	0.2	5	0.2	2	5
LMP Tabla 9	1	0.2	2	NA	10
Limites de Cuatificación	0.05	0.05	0.11	0.015	0.19
Captación					
Muestreo 1	<LC	0.942	<LC	<LC	0.458
Muestreo 2	<LC	0.176	<LC	<LC	0.522
Muestreo 3	<LC	<LC	<LC	<LC	0.193
Muestreo 4	<LC	<LC	<LC	<LC	0.569
Descarga de invernadero					
Muestreo 1	<LC	1.069	0.249	<LC	2.145
Muestreo 2	<LC	0.177	0.242	<LC	3.142
Muestreo 3	0.073	<LC	0.25	0.054	2.289
Muestreo 4	0.059	<LC	0.167	0.042	2.568
Descarga Doméstica					
Muestreo 1	<LC	1.12	0.103	0.062	0.844
Muestreo 2	0.07	0.241	<LC	0.082	2.721
Muestreo 3	<LC	<LC	0.301	0.038	0.508
Muestreo 4	0.053	<LC	0.258	0.04	2.866

Nota. Los datos se presentan de tal manera que los muestreos 1 y 2 representan valores de muestreo realizados en verano y los dos muestreos 3 y 4 en invierno. Las concentraciones marcadas en rojo indican los valores que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles (LMP) ya sea para la Tabla 3 o 9 del Acuerdo Ministerial 097-A. NA = no aplica, puesto que no se encuentra el parámetro normado. LC = Límite de cuantificación.

En las muestras se analizó la presencia de cinco metales pesados, de los cuales la mayoría de estos se encontraban dentro de rango permisibles de la normativa vigente, el Acuerdo Ministerial 097-A de las Tablas 3 y 9. Cabe destacar que dentro de esta práctica se realizaron duplicados para cada metal, con la finalidad de amparar la fiabilidad y precisión de los resultados.

Respecto al contenido de cobre (Cu), en la tabla 3 se pudo observar que todas las muestras se encuentran dentro del rango permitido del Acuerdo Ministerial 097-A, si bien cada una de estas lecturas presenta valores muy bajos, se consta la presencia del metal.

Los resultados de la concentración de plomo (Pb), indican que no sobrepasan los límites permisibles en los tres puntos de medición de agua. Dando a entender que la actividad de metales es mínima y la suministración de nutrientes al sistema hidropónico no atribuye al aumento de concentración de plomo en agua.

Respecto a los resultados de la concentración del manganeso (Mn) se encuentran sobre el límite máximo permisible, para las ubicaciones de muestreo en las dos descargas. La presencia de este metal en el agua, sugiere que los niveles del metal están vinculados en pequeñas proporciones con el suministro de nutrientes al invernadero.

Para Phuong et al., (2022) la eliminación del manganeso de las aguas residuales mediante humedales artificiales plantados con *Caladium bicoloras*, presenta una eficiencia del tratamiento de Mn con concentraciones de 0.5 mg/L, alcanzando aproximadamente el 99 % después de 144 horas y las concentraciones de Mn cumplieron con la regulación nacional.

La concentración zinc (Zn) obtenida en las mediciones de agua presentaron valores por debajo de los límites permisibles del acuerdo a la norma vigente establecida por el Acuerdo Ministerial 097-A. Dado que en los tres puntos de muestreo están por debajo de los límites la presencia del metal se encuentra en mínimos niveles.

El hierro (Fe) al igual que los otros metales en su mayoría, se evidenciaron valores por debajo de los límites permisibles. Sin embargo, es relevante considerar que el hierro es uno de los metales que se encuentra naturalmente en cuerpos de agua; no obstante, la detección de este se atribuye principalmente a actividades ganaderas y agrícolas mediante la aplicación de productos químicos.

Los metales pesados representan una de las principales fuentes de contaminación en agua, siendo el principal problema del riego de cultivos llegando a depositar en el suelo y eventualmente terminar en las plantas cultivadas. Hoy en día, la eliminación de metales

pesados mediante humedales artificiales muestra resultados prometedores y una alta eficiencia (Hassan et al., 2021).

Según Fu et al., (2022) por medio de estudios evaluados presento que los humedales artificiales de flujo subterráneo vertical son beneficiosos para tratar múltiples iones de metales pesados en aguas residuales. En el mismo contexto se presentó resultados mostrando que las tasas de eliminación de Fe, Cu, Mn, Zn, Ni y Cd en las CW fueron del 74%, 80%, 60%, 70%, 71% y 70%, respectivamente.

3.5. Medición de caudal

Para conocer el volumen de agua que descarga el sistema hidropónico, se aplicó el método volumétrico proveniente del método de aforo, esta técnica se la utilizo debido a las características de la descarga, ya que presenta una corriente pequeña. El método consistió en recolectar un volumen conocido de agua de descarga y registrar el tiempo total que se llena el depósito. Para identificar la variación del caudal, este procedimiento se repitió en varias ocasiones y se tomó el promedio del tiempo obtenido. En la siguiente tabla se observa los resultados de medición de caudal.

Tabla 4

Registro de mediciones para determinación del caudal

Descarga Invernadero					
Primer Periodo		Segundo Periodo		Tercer Periodo	
Hora	Tiempo (min)	Hora	Tiempo (min)	Hora	Tiempo (min)
7:00 AM	0:40	11:00 AM	1:13	15: 00 PM	1:04
7:30 AM	0:53	11:30 AM	1:40	15:30 PM	1:24
8:00 AM	1:20	12:00 PM	2:13	16:00 PM	2:20
8:30 AM	1:40	12:30 PM	2:38	16:30 PM	2:40
9:00 AM	2	13:00 PM	2:40	17:00 PM	2:45
9:30 AM	2:20	13:30 PM	2:52	17:30 PM	3:12
10:00 AM	2:30	14:00 PM	3:00	18:00 PM	3:20
10:30 AM	2:36	14:30 PM	3:16	18:30 PM	3:40
Descarga doméstica					
Primer Periodo		Segundo Periodo		Tercer Periodo	
7:00 AM	2:30	11:00 AM	1:03	15: 00 PM	3:10

7:30 AM	2:33	11:30 AM	1:14	15:30 PM	3:25
8:00 AM	2:40	12:00 PM	1:33	16:00 PM	3:30
8:30 AM	2:55	12:30 PM	2:08	16:30 PM	3:23
9:00 AM	3:00	13:00 PM	2:13	17:00 PM	3:40
9:30 AM	3:10	13:30 PM	2:42	17:30 PM	3:41
10:00 AM	3:30	14:00 PM	3:03	18:00 PM	3:46
10:30 AM	3:38	14:30 PM	3:10	18:30 PM	3:50

Nota El tiempo denota el lapso que tomó llenar un embace de dos litros.

Los datos expuestos de la tabla 4 indican el tiempo de duración que la descarga del invernadero y doméstica se demoran en completar un recipiente de 2 litros de capacidad. Se tomó como referencia los tres periodos cuando se suministra agua al sistema hidropónico (07:00 am, 11:00 am y 15:00 pm). Para mantener el mismo patrón se consideró los mismos lapsos de tiempo para determinar el caudal de descarga doméstica.

Tabla 5

Resultados de caudales promedio en diferentes periodos del día

Descarga de invernadero								
Primer periodo			Segundo periodo			Tercer periodo		
Intervalos	Caudal	Promedio	Intervalos	Caudal	Promedio	Intervalos	Caudal	Promedio
7:00 AM	3.00		11:00 AM	1.64		15:00 PM	1.88	
7:30 AM	2.26		11:30 AM	1.20		15:30 PM	1.43	
8:00 AM	1.50		12:00 PM	0.90		16:00 PM	0.86	
8:30 AM	1.20	1.42	12:30 PM	0.76	0.90	16:30 PM	0.75	0.93
9:00 AM	1.00		13:00 PM	0.75		17:00 PM	0.73	
9:30 AM	0.86		13:30 PM	0.70		17:30 PM	0.63	
10:00 AM	0.80		14:00 PM	0.67		18:00 PM	0.60	
10:30 AM	0.77		14:30 PM	0.61		18:30 PM	0.55	
Descarga Doméstica								
Primer periodo			Segundo periodo			Tercer periodo		
Intervalos	Caudal	Promedio	Intervalos	Caudal	Promedio	intervalos	Caudal	Promedio
7:00 AM	0.80		11:00 AM	1.90		15:00 PM	0.63	
7:30 AM	0.78		11:30 AM	1.62		15:30 PM	0.59	
8:00 AM	0.75	0.68	12:00 PM	1.29	1.09	16:00 PM	0.57	0.57
8:30 AM	0.69		12:30 PM	0.94		16:30 PM	0.59	
9:00 AM	0.67		13:00 PM	0.90		17:00 PM	0.55	
9:30 AM	0.63		13:30 PM	0.74		17:30 PM	0.54	

10:00 AM	0.57	14:00 PM	0.66	18:00 PM	0.53
10:30 AM	0.55	14:30 PM	0.63	18:30 PM	0.52

En la tabla 5 se muestra los valores de caudales tanto de la descarga del invernadero como doméstica, en promedio y por periodo. Se utiliza la ecuación 7 para el cálculo del caudal.

Ec 7. Determinación del caudal

$$Q = \frac{V}{t}$$

Q = es el caudal expresado en L/min

V = volumen dado en litros

t = Tiempo en minutos

Tabla 6

Caudales de descarga del invernadero y agua residual doméstica

Promedio de medición de caudal (L/min)	Caudal de entrada al humedal
Descarga del invernadero	1.86 L/min
1.08	
Descarga doméstica	0.78

Nota. Promedio total de los puntos de descarga.

En la tabla 6 se observa el resultado final de los caudales tanto de la descarga del invernadero como doméstica que, cuya suma se convierte en el caudal de entrada al humedal. El resultado obtenido presenta unidades de L/min sin embargo, para aplicarlo en la formula en la determinación del área, se realiza un cambio de unidades a m³/año.

En este caso, la transformación de unidades se la realiza por separado para cada descarga. Para la descarga del invernadero se consideran que el día tiene doce horas, ya que se toma en cuenta el tiempo de periodo total donde se presenta descargas de agua residual. Por otro lado, en la descarga doméstica se considera que el año tiene 156.5 días, debido a que son los días que la dueña del domicilio realiza descargas de agua en todo un año.

3.6. Diseño de humedal artificial para emplearlo en la zona de estudio

Para investigar acerca del diseño del humedal artificial, se tienen en cuenta una serie de elementos fundamentales para asegurar el óptimo modelo de tratamiento, orientado a

eliminar los contaminantes o los parámetros que sobrepasan los límites en la normativa ambiental previamente mencionada en la tabla 2.

En primer lugar, se empleó la fórmula de enfoque P-k-C* para determinar el área del humedal artificial que se pretende implementar. Para los cálculos se considera el valor teórico DBO₅ bajo la asunción que este representa el 50% del valor promedio de DQO registrados. A continuación, se presentan los valores utilizados en la ecuación 5 para el cálculo del área del humedal.

Tabla 7

Parámetros considerados y valores utilizados para el cálculo del área del humedal

Parámetro	Valor	Unidades	Criterio
P	2		Ejemplos de valores de <i>P</i> para los humedales de FH, FV y FS (Dotro et al., 2021, como se citó en Kadlec y Wallace, 2009, p. 34)
Qi	459.60	m ³ /año	Caudal que entraría al humedal considerando los promedios de las descargas tanto del invernadero hidropónico como doméstica.
K _A	25	m/año	Coeficientes de reacción superficial (percentil 50) para humedales HF y FWS (Kadlec y Wallace, 2009) citado por Dotro pp 31
Co	10	mg/L	Concentración final esperada fijada respecto al límite máximo permisible en (Ritter, 2021).
Ci	37.8	mg/L	Valor teórico de DBO ₅ bajo la asunción que este representa el 50% del valor promedio de DQO registrados.
C*	5	mg/L	Según (Dotro et al., 2021) menciona ejemplos de concentraciones de fondo (C*) en mg/L para los humedales de FH, FV y FS.

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{2 * 459.60}{25} \left(\left(\frac{37.8 - 5}{10 - 5} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right) = 53.92 \text{ m}^2$$

Una relación longitud-ancho entre 2:1 y 4:1 es común para humedales de FH. Seleccionando una relación longitud-ancho de 3, se genera el siguiente cálculo:

Conociendo: $A = l \times w$

$$\frac{l}{w} = 3$$

$$w = \sqrt{\frac{A}{3}} = \sqrt{\frac{53.92}{3}} = 4.24 \text{ m}$$

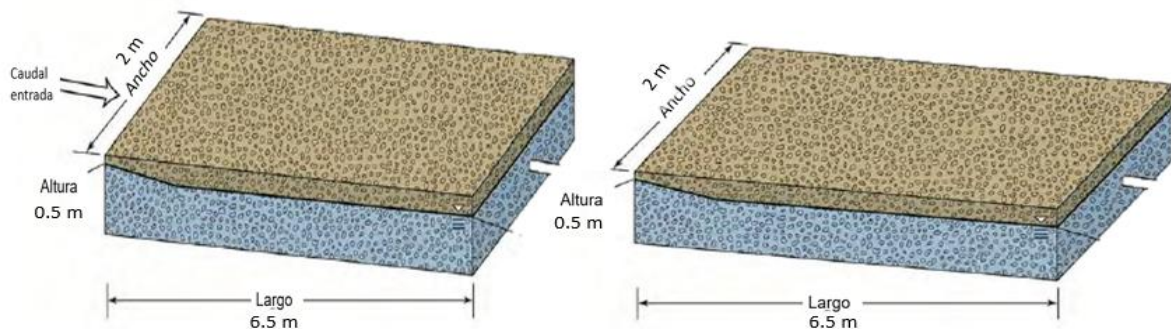
Estas medidas, aunque precisas, no resultan prácticas para aplicar en el terreno. Es más conveniente optar por dimensiones que sean sencillas de implementar durante la construcción. Se recomienda seleccionar un humedal con una anchura de 4 metros y una longitud de 13 metros (con un área total de 53.92 m²), lo que resulta en una relación longitud-anchura de 2.12. La profundidad típica de saturación para un humedal de flujo horizontal es de 0.5 metros.

Para determinar el tiempo de retención el humedal se considera la ecuación 6.

$$\tau = \frac{\varepsilon h A}{Q_i} = \frac{0.5 * 0.5 \text{ m} * 53.92 \text{ m}^2}{2.67 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 5.04 \text{ días}$$

Figure 5

Modelo del Humedal Artificial de Flujo Horizontal



Nota. Área total de los dos humedales de flujo horizontal, considerando su altura de 0.5 metros, el ancho de 2 metros y el largo de 6.5 metros para cada humedal.

Conclusiones

Mediante el análisis de parámetros previamente mencionados, se determinaron los elementos fundamentales para el tipo y diseño humedal artificial. En este caso de estudio, se consideraron parámetros in situ como los fisicoquímicos (pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura) y mediciones de caudal. Así mismo se consideraron parámetros ex situ que influyen a la calidad del agua que se pretende tratar, identificando parámetros que exceden los límites permitidos (color, sólidos totales, sólidos suspendidos, nitrógeno total y coliformes fecales) para las Tabla 3 y Tabla 9 del acuerdo ministerial 097-A.

Además, con la ayuda fuentes de información se consideró el diseño y valores utilizados para el cálculo del área del humedal por medio de datos y formulas bibliográficas tomadas de (Dotro et al., 2021). Por ende, se aplicó el modelo P-k-C*, para determinar el área del humedal artificial, alto, ancho, altura y retención hidráulica para determinar datos específicos en las dimensiones del humedal.

El diseño del humedal más apropiado para la zona de estudio, considerando sus parámetros fundamentales de diseño y los contaminantes que se pretenden contrarrestar son los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial compuestos por dos compartimentos o tanques, dado que es una opción óptima para utilizarse en el tratamiento de aguas residuales en comunidades pequeñas, incluyendo en un invernadero agrícola. Asimismo, su potencial de sistema de tratamiento sirve para la reutilización del agua residual como riego agrícola, garantizando una economía sustentable, ofreciendo un suministro más sostenible y constante en comparación con los recursos naturales.

El área total del humedal requiere 53.92 m² de área para que el sistema logre tratar los dos tipos de agua residual de manera que se cumpla con los requisitos de agua de riego de acuerdo con la Tabla 3 del Acuerdo Ministerial 097.

En conclusión, mejorar la calidad de agua por medio del tratamiento de agua residual que genera el invernadero y el área domiciliaria se puede lograr a través de este tipo de

iniciativas. Este tipo de alternativas no se restringen exclusivamente a la zona de estudio, pues se podría plantear dentro de la comunidad agrícola en general que experimentan en casos particulares que presentan dificultades en el tratamiento de agua residual debido a la relación costo–beneficio, además, como beneficio del proyecto fomenta el turismo comunitario de manera que se evidencie la práctica de la economía circular y sostenibilidad.

Recomendaciones

Se recomienda que al momento de la toma de muestras de agua se debe considerar todas las normas específicas para la recolección de las mismas, manteniendo un registro para la medición, registro fotográfico de la zona de estudio. Además, el trabajo de muestreo y análisis de muestras se tiene que llevar a cabo con laboratorio acreditado procurando que no presente alteraciones en las propiedades de la sustancia a analizar.

En caso de no llegar a la disminución requerida de concentraciones en sólidos totales, color, Coliformes o metales, es recomendable dar un seguimiento al tratamiento natural con respecto a la calidad de agua a tratar, verificar si existe un aumento de suministros de fertilizante o nutrientes en el sistema hidropónico, así como los cambios de volumen del caudal, los cuales sirvan como datos específicos a mejoras de diseño del humedal implementado.

Además, se busca promover una concientización ambiental donde se transmita los resultados positivos a la comunidad para incentivar la implementación de estos sistemas de tratamiento, de tal manera que proporcione información esencial para futuras consideraciones de implementación.

Se sugiere que el diseño de humedal artificial incorpore un control continuo, donde se den seguimiento frecuente del sistema (1 vez a la semana) hasta estabilización (4 a 6 meses) del mismo. Posterior controlar las descargas (1 vez al mes), con el propósito de facilitar ajustes al diseño del humedal con respecto a las variaciones en la carga contaminantes o a posibles expansiones agrícolas. Adicionalmente, a través del estudio realizado, se busca generar conciencia en el público para promover la educación acerca de las ventajas ambientales y económicas de la reutilización del agua residual en la agricultura.

Referencias

- Ayuque, S., & Poma, K. (2022, abril 21). Tratamiento de aguas residuales mediante el método hidropónico de *Mhenta piperita* y *Chamaemelum nobile* en el Puesto de Salud de Chacarilla, Yauli – Huancavelica.
<https://repositorio.unh.edu.pe/items/fa0caec1-98e2-4e68-b5a2-dd3fe639bc91>
- Chacón Chaquea, M. Y. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. En *Instname:Universidad Santo Tomás. Universidad Santo Tomás*.
<https://doi.org/10.15332/li.lib.2017.00030>
- Chirinos Málaga, C. E. (2022). Índice de calidad de agua y contenido de metales pesados en el río San Juan, Cerro de Pasco.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5236>
- Cross, K., Tondera, K., Rizzo, A., Andrews, L., Pucher, B., Istenič, D., Karres, N., & McDonald, R. (2023). Soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de aguas residuales. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789063035>
- Deknock, A., De Troyer, N., Houbraken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Van Echelpoel, W., Forio, M. A. E., Spanoghe, P., & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador). *Science of The Total Environment*, 646, 996-1008.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2014). Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales.
<https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>
- Delrue, F., Ribeiro de Jesus Cerqueira, M., Compadre, A., Alvarez, P., Fleury, G., Escoffier, C., & Sassi, J.-F. (2021). Hydroponic Farm Wastewater Treatment Using an Indigenous Consortium. *Processes*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/pr9030519>

- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., Sperling, M., Vera-Puerto, I., & Arias, C. (2021). Humedales para Tratamiento. <https://doi.org/10.2166/9781789062526>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780408774>
- Durán-Sánchez, A., Álvarez-García, J., González-Vázquez, E., & Del Río-Rama, M. de la C. (2020). Wastewater Management: Bibliometric Analysis of Scientific Literature. *Water*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/w12112963>
- FAO. (2017). Water pollution from agriculture: A global review—Executive summary.
- Frías, T., & Montilla, L. (2016). EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS EN EL SECTOR PUERTO DE PRODUCTORES RÍO ITAYA, LORETO – PERÚ 2014 -2015.
- Fu, G., Zhou, S., Zhao, Y., Li, Z., Xu, Y., & Guo, Z. (2022). Removal Efficiency of Heavy Metals Such as Lead and Cadmium by Different Substrates in Constructed Wetlands. *Processes*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/pr10122502>
- Gonzalez-Diaz, A., Rodríguez V., N., García-Núñez, J. A., Ruiz Á., E., Acero H., J. H., & Reyes A., W. A. (2022). Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento terciario de efluentes de planta de beneficio de palma de aceite. <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141561>
- Hadidi, L. A. (2021a). CONSTRUCTED WETLANDS A COMPREHENSIVE REVIEW. *International Journal of Research -GRANTHAALAYAH*, 9(8), Article 8. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v9.i8.2021.4176>
- Hadidi, L. A. (2021b). CONSTRUCTED WETLANDS A COMPREHENSIVE REVIEW. *International Journal of Research -GRANTHAALAYAH*, 9(8), Article 8. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v9.i8.2021.4176>

- Hassan, I., Chowdhury, S. R., Prihartato, P. K., & Razzak, S. A. (2021). Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. *Processes*, 9(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/pr9111917>
- Hdidou, M., Necibi, M. C., Labille, J., El Hajjaji, S., Dhiba, D., Chehbouni, A., & Roche, N. (2022). Potential Use of Constructed Wetland Systems for Rural Sanitation and Wastewater Reuse in Agriculture in the Moroccan Context. *Energies*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/en15010156>
- Hoffmann, H., Platzer, C., von Münch, E., & Winker, M. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises (in Spanish)—Resources • SuSanA. <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1235#>
- Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131564>
- Jimenez Monroy, L. L., Jahaira Huarcaya, F. A., & Ibañez Quispe, V. (2016). Tratamiento de aguas eutrofizadas de la bahía interior de Puno, Perú, con el uso de dos Macrófitas. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 18(4), 403-410. <https://doi.org/10.18271/ria.2016.232>
- Kleinberg, D. (2021). A biological assessment of water quality in El Placer, Ecuador: The effect of agriculture on stream health and the quality of historical versus current drinking water sources.
- López, P., & Andrés, L. (2018). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/47123>
- Lovera Muñoz, S. R. (2019). Estudio de la concentración y absorción de macroelementos y metales pesados en el cultivo de algodón irrigado con aguas servidas en el sector de

San Pedro Cachiche—Ica. Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.

<https://repositorio.unica.edu.pe/handle/20.500.13028/3140>

Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O., Guevara-Gutiérrez, R. D., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Canculim, Á., Sánchez-Bernal, E. I., Avelar-Roblero, J. U., Cruz-Crespo, E., Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O., Guevara-Gutiérrez, R. D., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Canculim, Á., ... Cruz-Crespo, E. (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1603>

Méndez, J. P., Ramírez, C. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Contaminaci%C3%B3n-y-fitotoxicidad-en-plantas-por-de-y-M%C3%A9ndez-Ram%C3%ADrez/fa4333d180ca85d0d335e6d91a363dc18598a8b9>

Ministerio del Ambiente. (2015, noviembre 4). Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, REFORMA LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE | Ecuador—Guía Oficial de Trámites y Servicios. <https://www.gob.ec/regulaciones/acuerdo-ministerial-097-anexos-normativa-reforma-libro-vi-texto-unificado-legislacion-secundaria-ministerio-ambiente>

Mo, J., Yang, Q., Zhang, N., Zhang, W., Zheng, Y., & Zhang, Z. (2018). A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 227, 395-405.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.069>

- Morales, D., Jiménez, L., Burneo, J., & Capa, E. (2020). Producción de forrajes de avena y trigo bajo sistemas hidropónico y convencional.
<https://revistacta.agrosavia.co/html/1386/>
- Mustafa, H. M., Hayder, G., Solihin, M. I., & Saeed, R. A. (2021). Applications of constructed wetlands and hydroponic systems in phytoremediation of wastewater. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 708(1), 012087.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012087>
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Ochoa, B. (2018, agosto 25). Reportaje.- Ñamarín un atractivo turístico. Belén Ochoa.
<https://belenochoa.wordpress.com/2018/08/24/reportaje-namarin-un-atractivo-turistico/>
- Ojeda, J. W. C. (2022). METALES PESADOS Y APTITUD AGROPECUARIA DEL AGUA EN UNA IRRIGACIÓN. *Revista de Investigaciones*, 11(1), Article 1.
<https://doi.org/10.26788/riepg.v11i1.2831>
- Phuong, N. M., Hai, D. T., Thanh, N. V., & Anh, B. T. K. (2022). Iron and Manganese Removal from Wastewater by Constructed Wetlands Planted with *Caladium bicolor*. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 38(2), Article 2.
<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4861>
- Quispe Pérez, M. L., Piñas Rivera, L. C., & Valle González, J. R. del. (2020). Aplicaciones tecnológicas de tratamiento de aguas residuales.
<https://elibro.net/es/ereader/bibliotecaupl/188961>
- Raymundo Montes, J. R. (2017). Modelo de tratamiento de aguas residuales mediante humedal artificial de flujo superficial en el centro poblado La Punta – Sapallanga.

- Retta, B., Coppola, E., Ciniglia, C., & Grilli, E. (2023). Constructed Wetlands for the Wastewater Treatment: A Review of Italian Case Studies. *Applied Sciences*, 13(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/app13106211>
- Richa, A., Touil, S., Fizir, M., & Martinez, V. (2020). Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: A review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09555-9>
- Rodriguez Huamani, N. (2022). Influencia del vertimiento de las aguas residuales domesticas en la calidad del agua del Rio Chuyapi—Distrito Santa Ana, 2021. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/88818>
- Rodríguez, J. M. O., Sánchez, L. O. S., & Bernal, L. E. P. (2016). Sistemas hidropónicos abierto y cerrado en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1995>
- Shukla, R., Gupta, D., Singh, G., & Mishra, V. K. (2021). Performance of horizontal flow constructed wetland for secondary treatment of domestic wastewater in a remote tribal area of Central India. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00087-7>
- Singh, S., Soti, A., Kulshreshtha, N. M., Brighu, U., & Gupta, A. B. (2022). Customized design of horizontal flow constructed wetlands employing secondary datasets. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101037>
- Tak, H., Bakhtiyar, Y., Ahmad, F., & Inam, A. (2012). Effluent Quality Parameters for Safe use in Agriculture. <https://doi.org/10.5772/31557>
- Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, REFORMA LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE | Ecuador—Guía Oficial de Trámites y Servicios.

<https://www.gob.ec/regulaciones/acuerdo-ministerial-097-anexos-normativa-reforma-libro-vi-texto-unificado-legislacion-secundaria-ministerio-ambiente>

Thalla, A. K., Devatha, C. P., Anagh, K., & Sony, E. (2019). Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. *Applied Water Science*, 9(6), 147.

<https://doi.org/10.1007/s13201-019-1014-9>

Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Biblioteca Centro Humedales Río Cruces: Humedales construidos: Diseño y operación.*

<http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1779>

Villegas, J. (2021). *Automatización de procesos para la producción de fresa Por métodos hidropónicos-nft* [Thesis, QUITO/UIDE/2021].

<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4681>

Wear, S. L., Acuña, V., McDonald, R., & Font, C. (2021). Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration. *Biological Conservation*, 255, 109010. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109010>

Apéndice

Apéndice A. Encuesta llevada a cabo al responsable del cuidado del invernadero hidropónico y otras partes no iniciamos.

Cuestionario

- 1. ¿Posee agua potable?**
- 2. ¿Posee alcantarillado?**
- 3. ¿En caso de poseer fosa septica, cada cuánto tiempo se realiza una limpieza de esta y cómo se gestiona los residuos?**
- 4. ¿Con qué frecuencia se encuentra presente en su hogar?**
- 5. ¿Con que frecuencia utiliza el agua para sus servicios básicos?**
- 6. ¿Conoce la cantidad de agua utilizada por mes en su hogar?**
- 7. ¿Qué tipo de residuos descarga junto con el agua, como por ejemplo aceites, detergentes, residuos sanitarios, fertilizantes?**

8. **¿En qué horario y lapso de tiempo usted realiza actividades que consideren de uso del agua?**

Encuesta sobre el sistema hidropónico

1. **¿Se lleva a cabo algún tipo de actividad agrícola o ganadera en la captación de agua?**
2. **¿Qué tipo de fruta o verdura tiene plantada o planea sembrar en los próximos dos años?**
3. **¿Qué tipo de sistema hidropónico se utiliza actualmente?**
4. **¿Cuánta agua consume el sistema hidropónico en un período típico del día?**
5. **¿Qué tipo de fertilizantes o soluciones nutritivas utiliza en su sistema hidropónico?**
6. **¿Durante qué tiempo se realiza el riego de agua en el invernadero?**
7. **¿Cuál es el caudal riego fijado para el sistema hidropónico?**

Si llega a utilizar nutrientes
8. **¿Con qué frecuencia ajusta la concentración de los nutrientes en su sistema?**
9. **¿Piensa aplicar nuevas formulaciones de nutrientes o tecnologías emergentes en su sistema?**
10. **¿Presenta algún problema con el agua residual generada del sistema hidropónico y su hogar?**
11. **¿Recibe usted aguas residuales de residentes cercanos a su hogar?**
12. **¿Están dispuesto a tratar los dos tipos de agua residual producidas por el invernadero y su hogar?**

13. **¿Qué incentivo considera usted atractivo recibir para considerar el tratamiento de las Aguas residuales? le**

14. **¿Qué área de su terreno está disponible para la implementación de un sistema de tratamiento de agua, como humedales construidos? (aquí se debe explicar en qué consisten)**