



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DEPURACION DE AGUAS GRISES DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MEDIANTE EL USO DE
PLANTAS FILTRANTES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero/a Industrial

Autores: Marko Antonio Núñez Zambrano

Lisette Emperatriz Tenezaca Cárdenas

Tutor: Ing. Iván Eduardo Suárez Escobar. PhD

Guayaquil- Ecuador

2025

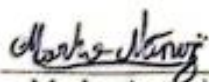
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Marko Antonio Núñez Zambrano con documento de identificación N° 0951297738 y Lissette Emperatriz Tenezaca Cárdenas con documento de identificación N° 0926697863; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 5 de agosto del año 2025

Atentamente,



Marko Antonio Núñez Zambrano

0951297738



Lissette Emperatriz Tenezaca Cárdenas

0926697863

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Marko Antonio Núñez Zambrano con documento de identificación No. 0951297738 y Lissette Emperatriz Tenezaca Cárdenas con documento de identificación No. 0926697863, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "DEPURACION DE AGUAS GRISES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MEDIANTE EL USO DE PLANTAS FILTRANTES", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniería Industrial, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

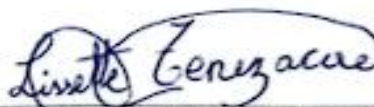
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 5 de agosto del año 2025

Atentamente,



Marko Antonio Núñez Zambrano
0951297738



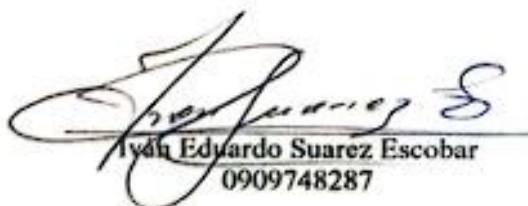
Lissette Emperatriz Tenezaca Cárdenas
0926697863

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Iván Eduardo Suarez Escobar, con documento de identificación N° 0909748287, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DEPURACION DE AGUAS GRISES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MEDIANTE EL USO DE PLANTAS FILTRANTES**, realizado por Marko Antonio Núñez Zambrano con documento de identificación N° 0951297738 y por Lissette Emperatriz Tenezaca Cárdenas con documento de identificación N° 0926697863, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 5 de agosto del año 2025

Atentamente,



Iván Eduardo Suarez Escobar
0909748287

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme la sabiduría estar siempre a mi lado, a mis padres, quienes han sido mi pilar fundamental desde el primer momento. Gracias por su amor incondicional, por su esfuerzo silencioso y por cada palabra de aliento que me impulsó a seguir adelante cuando sentía que las fuerzas me faltaban. A ustedes les debo no solo la oportunidad de estudiar, sino también los valores que me han guiado: la constancia, la humildad y la fe en que todo se puede lograr con esfuerzo. Este logro también es suyo, porque sin su ejemplo y su compañía, este camino no habría tenido el mismo sentido.

Lisette Emperatriz Tenezaca Cárdenas

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres que han sido mi apoyo desde el comienzo de mi vida hasta estos momentos, quienes, con su amor incondicional, su ejemplo y su fe en mí, han sido mi faro en los momentos de duda y mi impulso en los de avance. Gracias por enseñarme a luchar con humildad y a soñar sin límites. A mi abuelita por ayudarme en muchas cosas y enseñarme a esforzarme a pesar de todo. A ustedes les debo no solo la oportunidad de estudiar, sino también los valores que me han guiado: la constancia, la humildad y la fe en que todo se puede lograr con esfuerzo. Este logro también es suyo, porque sin su ejemplo y su compañía, este camino no habría tenido el mismo sentido.

Marko Antonio Núñez Zambrano

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme lograr mis metas, a mi familia, por ser siempre mi hogar, incluso en la distancia o en los días más grises. A mis padres, por enseñarme con el ejemplo que los sueños no se cumplen solos, sino con trabajo, disciplina y pasión. A mis amigos, por escucharme, por celebrar mis logros como si fueran propios y por recordarme quién soy cuando me sentía perdido/a. A todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este camino: gracias por estar, por creer en mí y por recordarme que nunca se avanza solo.

Este logro también les pertenece.

Lisette Emperatriz Tenezaca Cárdenas

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo infinito por que cumpla mis metas, por estar ahí en todo momento ya sea en los buenos y en los malos, quienes, con su amor incondicional, su ejemplo y su fe en mí, han sido mi faro en los momentos de duda y mi impulso en los de avance. Gracias por enseñarme a luchar con humildad y a soñar sin límites. A mi familia por estar ahí presente en muchos momentos importantes. A Dios por protegerme y hacer que llegue hasta este momento. A mis amistades y personas con las cuales pude enriquecer mis estadías en este trayecto y vivir momentos nuevos y a mis docentes por su dedicación en la enseñanza y paciencia durante este proceso de aprendizaje.

Marko Antonio Núñez Zambrano

RESUMEN

Este trabajo plantea analizar la eficiencia de un sistema de depuración de aguas grises utilizando vegetación hidrofita con capacidad filtrante, como el papiro, el lechuguín o Jacinto de agua, y la lenteja de agua, dentro de un entorno controlado. La metodología se fundamenta en el uso de un modelo de humedal artificial por fases, orientado a disminuir la presencia de contaminantes químicos, físicos y biológicos. El propósito es ofrecer una opción sostenible para el aprovechamiento del agua tratada, fomentando su uso en actividades no destinadas al consumo humano, como la agricultura urbana, frente al creciente volumen de aguas grises generado por el acelerado desarrollo urbano en Guayaquil.

Palabras clave: aguas grises, vegetación hidrofita, humedales artificiales, fitorremediación, sostenibilidad, depuración natural de aguas.

ABSTRACT

This study aims to analyze the efficiency of a gray water treatment system using hydrophytic vegetation with filtering capacity, such as papyrus, water hyacinth, and duckweed, within a controlled environment. The methodology is based on the use of a phased artificial wetland model, designed to reduce the presence of chemical, physical, and biological contaminants. The purpose is to offer a sustainable option for the use of treated water, promoting its use in activities not intended for human consumption, such as urban agriculture, in the face of the growing volume of gray water generated by rapid urban development in Guayaquil.

Keywords: gray water, hydrophytic vegetation, constructed wetlands, phytoremediation, sustainability, natural water treatment.

GLOSARIO

Recursos hídricos: Se entiende por recursos hídricos a las fuentes de agua disponibles para ser aprovechadas por los seres humanos con el fin de cubrir distintas necesidades. (Sposob, 2025)

Papiro: El papiro (*Cyperus papyrus*) es una planta acuática perteneciente al género *Cyperus*, dentro de la familia de las ciperáceas, y crece en zonas húmedas o pantanosas.

Saneamiento de agua: El saneamiento del agua es el conjunto de procesos destinados a transformar aguas residuales en agua limpia, eliminando los contaminantes desde el momento en que estas aguas son generadas.

Planta macrófita: Las plantas macrófitas, también llamadas macrofitos, son especies vegetales capaces de desarrollarse en suelos constantemente inundados o sometidos a largos periodos de encharcamiento. (Floresyplantas, 2017)

Aguas grises: Las aguas grises son un tipo de residuo líquido doméstico que proviene de actividades como el uso de lavabos, duchas o bañeras. Se caracterizan por no contener desechos fecales. (Todoagua.es, 2022)

Índice

Contenido

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
GLOSARIO	xi
Índice	xii
INDICE DE IMÁGENES	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	4
PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Descripción del problema	7
1.3. Justificación del problema	9
1.4. Grupo Objetivo	10
1.5. Delimitaciones	10
1.5.1. Delimitación espacial	10
1.5.2. Delimitación temporal	11
1.5.3. Delimitación temática	11
1.6. Objetivos	12

1.6.1. Objetivo General.....	12
1.6.2. Objetivos Específicos	12
CAPITULO II.....	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1. Aguas Residuales y su Clasificación.....	13
2.2. Aguas grises: conceptos y características.....	14
2.3. Tipos de tratamientos de agua	15
2.3.1. Tratamiento físico	15
2.3.2. Tratamiento biológico.....	16
2.4. Tecnologías naturales de tratamiento: humedales y filtros verdes	17
2.5. Plantas macrófitas definición	20
2.6. Plantas filtrantes: funcionamiento y especies utilizadas.....	20
2.7. Mecanismos de depuración en sistemas filtrantes	23
2.7.1. Factores que influyen la eficiencia.....	26
CAPÍTULO III	27
MARCO METODOLÓGICO	27
3.1. Tipo de investigación	27
3.2. Diseño de la Investigación	28
3.3. Procedimiento experimental.....	31
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	32
3.4.1. Parámetros físicos, químicos y biológicos analizados	33
3.4.2. Instrumentos empleados	33
3.4.3. Técnica de muestreo y frecuencia.....	34
3.4.4. Validación de datos y control de calidad.....	34
3.5. Técnicas de análisis de datos	35
3.5.1. Procesamiento inicial de datos.....	35
3.5.2. Valores obtenidos de DBO:.....	36
3.5.3. Análisis descriptivo y comparativo.....	36

3.5.4.	Evaluación sensorial y cualitativa	36
3.5.5.	Análisis comparativo pre-post tratamiento	37
3.5.6.	Herramientas y Software	37
3.5.7.	Criterios de significancia	37
3.6.	Validez y contabilidad de los datos	38
3.6.1.	Confiabilidad	38
3.7.	Limitaciones del estudio	38
6.	Escala reducida del sistema	41
7.	Acceso restringido a tecnologías de monitoreo continuo	41
CAPÍTULO IV		43
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		43
4.1.	Descripción del problema piloto	43
4.2.	Valores técnicos de parámetros por tanque	43
4.2.1.	Observaciones técnicas cualitativas	44
4.3.	Análisis técnico de la DBO	44
4.4.	Evolución de los parámetros observables	45
4.5.	Influencia de las condiciones ambientales	45
4.6.	Validación del sistema en pequeña escala	45
4.7.	Consideraciones de sostenibilidad	46
CONCLUSIONES		48
RECOMENDACIONES		50
Bibliografía		52
ANEXOS		54

INDICE DE IMÁGENES

Fuente: 1 Autores: Núñez & Tenezaca, Lugar de las pruebas.....	11
Fuente: 2 TECPA (2021). Recuperado de https://www.tecpa.es/wp-content/uploads/2021/02/humedales-artificiales-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales.jpg	18
Fuente: 3 Cenicafé (s.f.). Recuperado de https://www.cenicafe.org/es/publications/Afiche_filtros_verdes.JPG	18
Fuente: 4 Jiang Rong, designer/www.gochengdu.cn, Chengdu Daily.....	19
Fuente: 5 Autores Núñez & Tenezaca Filtro artesanal entre Tanque 2 y 3. Se utilizó un envase plástico transparente relleno con capas	30
Fuente: 6 Autores: Núñez & Tenezaca imagen de planta de tratamiento	30
Fuente: 7 Autores: Núñez y Tenezaca.	32
Fuente: 8 Autores: Núñez y Tenezaca	36
Fuente: 10 Autores Núñez & Tenezaca.....	43
Fuente: 11 Autores Núñez & Tenezaca.....	44
Fuente: 12 Autores: Núñez & Tenezaca	44
Fuente: 13: Autores Núñez & Tenezaca	45

INTRODUCCIÓN

La crisis global de agua está entre los problemas ambientales más urgentes del siglo XXI. La escasez de agua potable en el globo es cada vez mayor, cosa que se ve reforzada por el crecimiento demográfico, la urbanización acelerada y desorganizada así como el cambio climático, ha orillado a tomar medidas urgentes en pro de una administración responsable y óptima del agua disponible. En el escenario actual, el saneamiento y transformación de aguas usadas se han convertido en estrategias clave para garantizar y prolongar la disponibilidad del recurso hídrico, así como de la protección de los ecosistemas acuáticos. (Nieto, 2011)

En el ámbito doméstico, las aguas residuales se diferencian comúnmente entre aguas negras y grises. Sus diferencias radican en la procedencia y sus cargas fisicoquímicas, Las aguas negras vienen de los retretes y llevan en sí grandes cargas de materia orgánica e inorgánica así como de organismos potencialmente peligrosos para el ser humano, mientras que las aguas grises llevan cargas contaminantes inorgánicas, materia orgánica en cantidades muy bajas y otras sustancias, son provenientes de las duchas, lavacaras, aguas de lluvia que, aunque sean contaminantes son relativamente más fáciles de tratar con el uso de filtros bioquímicos. Debido a su reducida carga contaminante poseen un gran potencial para ser procesadas y tratadas efectivamente, de esta manera se reduce la demanda de fuentes de agua potable mediante la implementación del agua curada a otras áreas (cultivos o procesos industriales entre otros) y también contribuyendo a los costos de tratamientos de aguas negras gracias a la separación de las aguas grises de las aguas negras se agiliza el proceso de tratamiento netamente de las aguas residuales.

Según la ONU (2021), más de 2mil millones de personas no poseen acceso a fuentes de agua potable segura, Se proyecta que cerca del 40 % de las personas en el mundo global enfrentará un grave estrés hídrico en pocos más de un par de décadas. Esta situación se ve exacerbada en un año de consumo. El consumo por persona más el aumento del número de individuos en el mundo junto con la disminución de las fuentes debido a fenómenos climáticos extremos.

La degradación de la condición del agua en sistemas fluviales, lacustres y subterráneos es una consecuencia del vertido indebido de aguas servidas sin tratamiento previo, estas aguas poseen cantidades considerables de minerales como el nitrógeno y el fósforo, lo que genera la eutrofización que afecta gravemente a la diversidad biológica y el estado del agua tanto superficial o subterránea, sumando la presencia de productos químicos y microorganismos patógenos aumenta el riesgo para la salud pública.

Las aguas grises constituyen entre la mitad y el 80 % del conjunto de aguas residuales generadas en el hogar. A diferencia de las aguas residuales negras, contienen una menor cantidad de materia orgánica y patógenos que facilitan su tratamiento. Sin embargo, contienen compuestos como grasas, productos de higiene personal y nutrientes que son los que deben ser tratados para evitar efectos negativos la composición de las aguas son:

- Sustancia biológica de sustancia orgánica (objetivos como CAB y DQ).
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Detergentes y tensioactivos.
- Microorganismos (aunque en cantidades más pequeñas).

Estas aguas, una vez depuradas, podrían emplearse en sectores como:

- Regar jardines y áreas verdes
- Usarse como agua de descarga del baño
- Limpieza vehicular
- Limpieza exterior
- Limpieza urbana

En el ámbito industrial se puede ahorrar el agua potable que entre a la empresa u organización usando el agua tratada en los ámbitos o procesos industriales, reservando únicamente agua segura (potable) destinada al consumo directo del personal empleado.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Guayaquil considerada la ciudad más poblada y el principal punto económico del Ecuador, ha experimentado un crecimiento urbano acelerado y su extensión demográfica que ha planteado importantes desafíos en el ámbito del saneamiento y gestión de las aguas grises. Durante años, un gran porcentaje de aguas originadas en el ámbito doméstico por la ciudadanía no recibió su correspondiente tratamiento, produciendo así los impactos negativos sobre los cuerpos de agua que receptaba estas cargas de desecho, así representando un riesgo sanitario y peligro para la sanidad de la población.

El aumento exponencial y constante de la zona poblacional más la expansión desorganizada en el área urbana han sobrepasado, en muchos casos, la capacidad de saneamiento así como la infraestructura encargada de realizar dicha acción. Esta situación ha alentado al gobierno local y otras comunidades a buscar respuestas alternativas, sostenibles y económicamente convenientes y viables para aumentar la calidad del agua residual y hacer posible la reutilización en actividades no potables.

Un caso a destacar es la intervención a nivel comunal es el proyecto que se desarrolló en la comuna Puerto Roma, ubicada en el cantón de Guayaquil. En la localidad se propuso un sistema de purificación de aguas grises del hogar, con la finalidad de usar dicho recurso en el riego de espacios ajardinados. La remediación consistía en una fase de sedimentación, continuaba con una doble capa de grava y arena (filtrantes inorgánicos) y aserrín y fibra de coco como filtrante orgánicos. Los análisis efectuados antes y después del tratamiento mostraron una

reducción sustancial en el nivel de partículas nocivas habituales presentes en las aguas grises, tales como sólidos disueltos totales, tensioactivos, aceites y grasas.

Este tipo de soluciones descentralizadas representan una alternativa viable para las comunidades rurales o incluso para las urbanizaciones y periurbanas que carecen de acceso a redes convencionales de tratamiento. Otra ventaja podría ser el uso de materiales locales así como su facilidad al momento de realizarle mantenimientos del sistema favorecen su sostenibilidad técnica y social.

De manera paralela a estas iniciativas, se encuentra el de la Municipalidad de Guayaquil, mediante la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil (EMAPAG), ha emprendido proyectos de mayor escala para mejorar la cobertura y eficiencia respecto al proceso de Procesamiento de efluentes de descarte. Uno de estos proyectos es la instalación dedicada al procesamiento de aguas de desecho “Las Esclusas”, una de las instalaciones clave para la gestión de aguas residuales domésticas en la zona urbana. Esta planta cumple la función de tratar las aguas que provienen de diferentes sectores Guayaquil para reducir la carga contaminante vertida al río Guayas.

Además, se encuentra en proceso el proyecto “los merinos”, el cual incluye la edificación de un segundo centro de depuración de gran capacidad, junto con redes de colectores, estaciones de bombeo y mejoras para el sistema de alcantarillado. Obras que reforzaran el compromiso hacia la gestión correcta e integral del agua en zonas densamente pobladas.

Otro gran importante avance Se basa en la ejecución acciones educativas y campañas de concientización ciudadana, orientados a promover la aplicación responsable del agua, así como la separación de los efluentes domésticos y negra, de esta manera se hará una reutilización

de aguas saneada para las áreas verdes. En algunas partes de Guayaquil se usa aguas tratadas para el riego generalmente en espacios públicos.

En síntesis, tanto las iniciativas a gran escala impulsadas por el municipio como las propuestas locales como la de Puerto Roma evidencian que el proceso de depuración y reaprovechamiento de aguas grises constituye una estrategia viable, técnica y económicamente, para mejorar el saneamiento en escenarios urbanos y rurales. La integración de enfoques tecnológicas apropiadas, el fortalecimiento institucional y la concienciación ecológica son pilares fundamentales para el éxito de estas intervenciones, que podrían ser replicadas a nivel nacional en el fundamento para una política orientada a la gestión sostenible del recurso hídrico.

1.2. Descripción del problema

El aumento continuo de la densidad poblacional y la superficie del territorio urbano no planificada han generado una serie de desafíos ambientales y sanitarios en ciudades en desarrollo como Guayaquil. Uno de los problemas más críticos es la mala gestión de las aguas no fecales emitidas. Las aguas grises que se originan en el lavamanos y la ducha, fregaderos y lavanderías, que a pesar que su nivel contaminante es mucho más inferior a la de las aguas negras, su descarga sin un tratamiento adecuado representa un significativo índice en la contaminación ambiental y un existente riesgo hacia la salud de la población.

Existe una gran cantidad de sectores de Guayaquil, especialmente en zonas periurbanas y marginales, la disponibilidad de los sistemas de alcantarillado es muy Insuficiente o ausente. Esto representa una gran problemática puesto que las poblaciones de dicha zona tienden a descargar estas aguas de desecho al suelo, en canales de lluvia o en cuerpos acuáticos cercanos, degradando así los ecosistemas acuáticos superficiales y subterráneos, aumentando las patologías de origen hídrico, la contaminación y pérdida de entornos y recursos que podían tener utilidad en algún punto. Pese a la importante relevancia de este problema, no se le ha dado una relevancia similar a la que se le ha tomado a las aguas negras en su tratamiento.

A pesar de la existencia de sistemas tecnológicos avanzados para la depuración de aguas residuales, estas suelen tener altos costos de mantenimiento, también presentan un difícil mantenimiento y requieren conocimientos técnicos especializados, dificultando así su implementación tanto en pequeña escala como en comunidades de escasos recursos. Por ello, se hace necesario implementar sistemas alternativos de tratamientos más económicos, eficientes, sostenible, fáciles de entender y dar mantenimiento así como su adaptabilidad a las

condiciones donde se implemente. En este contexto, las plantas filtrantes o también llamadas sistemas de tratamiento biológico o natural presentan una buena opción.

Los sistemas de filtración que usan plantas filtrantes, imitan los mecanismos naturales que tienen lugar en los ecosistemas fluviales, donde la interacción entre los microfitos, los sustratos minerales y las comunidades microbiana permite la remoción progresiva de las diversas sustancias contaminantes yacentes en el agua. Estos sistemas han demostrado una eficacia en escenarios rurales y urbanos a nivel nacional e internacional, pero aún no han sido difundidos lo suficiente así como su validez y difusión.

La problemática presente se agrava considerando que en los contextos universitario y formativos técnicos, existe una baja incorporación de tecnologías verdes en el tema de tratamiento de aguas grises, limitando así las posibilidades en cuanto a la innovación aplicable y sostenible. Esta circunstancia constituye una valiosa oportunidad para las instituciones educativas como la universidad de generar propuestas técnicas, prácticas y capaces de replicarse para así permitir el tratamiento de las aguas contaminadas viéndolo desde una perspectiva factible y ecológica, fomentando la reutilización de dicho recurso en labores para usos no relacionados con el consumo, como por ejemplo riego, la limpieza de espacios comunes, también en el retorno de las aguas a sus respectivos ecosistemas naturales.

El problema central de este proyecto trata la carencia de adopción de tecnologías sostenibles y rentables para el saneamiento de aguas grises en un contexto urbano, perpetuando la contaminación y perdiendo un recurso con un potencial reutilizable a corto y largo plazo además de la limitación de adopción de modelos circulares en gestión del recurso hídrico.

Este proyecto busca abordar esta problemática a través del diseño, la instalación y el monitoreo de un sistema de gestión de aguas grises usando como base las plantas filtrantes o macrofitas, que pueda ser aplicada en un ámbito universitario o comunitario, primeramente, esperando así no solo contribuir al conocimiento técnico, sino también a promover una cultura ambiental tanto al tratamiento de las aguas como a su cuidado y su uso inteligente, de otra manera también ayudara a futuros desarrollos de soluciones que respondan las problemáticas de necesidad ambiental a la par del marco económico y social.

1.3. Justificación del problema

La creciente demanda del agua potable en las ciudades así como Guayaquil, agregada la deficiente gestión de las aguas residuales, necesita el despliegue de soluciones sostenibles, de acceso económico y enfocadas al ámbito ambiental. En dicho panorama las aguas grises representan una oportunidad para la búsqueda de la reutilización del este recurso, mediante el adecuado tratamiento. En lugar de ser vertidas sin ningún tipo de control, pueden ser depuradas y usadas en actividades que no involucren se usadas para consuma humano.

El desarrollo y posterior uso de sistemas naturales de tratamiento, como filtros biológicos o humedales artificiales, nos adentra en una alternativa ecológica y económica que podría ser introducida en plantas de tratamiento descentralizadas, instituciones tanto educativas como de algunos otros tipos, comunidades o inclusive en viviendas como sistemas individuales. Estos sistemas son capaces de eliminar los compuestos dañinos presentes en el agua en forma disuelta mediante las actividades fisiológicas de las plantas acuáticas, sin requerir una inversión económica significativa, ni recursos o cantidades elevadas de energía volviéndose así una solución accesible para cualquier grupo económico.

1.4. Grupo Objetivo

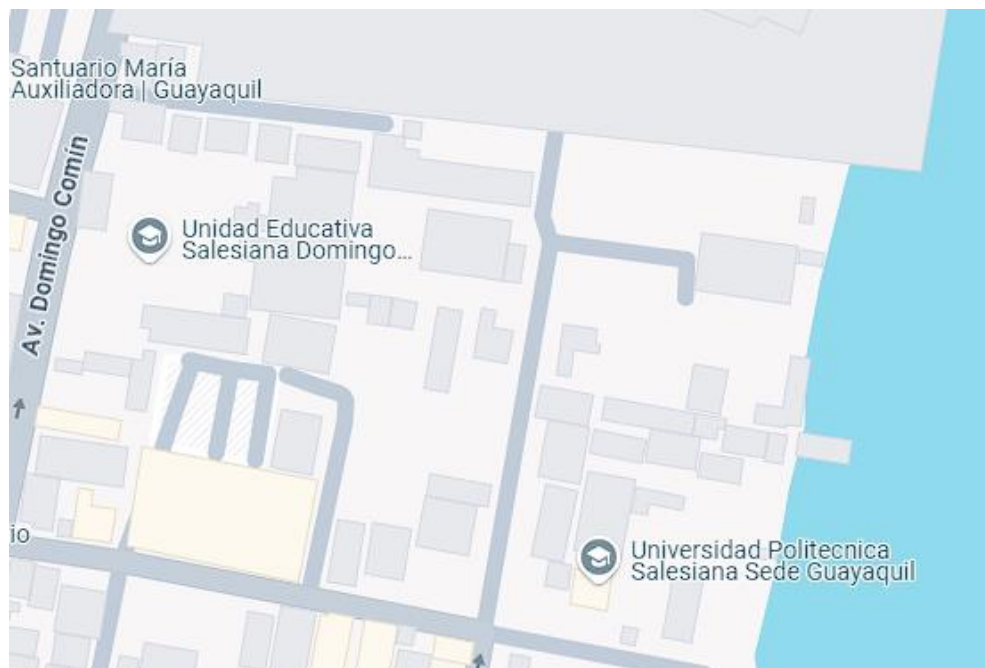
El grupo de interés estará centrado en:

- **Comunidades urbanas y periurbanas de Guayaquil** que carecen de acceso a sistemas formales de tratamiento de aguas grises.
- **Instituciones educativas** (escuelas, colegios, universidades) interesadas en implementar soluciones sostenibles en sus infraestructuras.
- **Estudiantes y docentes universitarios**, que podrán utilizar el prototipo como recurso didáctico para la enseñanza de procesos naturales de tratamiento de agua y sostenibilidad ambiental

1.5. Delimitaciones

1.5.1. Delimitación espacial

El proyecto se llevará a cabo en la ciudad de, más específicamente dentro del área de la Universidad Politécnica Salesiana (bloque C). El entorno, el clima son un determinante en el diseño y especificaciones del prototipo



Fuente: IAutores: Núñez & Tenezaca, Lugar de las pruebas

1.5.2. Delimitación temporal

El estudio tendrá un tiempo estimado de 1 a 4 meses, desde su fase inicial de análisis hasta su etapa final de obtención de resultados. En este tiempo se está contando el diseño, construcción, la ejecución del proyecto para su posterior recolección de datos

1.5.3. Delimitación temática

El enfoque es exclusivamente en el procesamiento de aguas grises, sin incluir aguas negras, así como las aguas combinadas. Se tomará en cuenta el tema del diseño y la evaluación del sistema de depuración usando plantas filtrantes como tecnología novedosa. No se harán análisis exhaustivos de niveles microbiológicos, y otros factores tales como el agua para consumo humano directo

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

- Depurar aguas grises de una planta de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso de plantas filtrantes

1.6.2. Objetivos Específicos

- Investigar las especies vegetales y sustratos más adecuados para sistemas de filtración natural bajo las condiciones climáticas y urbanas de Guayaquil.
- Diseñar un modelo funcional de un sistema filtrante para depurar aguas grises a pequeña escala.
- Evaluar el nivel de eficiencia del sistema en la eliminación de contaminantes tales como sólidos en suspensión, materia orgánica y nutrientes.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas Residuales y su Clasificación

Las aguas de desechos son aquellas que han sido alteradas en su composición natural debido a la acción humana, incorporando sustancias nocivas generadas por actividades domésticas, industriales, comerciales o agrícolas. Estos líquidos contienen una mezcla de compuestos orgánicos, inorgánicos y microorganismos, que pueden afectar la salud comunitaria y el entorno natural si no se tratan correctamente antes de su disposición final.

Se clasifican principalmente en:

- **Aguas negras:** son las que contienen desechos fecales y orina, provenientes de inodoros y urinarios. Estas aguas tienen altos niveles de materia orgánica, nutrientes y patógenos.
- **Aguas grises:** provienen de actividades domésticas que no incluyen desechos fecales, como duchas, lavamanos, lavadoras y fregaderos. Aunque contienen menos patógenos que las aguas negras, presentan contaminantes como detergentes, grasas, aceites y materia orgánica biodegradable.
- **Aguas pluviales:** son las que provienen de la lluvia y escurrimientos superficiales, usualmente con baja carga contaminante, aunque pueden arrastrar contaminantes urbanos.

La diferenciación entre aguas grises y negras para su tratamiento y posible aprovechamiento secundario representa una estrategia eficaz para reducir el consumo de agua purificada y disminuir el volumen de contaminantes en infraestructura de drenaje y cuerpos receptores.

2.2. Aguas grises: conceptos y características

Las aguas grises corresponden a dichas aguas residuales generadas normalmente por los hogares, que no contienen desechos fecales ni orina. Su origen se suele asociar a actividades domésticas como el baño (duchas y lavamanos), residuos de la lavandería (lavado de ropa), incluso la limpieza general del hogar (pisos entre otras superficies) o del lavado del auto. Pese a su inferior carga contaminante en relación a las aguas negras, estas aguas siguen siendo no aptas para ser vertidas al ambiente sin un tratamiento previo, ya que los contaminantes pueden generar daños en su entorno.

En oposición a las aguas negras, las aguas grises presentan composiciones más variables, muy dependientes de los hábitos de consumo dentro del hogar, los productos de limpieza que usan en esta misma así como de su fuente. Un ejemplo es las aguas de las duchas bien cargadas de restos de jabón y shampoo, así como restos corporales y otros productos para el cuerpo, las aguas de lavandería vienen con restos de detergentes y suavizantes así como partículas textiles.

2.2.1. Potencial de Tratamiento y Reutilización

La depuración de aguas grises es una estrategia fundamental para salvaguardar y cuidado de los recursos hídricos. Mediante los correctos procesos de depuración. Entre sus posibles usos a futuro serían el riego de áreas verdes y jardines, La higienización de áreas externas y públicos, la recarga de biomas acuíferos o hasta en sistemas hogareños de segunda necesidad como el agua usada en la descarga de los inodoros, de esta manera se contribuye significativamente al ahorro del agua así como al de su uso sostenible.

Este enfoque es importante en zonas con una alta población y demografía como lo es la ciudad de Guayaquil, donde factores ambientales como el cada vez más adverso cambio climático y la creciente población ciudadana, ponen en disputa la disponibilidad del agua así como la obtención de fuentes potables de este recurso crucial. Dentro de este marco el uso de las aguas grises no solo representa una significativa bajada en la demanda sobre los sistemas de abastecimiento, sino que también representa una disminución de carga sobre los alcantarillados.

2.2.2. Consideraciones y Riesgos Asociados

A pesar de la gran cantidad de beneficios, hay que tener en cuenta que la reutilización de aguas residuales debe realizarse conforme a condiciones de tratamiento estrictas, que no pueden ser ignoradas. Los microorganismos patógenos es uno de los peligros a los que uno se puede exponer de no ser eliminados representando así una amenaza para la salud pública.

Otro aspecto a recalcar es la acumulación de ciertas sustancias químicas que si no son tratadas correctamente pueden dañar el ambiente y a personas, para esto hay que analizar las tecnologías que usaremos, para que sean capaces de eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos de manera eficiente

2.3. Tipos de tratamientos de agua

Las técnicas naturales de tratamiento denominadas extensivas estos sistemas utilizan mecanismos físicos, químicos y biológicos inherentes al entorno natural para filtrar el agua residual.

2.3.1. Tratamiento físico

- **Filtros de arena y grava:** Estos filtros funcionan gracias a la captura de compuestos suspendidos y residuos sólidos más grandes yacientes en el agua residual. El agua se infiltra lentamente por capas de arena y grava como barreras físicas que atrapa las partículas logrando una mejora considerable en la condición del agua.

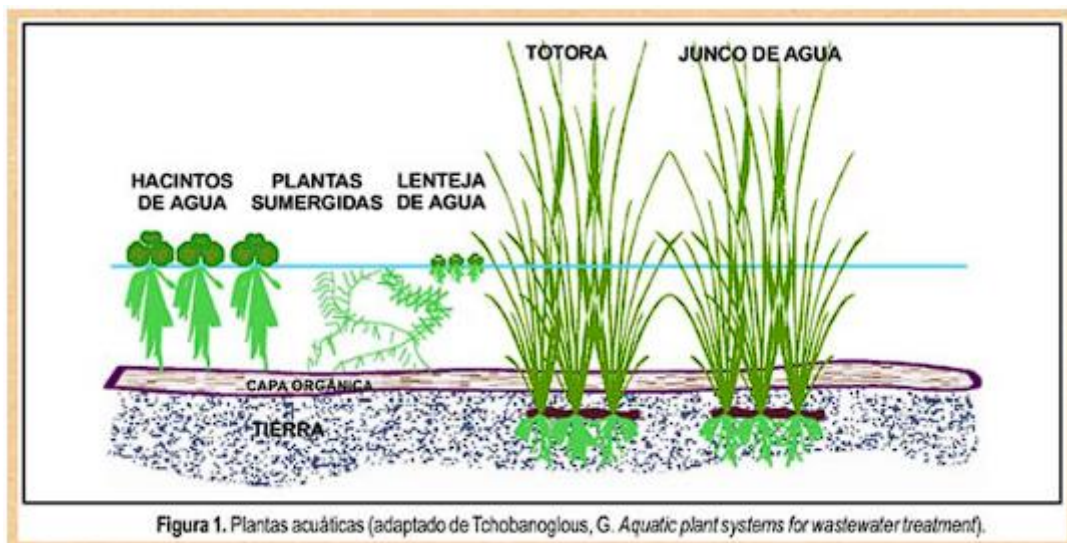
- **Sedimentadores:** Son estructuras concebidas para favorecer la sedimentación de sólidos pesados presentes en forma de partículas en el agua, a través de la gravedad estas partículas se asientan en el fondo clarificando el agua y permitiendo que las plantas filtrantes puedan procesar los sedimentos.
- **Filtros mecánicos:** se clasifican en mallas, tamices, máscaras que se utilizan para atrapar las partículas de gran tamaño. Se utilizan como primera barrera para evitar obstrucciones en los demás niveles.

2.3.2. Tratamiento biológico

- **Filtros biológicos:** Estos sistemas utilizan microorganismos que descompongan los orgánicos solubles contenidos en el agua. El agua pasa a través de un medio que favorezca el crecimiento del biofilm compuesto por bacteria anaeróbicas y aeróbicas que degradan compuestos
- **Humedales artificiales y filtros verdes:** Utilizan plantas acuáticas (macrófitas) y microorganismos para eliminar contaminantes naturalmente haciendo una combinación de todos los tipos de tratamiento en conjunto.

2.3.3. Tratamiento químico y desinfección

- **Desinfección UV:** Uso de luz ultra violeta con el fin de eliminar microorganismos patógenos sin el uso de químicos en el agua. Un mecanismo eficiente para garantizar la seguridad microbiológica del agua tratada.
- **Cloración:** Tratamiento químico mediante el uso de cloro para erradicar virus y bacterias así como otros organismos patógenos. Muy efectivo, pero requiere otro control para evitar la formación de subcompuestos tóxicos

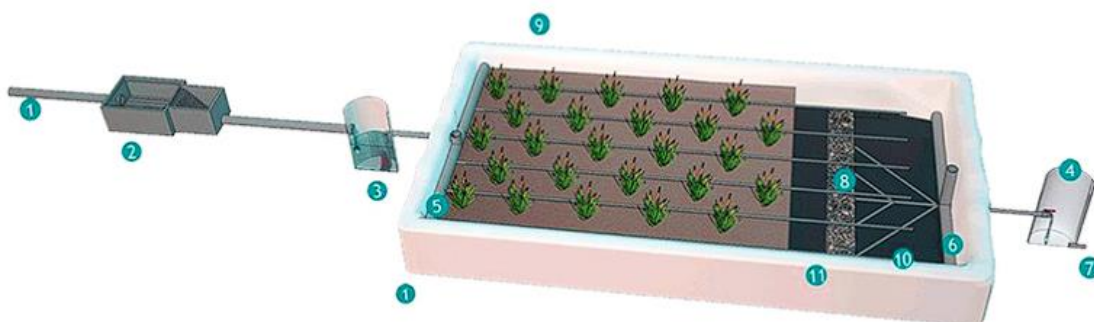


2.4. Tecnologías naturales de tratamiento: humedales y filtros verdes

Entre estos sistemas más destacados están los humedales construidos (artificiales) o filtros verdes, de los cuales se han logrado obtener resultados muy favorables en la eliminación de contaminantes.

Se clasifican en dos tipos los Humedales construidos: los de flujo en superficie y flujo subsuperficial (este flujo puede tener una configuración vertical así como horizontal). Se componen de una serie de niveles en el cual el principal es el que se encarga de hacer la filtración, el cual generalmente es un nivel poroso con plantas macrófitas que tienen la capacidad de absorber contaminantes. Se hace fluir el agua a través de los diferentes sustratos con una velocidad controlada, favoreciendo la sedimentación de sólidos, permitiendo así la absorción de dichas sustancias por los materiales filtrantes y que se logre activar a los microorganismos para que realicen sus procesos vitales que descompongan los contaminantes.

(Ikrema Hassan, 2021)



Fuente: 2TECPA (2021). Recuperado de <https://www.tecpa.es/wp-content/uploads/2021/02/humedales-artificiales-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales.jpg>

Los filtros verdes se construyen directamente en entornos urbanos, siendo integrados a zonas verdes, parques, jardines o viviendas de tipo ecológicas o ajardinadas, donde el agua pasa por un medio vegetal filtrante ocurriendo ahí el intercambio físico, químico y biológico. Su mantenimiento es relativamente fácil y sus costos operativos bajos representan una alta eficacia en la supresión de nutrientes, compuestos metálicos pesados, partículas suspendidas y patógenos.



Fuente: 3Cenicafé (s.f.). Recuperado de https://www.cenicafe.org/es/publications/Afiche_filtros_verdes.JPG

Implementar estas tecnologías en una ciudad costera tropical como lo es Guayaquil representa una estrategia efectiva con el fin de progresar en la consecución de los ODS. Innovar con estas tecnologías ecológicas como lo son los humedales y filtros verdes, no solo resuelve el ámbito del tratamiento de las aguas grises, también generan urbanismos ecológicos agradables a la vista, otro aspecto importante es la ayuda a la biodiversidad, mejorar el clima local y la generación de espacios de descanso y recreación. De esta forma se creará una conexión cada vez más fuerte con la naturaleza aplicada a un entorno urbano.

De igual manera estos sistemas favorecen en la gestión hídrica en cuanto se trate de desafíos como inundaciones y sequías. Si se integran a infraestructuras de gestión de aguas urbanas. De esta manera se crean ciudades “esponja” capaces de captar, filtrar y reutilizar el agua de la misma cuenca urbana. Esta característica se la puede lograr implementando techos verdes, jardines de lluvia y paisajes filtrantes. Aprovechando la vegetación local preferiblemente para lograr una absorción y remoción de sustancias nocivas evitando la sobrecarga de los conductos de tratamientos de agua convencionales. (Jenkins, 2020)



Fuente: 4Jiang Rong, designer/www.gochengdu.cn, Chengdu Daily

2.5. Plantas macrófitas definición

Las vegetaciones macrófitas constituyen un conjunto de plantas especializadas en la vida dentro de ambientes húmedos o directamente en ambientes acuáticos tales como: humedales, pantanos, lagos, lagunas. Son plantas muy importantes para los ecosistemas acuáticos puesto que su presencia representa un entorno saludable. Son plantas muy importantes debido a que pueden procesar ciertos compuestos yacientes en el agua como resultado de la acción microbiana que habitan en sus raíces o en órganos especializados para almacenar a dichos organismos que degradan la materia orgánica, así como fijando otros compuestos como el nitrógeno y el fósforo también procesando otros como nitritos, nitratos y amonio. Las plantas suministran oxígeno a las bacterias que asimilan y suministran los contaminantes a sus tejidos, mediante la transformación de los compuestos químicos. Existen tres procesos de eliminación físicos, químicos y biológicos. (Carrión C., Ligia; Cuenca L., Numan; Ansaloni, Raffaella, 2009)

2.6. Plantas filtrantes: funcionamiento y especies utilizadas

Las plantas filtrantes, también denominadas macrófitas acuáticas, constituyen un componente esencial en los procesos de depuración de aguas grises de manera natural, cumplen con múltiples funciones que benefician tanto en la depuración del agua y en el equilibrio ecológico del sistema. Estas especies desempeñan como agentes fito-remediadores capaces de absorber nutrientes, metales pesados y materia orgánica, estabilizando el sustrato y proporcionando un hábitat favorable para las comunidades de microorganismos que realizan la degradación de compuestos. Estas características en conjunto permiten una reducción

significativa en la calidad del líquido, reduciendo los contaminantes antes de su integración al ambiente natural o tu posterior reutilización. (Ceballos, 2020)

En los sistemas de humedales construidos o filtros verdes, las plantas filtrantes cumplen funciones específicas dependiendo de su ubicación y morfología en el sistema. Generalmente, se utilizan combinaciones de plantas flotantes, sumergidas y emergentes, de manera que estas puedan complementarse a lo largo de las diferentes etapas del proceso de tratamiento. Las plantas flotantes como el lechuguín (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna minor*), que forman una cubierta en la superficie que evita la evaporación excesiva a la vez que absorbe nutrientes disueltos. Las plantas emergentes como el Papiro (*Cyperus papyrus*) desarrollan sistemas de raíces robustos que oxigenan y sustrato que promueve la actividad bacteriana un proceso importante para la descomposición de materia orgánica.

La elección de las especies vegetales de ese tipo de sistemas se debe considerar los factores de adaptabilidad al clima local, su resistencia a los contaminantes, su reproductividad y la facilidad de manejo. En el contexto del clima tropical húmedo de Guayaquil, es recomendable el uso de especies nativas o naturalizadas (plantas introducidas que no representan un desequilibrio ecológico) logrando una integración ecológica y un mantenimiento eficiente. Entre las especies empleadas se destacan:

- ***Cyperus papyrus* (Papiro):** Planta emergente de gran tamaño capaz de alcanzar los 5 metros de altura. Caracterizada debido a su gran habilidad para captar nutrientes especialmente los compuestos orgánicos, su extensa y resistente sistema de raíces (sistema radicular) y su adaptabilidad y la cualidad de soportar aguas con altas cargas contaminantes. Estudios realizados en sistemas de humedales artificiales han demostrado que el papiro puede alcanzar eficiencias

de remoción superiores al 85% con relación a la demanda bioquímica de oxígeno y el número total de sólidos en suspensión (SST).

- **Lemna minor (lenteja de agua):** Una planta macrófita de pequeño tamaño, reconocida por sus hojas redondeadas y su acelerado crecimiento, muy utilizada en sistemas de tratamientos y acuariofilia para la degradación de minerales como el nitrógeno y el fósforo. También es un regulador térmico debido a su alta reproducción crea una barrera solar que reduce el crecimiento de algas indeseadas.
- **Eichhornia Crassipes:** Planta acuática flotante originaria del río Amazonas presenta un bulbo donde favorece el crecimiento de bacterias en sus tallos engrosados y raíces colgantes que es donde habitan y liberan gases que permite que la planta flote, son eficientes en la eliminación de metales pesados tales como plomo, zinc y cadmio y también en la reducción de materia orgánica. (PlantRight, s.f)

La operación eficiente de la planta de tratamiento con plantas filtrantes dependerá del mantenimiento y el control equilibrado del caudal, así como la capacidad de carga del medio filtrante así como del desarrollo de la vegetación usada. Un caudal excesivo puede provocar la saturación en nuestro sistema lo que le quitaría eficiencia, y un caudal muy lento o insuficiente podría afectar la oxigenación de nuestra flora bacteriana acabando con la capacidad de filtración. Para evitar estas situaciones se deben realizar monitoreo y revisiones periódicas que evalúen la condición del agua y el bienestar de las plantas.

El correcto manejo de la flora usada incluye la poda regular, la remoción de excesos de plantas o sobrepoblación, la replantación en zonas degradadas y remoción de biomasa. De esta

forma se asegura la eficiencia depurativa y se evitan los problemas de eutrofización o al colapso en general del humedal. Además que es fundamental tener en cuenta el funcionamiento del sistema (orientación, tipo de lecho, tipo de sustrato, la ubicación de las especies vegetales, para maximizar los resultados de la planta. (Rodríguez, 2018)

Las plantas no solo cumplen un rol técnico dentro de planta de depuración de aguas grises, también aporta un valor ecológico y tecnológico. La combinación y ubicación de las especies como el lechuguín, lenteja de agua y el papiro, también influirá en la capacidad de eliminación de los residuos y nutrientes hasta que las condiciones físicas y químicas del agua se mejoren, implicando así una estrategia sostenible para la ciudad de Guayaquil sin dejar de lado el apartado económico y eficaz en la gestión de aguas servidas originadas en residencias. Siendo beneficiosa tanto a corto como a largo plazo en aspectos ecológicos, educativos, sociales y urbanísticos.

2.7. Mecanismos de depuración en sistemas filtrantes

Los métodos para el procesamiento de aguas servidas a través de filtros vegetales o humedales creados representan una opción ambientalmente amigable y sostenible en comparación a los métodos convencionales. Estos sistemas que emplean un conjunto de mecanismos que en grupo permiten una eliminación progresiva de diversos compuestos contaminantes presentes en el agua gris. Esta depuración es lograda gracias a la interacción entre el sustrato filtrante, las plantas y la actividad microbiana asociada, que conforma una red de procesos que simulan los ciclos naturales de autodepuración de los ecosistemas acuáticos. (Leticia Y. Kochi, 2020)

Entre los mecanismos de depuración encontramos:

- **Sedimentación:** Uno de los mecanismos iniciales más evidentes en este tipo de

tratamientos. Este proceso ocurre cuando se reduce el flujo de agua y las partículas de mayor peso se depositan en la base del recipiente del medio filtrante. La correcta funcionalidad del proceso dependerá de la velocidad con la que se pase el flujo de agua, el diseño de la planta de tratamiento. En los humedales horizontales de flujo superficial, la sedimentación presenta una importante fase debido a que gracias a este proceso se puede reducir gran parte de los sólidos hacia las siguientes fases.

- **Filtración:** La filtración es otro proceso de gran relevancia sucede conforme el agua atraviesa las distintas capas del sistema, las cuales pueden estar conformadas por grava, arena, mallas filtrantes u otros materiales porosos. Estas capas actúan como barreras físicas reteniendo sólidos suspendidos, la materia orgánica presente, y pequeñas cantidades de microorganismos. Las raíces de las plantas emergentes también juegan un rol activo, su crecimiento genera una matriz densa favoreciendo la retención de partículas y aumenta la superficie de contacto para los microorganismos beneficiosos que realizarán la descomposición de nutrientes, de manera que se filtra y a la vez se degrada biológicamente los contaminantes.
- **Adsorción:** La adsorción es el mecanismo químico en el cual ciertos compuestos contaminantes se adhieren a los sustratos filtrantes de donde proviene su nombre. Este proceso es donde los metales pesados y compuestos orgánicos complejos que no se degradan con tanta facilidad. (Candelaria Tejada-Tovar, 2014). Su capacidad absorbente estará determinada por la composición del sustrato y sus características físico-químicas. Este mecanismo tiene que revisarse y monitorearse cada cierto tiempo puesto que un largo periodo de tiempo puede

saturar el sistema.

- **Asimilación vegetal:** Las plantas presentes en los humedales artificiales no solo tiene una función estructural y estética, su papel es de suma importancia. A través de la asimilación vegetal, las especies que se ubican en el tanque de filtración, absorben nutrientes disueltos en el agua, sobre todo nitrógeno, fósforo y metales pesados. Estos compuestos son degradados y reducidos lo que disminuye la carga contaminante evitando la eutrofización en los cuerpos hídricos, otro punto es el almacenamiento de dichos nutrientes en los tejidos vegetales, retirándolos o degradándolos del sistema. (Hidropluviales, 2021)
- **Biodegradación microbiana:** La actividad microbiológica es un punto clave en los diversos procesos de tratamientos en el humedal construido. En la superficie del sustrato y en las raíces se desarrolla una película o biofilm (colonias de microorganismos) rica en bacterias, hongos y otros microbios que son responsables con el objetivo de degradar la materia orgánica presente en el agua. Estos organismos realizan la biodegradación tanto aeróbica y anaeróbica, transformando compuestos dañinos en sustancias más estables e inocuas. (Condorchem Envitech, S.f). La eficiencia de la biodegradación dependerá de la temperatura, el pH y la presencia de nutrientes esenciales para la actividad bacteriana.
- **Reacciones de oxidación reducción:** Las reacciones redox (oxidación-reducción) desempeña un papel clave en la eliminación de algunos compuestos. En presencia de oxígeno (zonas aeróbicas), se produce la nitrificación, es un proceso en el cual bacterias especializadas transforman el amonio (NH_4^+) en nitrato (NO_3^-). Posteriormente en zonas con menos oxígeno (zonas anaeróbicas),

las cuales desnitrifican, reduciendo los nitritos a nitrógeno gaseoso (N₂), que es expulsado a la atmósfera, finalizando el ciclo del nitrógeno. (Badger Meter, s.f).
También son responsables de la transformación del hierro, magnesio, variantes del sulfuro modificando sus cualidades solubles y su movilidad en el sistema.

2.7.1. Factores que influyen la eficiencia

La eficiencia global del sistema filtrante depende de múltiples variables que deben ser tomados en cuenta durante el diseño y operación del sistema tales como:

- Diseño Hidráulico
- Elección de la flora adecuada
- Tipo de sustratos y mallas
- Condiciones climáticas

En conjunto estos sistemas filtrantes con base vegetal representan una estrategia viable y sustentable para el tratamiento de las aguas grises, especialmente en zonas rurales donde pueden beneficiar por su bajo costo y accesibilidad. Y dónde su principio ecológico lo vuelva armonioso con el medio ambiente.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El estudio actual corresponde a una investigación aplicada, dado que tiene como finalidad resolver un problema práctico relacionado a la gestión la limpieza de aguas grises a través de la instalación de sistemas naturales de tratamiento, siendo más específicos el uso de plantas filtrantes. Este enfoque permite generar soluciones innovadoras con potencial de replicabilidad en contextos urbanos como Guayaquil.

3.1. Tipo de investigación

El enfoque es de tipo cuantitativo, Porque se fundamenta en la recopilación de datos cuantitativos relacionados con las características del agua antes y después de ser tratada para realizar la comparación objetiva y determinar la eficiencia del sistema propuesto. Se aplicarán técnicas de análisis estadístico para validar los resultados obtenidos e identificar si hay diferencias relevantes en los resultados.

En cuanto al diseño, se trata de una investigación experimental, debido a que se manipula intencionalmente una variable (el sistema de tratamiento con plantas) para observar sus efectos sobre otras variables como (la oxigenación, turbidez, sólidos suspendidos, entre otros) aunque no se cuenta con una aleatorización completa de muestras, se controlan las condiciones del experimento.

Este tipo de diseño es común en investigaciones de tipo ambiental y de ingeniería aplicada, donde la meta es medir la efectividad de una intervención tecnológica en un contexto real pero controlado. Además, es consistente con metodologías utilizadas en estudios similares

a nivel internacional sobre humedales construidos y filtros verdes.

3.2. Diseño de la Investigación

La estructura de este estudio responde a la lógica de un estudio de campo con carácter cuasi-experimental, orientado a medir el rendimiento de un sistema para tratar aguas grises utilizando plantas, implementado en una unidad piloto diseñada de forma artesanal basada en necesidades de la ciudad de Guayaquil.

Para ello, se establecerá en dos momentos clave de recolección de datos: antes del tratamiento de agua (agua gris sin tratar) y después del paso por el sistema mediante la evaluación comparativa de parámetros físicos, químicos y biológicos. Entre los parámetros a evaluar incluyen la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO), la turbidez y los sólidos en suspensión (SST) y PH.

El esquema de diseño se utilizaron tres tanques de diferentes tamaños el tanque 1 con aproximadamente 20 litros, el tanque 2 con 40 litros de capacidad, el tanque 3 con una capacidad de 60 a 65 litros y el tanque 4 con una capacidad de 20 cada uno es alimentado con motores sumergibles para facilitar el flujo entre ellos y ayudado por tres filtros más pequeños de capas que ayudaran a retener la mayor carga contaminante posible:

- **Tanque 1 (entrada):** Recibe directamente el agua gris que proviene de la lavadora. En esta etapa inicial, el agua presentaba alta turbidez, espuma, color gris oscuro y un pH entre 7.5 y 8.0. Para el traslado del agua hacia el segundo tanque se empleó un motor sumergible de 230/115V, con una potencia de 6 W y un caudal máximo (Q_{max}) de 150 L/h a una profundidad media para evitar el paso de las grasas que

flotan en la superficie. Como característica adicional el agua pasa por un filtro compuesto antes de llegar al tanque 2.

- **Tanque 2 (Tratamiento físico químico, biológica y vegetal):** Este tanque fue diseñado con mayor longitud (40 cm) para permitir un tratamiento en tres secciones secuenciales de materiales que realizaran la filtración mecánica
 - **Primera sección:** contiene mayas de tela gruesa, plumón sintético, y una tela retenedora fina
 - **Segunda sección:** Compuesto por raíces de Jacinto de agua (lechuguín) y raíces de papiro retenidos en una maya fina para atrapar impurezas.
 - **Tercera sección:** Una capa compuesta de tela nanofibra gruesa, tela fina retenedora, plumón sintético y tela de nanofibra media.

Agregado a esto, el tanque 2 dispone de un motor adicional: para pasar el líquido del tanque 2 al tanque 3 a través de un filtro de capas para bajar aún más la concentración de contaminantes

- **Tanque 3 (tratamiento biológico):** aquí se encuentra el tanque más grande (73 cm) seccionado aquí se realiza la clarificación y pulido del agua tratada. La acción conjunta de las plantas y la sedimentación natural facilita un incremento adicional en la calidad visual y sensorial del efluente. Consiste en una separación de canutillos para facilitar el crecimiento bacteriano oxigenado gracias a un difusor de oxígeno constante, y en la otra sección se encuentra la lenteja de agua y papiro para absorber la materia flotante y la que yace en el fondo.
- **Tanque 4:** Recibe el agua que sale del tanque 3 pasando previamente por otro filtro de capas bajando así su carga contaminante

Durante tres semanas, se realizaron observaciones periódicas y mediciones de

parámetros clave en cada uno de los tanques. Los datos obtenidos se presentan a continuación como parte del análisis técnico.



Fuente: 5 Autores Núñez & Tenezaca Filtro artesanal entre Tanque 2 y 3. Se utilizó un envase plástico transparente relleno con capas



Fuente: 6Autores: Núñez & Tenezaca imagen de planta de tratamiento

3.3. Procedimiento experimental

En este estudio, el grupo objeto de análisis estuvo constituido por las aguas grises generadas en un entorno doméstico y educativo dentro de la ciudad de Guayaquil. Estas aguas grises incluyeron aquellas generadas por lavamanos, duchas, lavandería y lavaderos; quedando excluidas las aguas negras con residuos fecales.

La muestra correspondió a un volumen representativo de aguas grises recolectadas de un sistema doméstico específico, seleccionado por su accesibilidad y por representar condiciones promedio de generación de este tipo de efluente en la zona. La selección fue no probabilística por conveniencia, basada en criterios de viabilidad técnica, disponibilidad de recursos y facilidad de acceso al sitio de estudio. Se consideró una frecuencia de muestreo semanal, con al menos seis eventos de recolección, tanto antes como después del tratamiento, durante el período de evaluación.

Cada evento de muestreo consistió en recolectar entre 1 y 2 litros por punto (entrada y salida), volumen suficiente con el fin de llevar a cabo los análisis físicos, químicos y microbiológicos requeridos. Esta estrategia garantizó la obtención de datos confiables para evaluar la eficacia del sistema implementado. Durante la implementación, se evidenció que el agua presentaba una alcalinidad considerable, con pH entre 7.8 y 8.0 debido a los sodios, lo cual afectó negativamente la salud de las plantas macrófitas, que comenzaron a deteriorarse. Ante esta situación, se desarrollaron filtros artesanales tipo botella, compuestos por capas de plumón, nano fibras, grava, carbón activado y filtro de café. Estos fueron colocados entre los tanques para acondicionar mejor el agua antes de que llegara a las zonas vegetales.

Además, se identificó la necesidad de mejorar la claridad del efluente, lo que llevó a la incorporación de un cuarto tanque como etapa de pulido final. Estos ajustes, implementados mediante observación y ensayo, reforzaron la eficiencia y adaptabilidad del sistema. Esto permitió bajar considerablemente el pH en el agua tanto así que permito que las lentejas de agua pudieran proliferar adecuadamente esto se vio visiblemente debido a que lograron reproducirse muy rápidamente en un corto lapso de tiempo



Fuente: 7Autores: Núñez y Tenezaca.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La obtención de datos se realizó mediante un componente esencial en el desarrollo de esta investigación, ya que permitió evaluar de forma objetiva la efectividad del Instalación para la purificación de aguas grises. Para lograr una observación sistemática y confiable, se aplicaron

métodos mixtos de recolección que integraron herramientas de medición directa, instrumentos manuales, observaciones cualitativas y registros fotográficos.

3.4.1. Parámetros físicos, químicos y biológicos analizados

Durante la fase experimental se monitorearon los siguientes parámetros:

- **pH:** Determinación del grado de acidez o alcalinidad del agua en cada etapa del tratamiento.
- **DBO (Demanda biológica de oxígeno):** Estima la materia orgánica biodegradable.
- **DQO (Demanda química de oxígeno):** Cuantifica el contenido total de materia orgánica (biodegradable y no biodegradable).
- **Turbidez:** Mide la presencia de partículas suspendidas
- **Color y olor:** Evaluados cualitativamente como indicadores visuales y sensoriales del proceso de depuración.
- **Oxigenación y actividad vegetal:** Observadas a través de la vitalidad de las plantas y la claridad del efluente.

3.4.2. Instrumentos empleados

Para la medición y registro de los parámetros anteriores, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Medidor de pH:** En este caso se usó un medidor de pH de uso comercial y uno casero para medir los niveles en la tabla (pH 6 a 7.8) antes de cada jornada.
- **Tubo de turbidez casero:** Elaborado en PVC blanco, con escala visual que permitió estimaciones cercanas a NTU mediante la pérdida de visibilidad de un patrón negro en la base.

- **Tiras reactivas (kits caseros):** utilizadas para estimar valores aproximados de DQO y algunos contaminantes químicos (cuando fue posible).
- **Fichas de observación manual:** elaboradas por el investigador para anotar el estado sensorial del agua (olor, color, comportamiento vegetal, presencia de espuma o residuos flotantes).
- **Jeringas estériles y recipientes plásticos:** empleados para la recolección puntual del agua en cada tanque.

3.4.3. Técnica de muestreo y frecuencia

El muestreo se realizó cada dos o tres días durante tres semanas, aplicando un muestreo sistemático por intervalos fijos. Se tomaron muestras desde los tres tanques (entrada, intermedio y salida) usando jeringas para evitar contacto cruzado.

Las muestras se analizaron en el mismo día de recolección, evitando que la sedimentación, temperatura o exposición alteraran los valores.

3.4.4. Validación de datos y control de calidad

Pese a contar con instrumentos de bajo costo o improvisados, se procuró la validez de los resultados a través de:

- **Repetición de mediciones:** especialmente en pH y turbidez, para promediar y detectar anomalías.
- **Comparación visual con estándares de color y turbidez** en tablas de referencia.
- **Documentación fotográfica regular**, que permitió evaluar la evolución y contrastar resultados

- **Control de condiciones ambientales:** registro del clima (soleado o nublado) y observación de cambios en la actividad de las plantas.

3.5. Técnicas de análisis de datos

La interpretación de los datos constituye una fase crítica en la validación de hipótesis y la generación de conclusiones sobre la eficacia del sistema de depuración de aguas grises a través de plantas filtrantes. En este estudio se utilizará un enfoque cuantitativo, apoyado en herramientas estadísticas, para procesar, organizar e interpretar las conclusiones derivadas de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

3.5.1. Procesamiento inicial de datos

Antes del análisis estadístico, los datos recolectados serán:

- Codificados y sistematizados en matrices de Excel, o bases de datos compatibles con SPSS o R. Se usó Excel para hacer anotaciones de valores y seguir su progreso a lo largo del tiempo
- Verificados mediante una revisión cruzada para detectar errores de transcripción o valores atípicos extremos.
- Clasificados según el tanque de muestreo (entrada, intermedio, salida) y el día de medición
- Tratados para la detección de datos faltantes, los cuales serán clasificados como valores nulos o excluidos del análisis, si es necesario.
- Comparados visualmente a través de tablas, gráficos de líneas y porcentajes de reducción.

3.5.2. Valores obtenidos de DBO:

Tanque	Etapa	DBO (mg/L)
Tnque 1	Entrada (agua gris)	182.6
Tnque 2	Filtro intermedio	90.56
Tnque 3	tratamiento vegetal	42.93
Tnque 4	Pulido final	22.3

Fuente: 8 Autores: Núñez y Tenezaca

3.5.3. Análisis descriptivo y comparativo

Se aplicaron herramientas básicas para conocer el comportamiento de cada parámetro:

- **Media aritmética:** para identificar el valor promedio por parámetro en cada etapa del tratamiento.
- **Cálculo de reducción porcentual,** utilizando la fórmula:

$$\text{Reducción (\%)} = \left(\frac{\text{Valor de entrada} - \text{valor de salida}}{\text{valor de entrada}} \right) \times 100$$

- **Gráficos de líneas:** se elaboraron para visualizar la evolución de parámetros como DBO, DQO y turbidez entre tanques.

3.5.4. Evaluación sensorial y cualitativa

Dado que se aplicaron métodos caseros y observaciones visuales, también se registraron:

- Cambios en el color del agua (de gris oscuro a claro o transparente).
- Cambios en el olor (de fuerte o jabonoso a leve o nulo).
- Observaciones sobre el comportamiento de las plantas: vitalidad, flotación, color de hojas. Las hojas se presentaban transparentes cuando el agua no estaba tan filtrada

3.5.5. Análisis comparativo pre-post tratamiento

Dado que se trata de un diseño cuasi experimental con mediciones repetidas sobre la misma muestra (antes y después del tratamiento), se aplicará:

- **Prueba para muestras relacionadas** (si hay normalidad) con el propósito de identificar si hay diferencias estadísticamente relevantes entre los valores de entrada y salida del sistema.

3.5.6. Herramientas y Software

- **Microsoft Excel:** Para el almacenamiento preliminar, generación de gráficos y fórmulas básicas.

3.5.7. Criterios de significancia

Se considerará un nivel con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo que significa que, se aceptará una diferencia como significativa si el nivel de error no supera el 5 %.

3.6. Validez y contabilidad de los datos

En toda investigación científica, especialmente en aquellas con enfoque cuantitativo y aplicado, es esencial asegurar la veracidad y exactitud de la información recopilada. A fin de asegurar que las conclusiones derivadas sean sólidas, reproducibles y que sirven de base para la planificación técnica y ambiental.

En este estudio, se implementaron diversas estrategias metodológicas para maximizar la calidad de los resultados y minimizar sesgos o errores sistemáticos durante la recopilación, el estudio y la interpretación de los datos experimentales relacionados con las condiciones del agua antes y después de ser tratada con plantas filtrantes.

3.6.1. Confiabilidad

La confiabilidad se relaciona con la uniformidad y estabilidad de los resultados obtenidos en diferentes momentos, condiciones o por distintos operadores. Un procedimiento es confiable cuando, al repetirlo en condiciones similares, genera resultados comparables.

3.7. Limitaciones del estudio

A pesar del rigor metodológico implementado en el diseño, ejecución y análisis de la presente investigación, es fundamental reconocer una serie de limitaciones técnicas, contextuales y operativas que podrían influir al evaluar los resultados obtenidos, así como en su aplicabilidad futura en otros entornos o escalas.

El reconocimiento explícito de estas limitaciones no disminuye el valor del estudio, sino que aporta transparencia científica y permite delimitar adecuadamente el alcance y la generalización de los hallazgos, abriendo espacio para investigaciones posteriores más amplias

o complementarias.

1. Limitación temporal

El período de evaluación del sistema piloto estuvo determinado por el calendario académico universitario, con una duración limitada a algunas semanas de operación efectiva. A pesar de eso y los contratiempos la planta de tratamiento logro dar buenos resultados en cuanto a la respuesta filtrante del agua.

- **Implicaciones:** Esta restricción impidió analizar el comportamiento del sistema a largo plazo, lo cual es fundamental para evaluar la estabilidad, resiliencia y posibles procesos de colmatación del sustrato o agotamiento de la capacidad de absorción de las plantas.
- **Posible mejora:** Estudios longitudinales con seguimiento estacional permitirían obtener datos más robustos sobre la variabilidad del sistema en diferentes condiciones climáticas o niveles de carga contaminante.

2. Limitación geográfica y contextual

La unidad piloto fue instalada en un entorno urbano específico de la ciudad de Guayaquil, más específicamente en un hogar común, con condiciones particulares de temperatura, humedad, infraestructura sanitaria y características sociales

- **Implicaciones:** Esto podría impactar en la capacidad del estudio para ser extrapolado a otros contextos, dado que los resultados no pueden ser exportados automáticamente a zonas rurales o con diferente régimen hídrico, sin realizar ajustes técnicos.

- **Posible mejora:** La realización de estudios comparativos en otras regiones, alianzas institucionales y fondos externos permitirá implementar versiones más completas del sistema, con mayor capacidad de control en caso de ser posible.

3. Recursos técnicos, logísticos y financieros limitados

La conducción de esta investigación se llevó a cabo mediante con los recursos materiales y financieros reducidos, tanto para la construcción del sistema como para la obtención de materiales de laboratorio y equipos de medición. Así como la limitada cantidad de reactivos por la cual no se podía hacer más pruebas.

- **Implicaciones:** Esta limitación pudo restringir el número de muestras analizadas, la frecuencia de monitoreo, y el uso de tecnologías complementarias como sondas digitales o software de automatización.
- **Posible mejora:** La versión de infraestructura, alianzas externas y fondos externos permitirá la implementación de versiones mejoradas y más completas del sistema, logrando así un mayor control, medición y escalabilidad.

4. Variabilidad en la composición de las aguas grises

Las aguas grises son cuerpos líquidos heterogéneos cuya composición varía ampliamente según su fuente de origen ya sean lavamanos, duchas, lavadoras, cocinas. El uso de productos de limpieza, los hábitos de consumo y la frecuencia de uso del sistema también es un factor a considerar al momento de tener en cuenta los tipos de desechos.

- **Implicaciones:** la variabilidad influye en los niveles de contaminantes como la materia orgánica, metales pesados, sólidos suspendidos, microorganismos afectando las características del agua.
- **Posible mejora:** La separación de flujos, o la caracterización previa de las aguas por categoría, permitirá establecer curvas de eficiencia del sistema filtrante.

5. Influencia de factores climáticos y ambientales

Dado que el sistema piloto estuvo expuesto a condiciones ambientales reales, factores como lluvias intensas, altas temperaturas, vientos o sequías pueden alterar el comportamiento hidráulico del sistema, el crecimiento de las plantas o la eficacia del proceso de depuración.

- **Implicación:** Estos eventos pueden generar picos de dilución, sobresaturación o estrés vegetal, alterando los parámetros analizados (por ejemplo, disminución aparente de DBO₅ por efecto de dilución).
- **Posible mejora:** La implementación de techos parciales, sistemas de drenaje o válvulas de regulación permitiría mitigar estos efectos y mejorar la operación continua del sistema.

6. Escala reducida del sistema

La investigación se realizó a escala piloto, lo cual es apropiado para estudios exploratorios, pero no refleja completamente los desafíos técnicos, sociales y logísticos que implica la implementación de estos sistemas a escala comunitaria o urbana.

- **Implicación:** Aspectos como el mantenimiento a largo plazo, la aceptación social, los costos de operación o los requisitos normativos no fueron abordados en su totalidad.
- **Posible mejora:** Se recomienda realizar estudios complementarios de tipo socioeconómico o técnico-normativo para evaluar la viabilidad real de escalamiento.

7. Acceso restringido a tecnologías de monitoreo continuo

Por restricciones presupuestarias, no fue posible incorporar sensores automatizados o plataformas de monitoreo en tiempo real que permitieran observar cambios instantáneos en parámetros clave como el pH, oxígeno disuelto o turbidez.

- **Implicación:** Esto limitó el seguimiento en tiempo real del sistema y obligó a depender

exclusivamente de muestreos puntuales y análisis de laboratorio, con menor resolución temporal.

- **Posible mejora:** La incorporación futura de sensores o estaciones meteorológicas podría ofrecer información en línea sobre el desempeño dinámico del sistema.

8. Consideraciones y normativas limitadas

Si bien se tomaron como referencia valores guía nacionales de calidad de agua, la legislación ecuatoriana respecto al saneamiento de aguas, la legislación ecuatoriana en torno al tratamiento de aguas grises aun es incipiente, lo cual dificulta establecer comparaciones normativas solidas o recomendaciones regulatorias específicas.

- **Implicación:** La falta de una normativa robusta sobre la recirculación de aguas grises en Ecuador puede dificultar la instauración legal del sistema a escala real
- **Posible mejora:** Se sugiere promover estudios normativos y colaborar con entes regulatorios para fortalecer el marco legal y técnico en este ámbito.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Descripción del problema piloto

Durante las tres semanas de operación del sistema de tratamiento, se recolectaron muestras de cada uno de los cuatro tanques del sistema para analizar la evolución de parámetros clave: pH, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales (STS), turbidez, color y olor.

Se implementaron filtros caseros intermedios entre tanques, y se ajustaron las proporciones de mezcla con agua limpia en la etapa 2, lo cual permitió reducir la carga química del agua inicial y preservar la salud de las plantas.

A continuación, se muestran los resultados estructurados en cuadros y tablas técnicas.

4.2. Valores técnicos de parámetros por tanque

Además de las mediciones cuantitativas, se registraron observaciones cualitativas sobre el aspecto, olor y comportamiento del agua tratada:

Tanque	Etapas	pH (24 °C)	DQO (% vol.)
Tanque 1	Entrada (agua gris)	7.8 – 8.0	> 2.5
Tanque 2	Filtro intermedio	7.4 ± 0.03	~1.13
Tanque 3	Vegetación / biofiltración	7.38 ± 0.08	< 0.1
Tanque 4	Pulido / salida final	7.25	< 0.05

Fuente: 9 Autores Núñez & Tenezaca

4.2.1. Observaciones técnicas cualitativas

Observación técnica
Alta carga orgánica, espuma, olor fuerte, gris oscuro
Reduccion parcial de solidos, olor menor, muy poca espuma, mas transparentosa
Agua clara, sin olores perceptibles, mejor transparencia
Agua sin olor ni turbidez visible, lista para reúso

Fuente: 10 Autores Núñez & Tenezaca

Como se puede apreciar en las representaciones de pH y DQO por tanque. Esta figura muestra el descenso progresivo de los valores de pH y DQO conforme el agua avanza en el tratamiento desde el tanque 1 hasta el tanque 4, evidenciando la mejora en la calidad del agua. El tanque dos presentaba un descenso importante gracias al filtro artesanal así mismo el tanque tres presentaba un descenso del pH en las muestras realizadas

4.3. Análisis técnico de la DBO

Tanque	Etapa	DBO (mg/L)	Reducción acumulada (%)
Tanque 1	Entrada (agua gris)	182.6	—
Tanque 2	Filtro intermedio	90.56	50.40%
Tanque 3	Vegetación / biofiltración	42.93	76.4%
Tanque 4	Pulido / salida final	22.33	87.77%

Fuente: 11 Autores: Núñez & Tenezaca

La eficiencia total fue de un 87.77% una cifra destacable para una planta piloto de bajo costo. La mayor reducción se produjo en el tramo de vegetación (Tanque 2 a Tanque 3). Cabe destacar que el uso de los filtros caseros permitió descender más rápido y eficientemente las cifras en algunos parámetros.

4.4. Evolución de los parámetros observables

Tanque	Color	Olor	Presencia de espuma	Observación de claridad
Tanque 1	Gris oscuro	Fuerte	Alta	Muy baja
Tanque 2	Gris transparentoso	Moderado	Baja	Media
Tanque 3	Casi transparente	Muy leve	Muy baja a nula	Media-alta
Tanque 4	Transparente	Inexistente	Nula	Alta

Fuente: 12: Autores Núñez & Tenezaca

Estas observaciones coinciden con la disminución de STS y DBO, validando el impacto positivo de cada fase del sistema.

4.5. Influencia de las condiciones ambientales

Durante el período experimental, se alternaron días soleados y nublados. Se observó que en días soleados la actividad fotosintética de las plantas aumentaba, generando una mayor oxigenación del sistema. Esto favoreció la claridad y reducción de olores. Sin embargo, incluso en días nublados el sistema se mantuvo estable gracias a la estructura de filtración en serie y la oxigenación mecánica en el Tanque 2. El sol también favoreció el crecimiento exponencial de la lenteja de agua la cual triplicó su cantidad en aproximadamente una semana y media, por lo que se tuvo que hacer control en su población, también generó variaciones en la temperatura de los tanques. También había variaciones de temperatura entre los días soleados y nublados generando ciertas variaciones en la temperatura de las muestras.

4.6. Validación del sistema en pequeña escala

Durante la primera semana se realizaron ajustes importantes que permitieron estabilizar el sistema: la alcalinidad inicial del agua generó un impacto negativo sobre las plantas

macrófitas, lo que condujo a implementar filtros intermedios tipo botella entre los tanques. Estas unidades caseras contenían materiales filtrantes específicos que ayudaron a reducir la carga de detergentes.

Además, tras evaluar el comportamiento del agua en el tanque 3, se concluyó que aún era necesario mejorar la calidad visual del efluente. Por esta razón, se agregó un cuarto tanque con función de filtrado final. Gracias a estas modificaciones progresivas, realizadas mediante observación práctica, se alcanzaron resultados satisfactorios tanto en reducción de carga orgánica como en claridad del agua. Esto reafirma la capacidad de adaptación del sistema y su validez como modelo funcional a escala doméstica.

4.7. Consideraciones de sostenibilidad

El inicio de operaciones de un sistema para el tratamiento de aguas grises a través de filtros físicos y plantas macrófitas representa una alternativa Sostenible desde las perspectivas ambiental y económica. Este proyecto busca aprovechar recursos que comúnmente se desperdician, como el agua residual doméstica de baja carga orgánica, y transformarlos en insumos reutilizables para riego o limpieza. En un contexto urbano como el de Guayaquil, donde el crecimiento poblacional y la presión sobre el recurso hídrico son cada vez mayores, el reaprovechamiento del agua representa una estrategia clave para la gestión sostenible del entorno urbano y la conservación de los ecosistemas locales.

Una de las fortalezas del sistema diseñado radica en el uso de materiales reciclados y de bajo costo. Los filtros intermedios fueron fabricados a partir de botellas plásticas reutilizadas y rellenos con capas de plumón, nanofibras, carbón activado y grava, todos ellos accesibles y no contaminantes. Esto no solo reduce los costos de implementación, sino que

además fomenta la reutilización de residuos sólidos, cerrando parcialmente el ciclo de desechos. La simplicidad del sistema también facilita su réplica a nivel comunitario, permitiendo que personas con pocos recursos puedan implementar soluciones caseras de saneamiento ambiental sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.

Por otro lado, el uso de plantas macrófitas locales, como el papiro (*Cyperus papyrus*), el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna minor*), no solo contribuye al proceso de depuración del agua mediante absorción de nutrientes y materia orgánica, sino que además promueve la restauración ecológica y la biodiversidad urbana. Estas especies no requieren mantenimiento complejo, se adaptan fácilmente al clima tropical húmedo de la región, y tienen un crecimiento rápido que favorece su reproducción en sistemas de bajo flujo.

En términos educativos, este tipo de proyecto tiene un gran potencial para ser aplicado en escuelas, universidades, centros comunitarios y viviendas urbanas, fomentando la conciencia ambiental y el aprendizaje práctico sobre tratamiento de aguas residuales. Promueve valores como la autosuficiencia, la consideración hacia los recursos naturales y la innovación sostenible, aportando así Para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6, relacionado con el acceso a agua limpia y saneamiento, y el ODS 12, enfocado en la producción y el consumo responsables.

En conjunto, este modelo de depuración de aguas grises no únicamente atenúa los efectos adversos sobre el medio ambiente, sino que también representa una herramienta efectiva de adaptación frente al cambio climático, la escasez hídrica y la disparidad en la disponibilidad de agua en sectores urbanos. Su bajo costo, facilidad de implementación y alto impacto lo convierten en una alternativa viable para promover ciudades más resilientes, circulares y sostenibles

CONCLUSIONES

- El sistema de tratamiento a base de plantas macrófitas y filtros físicos resultó efectivo para la depuración de aguas grises. A lo largo del proceso, se logró una reducción estimada del 87.77% de la DBO y una mejora progresiva en parámetros como pH, turbidez, sólidos totales y olor. El uso combinado de filtración y biofiltración vegetal permitió mejorar significativamente la calidad del agua sin necesidad de productos químicos ni equipos costosos.
- La implementación de filtros caseros intermedios fue clave para estabilizar el sistema. Al enfrentar un pH inicial elevado y cargas químicas provenientes del agua de lavadora, se adaptaron botellas con materiales filtrantes (plumón, nanofibras, carbón activado, grava) que permitieron disminuir la dureza del agua antes de que esta llegara a las plantas, garantizando su supervivencia y desempeño.
- Las plantas seleccionadas cumplieron eficientemente su función biofiltrante. El lechuguín, la lenteja de agua y el papiro mostraron adaptabilidad, crecimiento estable y buena tolerancia al entorno, contribuyendo a la remoción de materia orgánica, nutrientes y partículas suspendidas. Además, mejoraron la apariencia visual del sistema y demostraron ser una solución estética y ecológica.
- El sistema demostró viabilidad técnica y operativa a pequeña escala. Su bajo costo, facilidad de montaje, uso de materiales accesibles y mínima demanda de mantenimiento lo convierten en una opción aplicable a viviendas, instituciones educativas, comunidades rurales o zonas periurbanas sin infraestructura de saneamiento adecuada.
- Este tipo de tratamiento contribuye con el fin de gestionar el agua de manera más sostenible. Al permitir el reúso del agua depurada destinada a riego, limpieza o vertido

controlada, se reduce la presión sobre el agua segura, se fomenta la conciencia ambiental y se promueve un enfoque de economía circular en el uso del agua doméstica.

RECOMENDACIONES

- Escalar el sistema hacia entornos reales con monitoreo más riguroso. Se recomienda implementar este diseño en viviendas o instituciones educativas con uso continuo de agua gris, y realizar análisis de laboratorio más precisos de DBO, DQO y bacteriología para validar los resultados a largo plazo.
- Establecer protocolos de mantenimiento para los filtros y las plantas. Aunque el sistema es de bajo mantenimiento, es importante establecer una frecuencia de revisión, limpieza y reemplazo de materiales filtrantes (plumón, grava, carbón activado), así como monitorear la salud de las plantas para evitar su sobrepoblación o descomposición.
- Incorporar un sistema de almacenamiento del agua tratada. Para facilitar su reúso, se recomienda añadir un tanque de almacenamiento al final del sistema, que permita acumular el agua depurada de forma segura y distribuirla según las necesidades del usuario (riego, descarga de sanitarios, limpieza de exteriores).
- Fomentar su uso como herramienta educativa. Dado su valor demostrativo y ecológico, este sistema puede ser utilizado en escuelas, colegios técnicos o comunidades para sensibilizar sobre el tratamiento del agua, la preservación ambiental y el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos.
- Incluir mejoras estructurales para condiciones climáticas extremas. En futuras implementaciones, se sugiere considerar coberturas o estructuras que protejan las plantas del exceso de sol, lluvia o contaminación externa, con el fin de garantizar su estabilidad en diferentes épocas del año.

- Para mejorar el control de algas microscópicas y los microorganismos se puede implementar una cámara de luz ultra violeta que se encargue de la respectiva eliminación.

Bibliografía

- Carrión C., Ligia; Cuenca L., Numan; Ansaloni, Raffaella. (2009). *Bioensayo con macrófitas acuáticas para el tratamiento de lixiviados procedentes del relleno sanitario de Pichacay*. Obtenido de Universidad del Azuay – DSpace: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/2982/1/07569.pdf>
- Badger Meter. (s.f). *Control del nitrógeno en las aguas residuales*. Obtenido de Control del nitrógeno en las aguas residuales: <https://www.badgermeter.com/es-us/blog/control-del-nitrogeno-en-las-aguas-residuales/>
- Candelaria Tejada-Tovar, Á. V.-O.-J. (26 de 10 de 2014). *Adsorción de metales pesados en*. Obtenido de Adsorción de metales pesados en: <file:///C:/Users/shockwave/Downloads/Dialnet-AdsorcionDeMetalesPesadosEnAguasResidualesUsandoMa-5062883.pdf>
- Ceballos, A. L. (6 de mayo de 2020). *Las plantas acuáticas y la depuración del agua*. Obtenido de Las plantas acuáticas y la depuración del agua: <https://arboretoluisceballos.blogspot.com/2020/05/las-plantas-acuaticas-y-la-depuracion.html>
- Compostando Ciencia. (septiembre de 20 de 2015). *¿Cómo asimilan el nitrógeno las plantas?* Obtenido de ¿Cómo asimilan el nitrógeno las plantas?: <https://www.compostandociencia.com/2015/09/como-asimilan-el-nitrogeno-las-plantas/>
- Condorchem Envitech. (S.f). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Obtenido de Tratamiento biológico de aguas residuales: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
- Floresyplantas. (09 de 11 de 2017). *Plantas macrófitas*. Obtenido de Plantas macrófitas: <https://www.floresyplantas.net/plantas-macrofitas/>
- Hidropluviales. (19 de enero de 2021). *Humedales artificiales para tratar el agua*. Obtenido de Humedales artificiales para tratar el agua: <https://hidropluviales.com/2021/01/19/humedales-artificiales-para-tratar-el-agua/>
- Ikrema Hassan, S. R. (27 de 10 de 2021). *Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales: tendencias actuales y potencial futuro*. Obtenido de Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales: tendencias actuales y potencial futuro: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/11/1917?>
- Jenkins, M. (04 de 2020). *Ciudad Esponja*. Obtenido de Shenzhen explora los beneficios de proyectar con la naturaleza: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.lincolninst.edu/app/uploads/legacy-files/pubfiles/ciudad-esponja-200404sp.pdf>
- Leticia Y. Kochi, L. Y. (05 de 11 de 2020). *Macrófitos acuáticos en humedales artificiales: una lucha contra la contaminación del agua*. Obtenido de Macrófitos acuáticos en humedales artificiales: una lucha contra la contaminación del agua: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/9202>
- Nieto, N. (22 de 06 de 2011). *Políticas públicas y cambio climático*. Obtenido de La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422011000200007
- ONU . (22 de 03 de 2021). *Comprender las dimensiones del problema del agua*. Obtenido de Comprender las dimensiones del problema del agua: <https://onu-habitat.org/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>
- PlantRight. (s.f). *Eichhornia crassipes (water hyacinth)*. Obtenido de PlantRight: <https://plantright.org/invasive/eichhornia-crassipes/>
- Rodríguez, J. J. (2 de Julio de 2018). *Introducción a los humedales artificiales como tratamiento de las aguas residuales*. Obtenido de iAgua: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/introduccion-humedales-artificiales-como-tratamiento-aguas-residuales>
- Sposob, G. (10 de 03 de 2025). *Recursos hídricos*. (Etece) Recuperado el 05 de 09 de 2025, de <https://concepto.de/recursos-hidricos/>
- Todoagua.es. (16 de 07 de 2022). *Qué son las aguas grises*. Obtenido de Qué son las aguas grises: <https://www.todoagua.es/que-son-aguas-grises/>

Zarza, L. F. (s.f.). *¿Qué son las aguas grises?* Obtenido de ¿Qué son las aguas grises?:
<https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-grises>

ANEXOS



Ilustración 1 Nuñez & Tenezaca tanque dos con su respectivo filtro



Ilustración 2 Núñez & Tenezaca tanques con sus respectivos filtros



Ilustración 3 Nuñez & Tenezaca filtro casero compuesto filtrando



Ilustración 4 Núñez & Tenezaca preparación de los tanques



Ilustración 5 Núñez & Tenezaca Concepto descartado de los tanques



Ilustración 6 Núñez & Tenezaca concepto previo al tanque



Ilustración 7 Nuñez & Tenezaca Medición de pH previos a los realizados en laboratorio