

**Diseño de un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales
domésticas de una vivienda sin sistema de alcantarillado**

Leidy Johana Moreno Henao

Asesor

Carlos Guillermo Mesa Mejía

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

2023

Esta página opcional

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Resumen

Este trabajo propone el diseño de un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda localizada en la vereda Ambalá, municipio de Ibagué, departamento del Tolima, con el propósito de reducir el impacto ambiental generado por descargas de agua residual a los afluentes de la zona. Para brindar una solución a la problemática identificada se requiere implementar procesos de innovación biotecnológica que pueda adaptarse a las condiciones económicas, sociales y técnicas de los diferentes sectores rurales de Ibagué. El diagnóstico inicial del proyecto requiere realizar salidas de campo al área de estudio de la vivienda para calcular el uso del recurso hídrico utilizado por las labores domésticas como lavado de ropa, cocina, baño y demás. Teniendo en cuenta que la biofiltración es un tratamiento alternativo adaptable a cualquier escala para la remediación de aguas contaminadas de acuerdo a las necesidades de cada vivienda, se procede a calcular y diseñar las fases y componentes necesarios del filtro biológico.

Se analiza las ventajas y desventajas del uso del bíofiltro en comparación con otros métodos de tratamiento de aguas residuales. Se evalúan aspectos de eficiencia de remoción de contaminantes y se establecen los procesos de tratamientos más adecuados, como un pretratamiento se propone la instalación de una trampa de grasas para las aguas grises, continuo a este, el humedal artificial de flujo subsuperficial que recibe las aguas proveniente del pretratamiento y las aguas negras de la vivienda, adicional se plantea la instalación de un tanque de maduración o tanque de almacenamiento con la intención de reforzar la fitorremediación, además controla el flujo de salida.

La selección de especies para la filtración biológica es definido por la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y contaminantes, así como la capacidad de los microorganismos

para degradar y eliminar las sustancias indeseables, se optó por la elección del papiro (*Cyperus Papyrus*) como planta emergente para el humedal artificial demostrando remociones del 96% en DBO5 y DQO, 55% de sólidos suspendidos totales y 99% en Coliformes fecales, la lenteja de agua (*lenna minor*) y Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como plantas flotantes para el tanque de almacenamiento, garantizan remociones del 87% de DBO5, 76 % de DQO y 95% de SST, la sinergia de este sistema propuesto permite aumentar el porcentaje de remociones esperadas.

El diseño hidráulico del sistema de biofiltración requeridos para llevar a cabo el proceso de depuración de las aguas residuales domésticas, se realiza teniendo en cuenta factores como el consumo de agua mensual de la vivienda, el caudal de aguas residuales, las dimensiones del sistema, los materiales de construcción, los requerimientos de mantenimiento, la capacidad de tratamiento y la disposición final de efluente.

Palabras clave: Bíofiltro, Aguas residuales domésticas (ARD), Trampa de grasas, Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS),

Abstract

This study proposes the design of a biofilter system for treating domestic wastewater in a household located in the rural area of Ambalá, Ibagué, Tolima department. The primary objective is to mitigate the environmental impact caused by wastewater discharges into local water bodies. To address this issue, the implementation of biotechnological innovations adaptable to the economic, social, and technical conditions of rural areas in Ibagué is necessary.

An initial project assessment requires field visits to the study area to calculate water consumption for domestic activities such as laundry, cooking, and bathing. Recognizing that biofiltration is a versatile treatment method suitable for various scales and capable of remediating contaminated water based on individual household needs, the necessary phases and components of the biological filter are calculated and designed.

The advantages and disadvantages of biofilters compared to other wastewater treatment methods are analyzed. The efficiency of contaminant removal is evaluated, and the most suitable treatment processes are determined. A pretreatment stage involving a grease trap for greywater is proposed, followed by a subsurface flow constructed wetland that receives both pretreated water and blackwater. Additionally, a maturation pond or storage tank is suggested to enhance phytoremediation and control outflow.

The selection of plant species for biological filtration is based on their ability to absorb nutrients and contaminants, as well as the capacity of microorganisms to degrade and eliminate undesirable

substances. Papyrus (*Cyperus papyrus*) was chosen as an emergent plant for the constructed wetland, demonstrating removals of 96% for BOD5 and COD, 55% for total suspended solids, and 99% for fecal coliforms. Duckweed (*Lemna minor*) and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) were selected as floating plants for the storage tank, ensuring removals of 87% for BOD5, 76% for COD, and 95% for TSS. The synergy between these plants enhances the overall removal efficiency.

The hydraulic design of the biofiltration system, necessary for domestic wastewater treatment, considers factors such as monthly household water consumption, wastewater flow rate, system dimensions, construction materials, maintenance requirements, treatment capacity, and final effluent disposal.

Keywords: Biofilte, Domestic wastewater (DWW), Grease trap, Subsurface flow constructed wetland (SFCW)

Tabla de contenido

Introducción	13
Descripción del problema	15
Planteamiento del problema.....	16
Sistematización del problema	18
Justificación	19
Objetivos	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos.....	22
Marco de referencia	23
Estado del arte.....	23
Marco contextual	24
Marco teórico.....	25
Marco conceptual.....	43
Marco normativo.....	58
Metodología	60
Método	60
Tipo de estudio.....	60
Alcance de la investigación	61
Población objetivo	61
Vivienda de estudio.....	61
Recolección de datos.....	62
Fase 1: caracterización y parámetros del biofiltro	62

Fase 2: Selección de especies para la filtración biológica.	63
Fase 3: Diseño hidraulico del sistema de biofiltros y aspectos técnicos de construcción y operación del humedal	63
Resultados	65
Primer resultado	65
Caracterización de aguas residuales domesticas	65
Parametros del diseño	67
Segundo resultado	76
Tercer resultado	79
Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFS)	79
Diseño de Trampa de grasas	82
Aspectos técnicos de construcción y operación del humedal	84
Aspectos tenicos de la Trampa de Grasas	85
Tanque de almacenamiento.....	87
Conclusiones	89
Recomendaciones	90
Referencias bibliográficas.....	92
Apéndices.....	101

Lista de tablas

Tabla 1. Especies de plantas macrófitas emergentes típicas de zonas húmedas	25
Tabla 2. Macrófitas flotantes más destacas (Ly, 2007) como se citó en Núñez (2016) ..	27
Tabla 3. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas	28
Tabla 4. Parametros fisico-quimicos y microbiologicos antes y despues del tratamiento mediante el sistema de HAFSS.....	29
Tabla 5. Consumo de agua al día por persona aproximado según el acuerdo 84 de 201030	
Tabla 6. Dotación neta por habitante según la altura del nivel de mar de la zona atendida	31
Tabla 7. Coeficiente de retorno aguas residuales domesticas	31
Tabla 8. Unidades de gasto de los aparatos sanitarios que descargan a la trampa de grasa.	32
Tabla 9. Ficha técnica trampa de grasas	33
Tabla 10. Tiempo de retencion hidrulica	35
Tabla 11. capacidades de retención de grasas.....	36
Tabla 12. Ficha técnica de HAFSS	39
Tabla 13. Rendimientos típicos de los humedales de flujo subsuperficial	42
Tabla 14. Rendimiento típico del humedal artificial de flujo subsuperficial	47
Tabla 15. Características medias de los afluentes y efluentes de un conjunto de 27 humedales artificiales de flujo superficial sometidos a seguimiento	48
Tabla 16. Funciones de las plantas en sistemas de tratamientos acuáticos	51

Tabla 17. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas.....	65
Tabla 18. Respuesta de la encuesta por el número de habitantes de la vivienda.....	67
Tabla 19. Consumo de agua en la vivienda estudio.....	71
Tabla 20. Extensión redicular de las plantas emergentes.....	74
Tabla 21. Eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales.....	76
Tabla 22. Plantas macrófitas seleccionadas para el HAFSS.....	78
Tabla 10. Tiempo de retencion hidrulica.....	87

Lista de figuras

Figura 1 Trampa de Grasas ficha tecnica.....	34
Figura 2 Humedal Artificial.....	40
Figura 3. Humedal Artificial.....	46
Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial	46
Figura 5. Humedal artificial de flujo superficial.....	48
Figura 6. Humedal de flujo vertical	49
Figura 7. Reacciones de microorganismos presentes por especie	56
Figura 8. Trampa de grasas.....	57
Figura 9. <i>Tanque de almacenamiento</i>	57
Figura 10. Sistema de bíofiltro: trampa de grasas, humedal artificial y tanque de almacenamiento	58
Figura 11. Proceso Metodológico.....	64
Figura 12 <i>Esquema del sistema propuesto</i>	88

Lista de apéndices

Apéndices A. Encuesta.....	101
Apéndices B. Estado de las aguas residuales de la vivienda.....	103
Apéndices C. Vista unidad sanitaria y lavadero de la vivienda	104
Apéndices D. Vivienda estudio	105

Introducción

El tratamiento de aguas residuales ha incrementado debido a la implementación de la normatividad que rige los vertimientos de aguas contaminadas. En este caso, el aumento demográfico y la expansión de la urbanización representa un aumento notable en la generación de aguas residuales. Según Alferes y Nieves (2019) la falta de infraestructura adecuada provoca que las aguas negras y grises terminan siendo vertidas directamente al medio ambiente, lo que contamina ríos, lagos y fuentes de agua subterránea. Las consecuencias de esto se traducen en una disminución drástica de la calidad del agua para consumo humano y para la vida acuática.

Muñoz y Vázquez (2018) señalan que, la biofiltración se presenta como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales, al ofrecer una solución tecnológica que imita los procesos naturales de depuración. Esta tecnología, al aprovechar la biomasa microbiana, contribuye a la reducción del impacto ambiental y promueve la sostenibilidad. La investigación en biofiltración no solo permite avanzar en el conocimiento científico, sino que también impulsa la innovación en el sector ambiental, fomentando el desarrollo de soluciones más eficientes y adaptadas a las necesidades locales.

El objetivo de este estudio es diseñar un sistema de biofiltración para depurar las aguas residuales de una vivienda sin sistema de alcantarillado público, debido a que existen muchas áreas rurales que carecen de cobertura de alcantarillado y saneamiento básico, por lo cual es necesario buscar alternativas para tratar y gestionar adecuadamente las aguas residuales domésticas. Si estas aguas no se tratan correctamente, pueden provocar graves problemas sanitarios y ecológicos poniendo en riesgo la calidad de los recursos hídricos.

Fernandez (2004) indica que para que un diseño de biofiltración sea efectivo, es necesario tener un buen conocimiento sobre su funcionamiento y mantenimiento. Esto implica la necesidad

de capacitación adecuada tanto para los propietarios de la vivienda como para los instaladores y los encargados de garantizar el correcto mantenimiento, se debe tener en cuenta que el bíofiltro puede generar olores desagradables y atraer plagas si no se maneja adecuadamente, para esto se deben implementar medidas de control y manejo para garantizar un entorno saludable y libre de olores indeseables. También se debe tener en cuenta que un diseño de biofiltración así sea a baja escala requiere de espacio adecuado para su instalación. En viviendas con limitaciones de espacio o terrenos no adecuados, puede ser difícil implementar este tipo de sistemas correctamente.

Este estudio busca evaluar la eficacia de los bíofiltros en la depuración de contaminantes en aguas servidas de viviendas como una opción viable para la limpieza de dichas aguas. También identificar y seleccionar las especies de plantas y microorganismos más adecuados para llevar a cabo la filtración biológica en el bíofiltro. Además, se pretende diseñar un sistema de biofiltración para el tratamiento de las aguas residuales de una finca que no cuenta con sistema de alcantarillado ni una forma adecuada de disposición final de estas aguas.

Descripción del problema

Muñoz y Vásquez (2018) afirman que el saneamiento básico alternativo de los desechos líquidos provenientes de hogares rurales que carecen de estructuras de alcantarillado público brinda una solución no convencionales que puedan ser ajustables a diferentes escalas para proporcionar una solución a la problemática de falta de servicios públicos vitales como lo son el acueducto y alcantarillado, esto para poder garantizar una disposición final adecuada de dichas aguas resultantes, estas aguas residuales están compuestas por dos tipos de salida de agua contaminada en cada vivienda, la primera son las aguas grises derivadas de los lavaderos, lavadoras, duchas, lavaplatos y grifos. La segunda son las aguas negras contaminadas con heces y orina proveniente de las cisternas.

El informe del Centro de Información Municipal para la Planeación Participativa (CIMPP, 2021) evidencia una brecha significativa en la cobertura de servicios de saneamiento en las zonas rurales de Ibagué, donde solo el 40% de la población cuenta con sistemas adecuados para el tratamiento de aguas residuales.

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2017) como consecuencia de esta problemática se genera un constante vertimiento de patógenos al exterior de las viviendas veredales, contribuyendo a la contaminación del medio ambiente como los ecosistemas del suelo y de afluentes hídricos cercanos, lo cual, a su vez afecta directamente la salud pública de las mismas comunidades pues se desencadenan focos de infección y ambientes desagradables con malos olores propicios para la proliferación de microorganismos e insectos vectores de enfermedades, lo que representa un serio peligro para la salud pública.

Planteamiento del problema

Muñoz y Vásquez (2018) demuestran que un sistema de biofiltración de saneamiento básico para aguas residuales domésticas, en viviendas sin sistema de alcantarillado público ni pozo séptico ofrece implementar una filtración no convencional que puede ser ajustable a diferentes escalas para proporcionar una solución a la problemática de falta de servicios públicos de alcantarillado, lo cual garantizaría una disposición adecuada de dichas aguas resultantes del uso doméstico y metabolismo humano.

Según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2023), la deficiencia de este servicio es un problema global que abarca los 135 países participantes en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluyendo a Colombia y el resto de América Latina y el Caribe, el monitoreo deja en evidencia un rezago considerable en el avance hacia los objetivos de saneamiento seguro a nivel global, requiriendo un incremento de cinco veces en el ritmo de progreso para alcanzar las metas establecidas.

La Organización de Naciones Unidas (ONU, 2018) ha situado el acceso al agua potable y saneamiento en el centro de la Agenda 2030, reconociendo su carácter fundamental para el desarrollo humano. Sin embargo, la creciente escasez hídrica y la contaminación de las fuentes de agua exigen acciones urgentes. En este contexto, el tratamiento adecuado de aguas residuales se erige como una solución indispensable para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y mejorar la calidad de vida de millones de personas.

Para Colombia, la falta de acceso a sistemas de saneamiento básico persiste como una cuestión latente, vulnerando la calidad de vida de comunidades enteras. En la vereda Ambalá Parte Alta de la ciudad de Ibagué, del departamento del Tolima se manifiesta un escenario que refleja los desafíos mencionados. Encontrándose viviendas que carecen de sistemas de alcantarillado ni

pozo séptico, lo que genera una problemática localizada de descargas de aguas residuales urbanas sin tratamiento.

la Procuraduría General de la Nación (PGN, 2022) ha encendido las alarmas sobre la grave crisis sanitaria que enfrenta Ibagué debido a la proliferación de acueductos informales que suministran agua no potable en la ciudad y sus alrededores con más de 73 acueductos complementarios, aproximadamente 36 acueductos en la zona urbana y 37 en la zona rural. muchos de los cuales operan sin cumplir con las normas sanitarias. Ante esta problemática, la Procuraduría ha instado a la Alcaldía, a la Empresa Ibaguereña De Acueducto Y Alcantarillado IBAL y a la Corporación Autónoma Regional Del Tolima Cortolima a tomar medidas drásticas contra aquellos acueductos que ponen en riesgo la salud pública al suministrar agua no potable y gestionar inadecuadamente las aguas servidas.

La vivienda de estudio está localizada en la vereda de Ambalá la cual conecta la ciudad con los cerros noroccidentales en donde se encuentran ubicadas diferentes tipos de viviendas y fincas en etapas productivas como cultivos y ecoturismo, en un corredor ecológico que abarca hasta la vereda de China Alta con un tramo de aproximadamente 24 kilómetros en donde se realizan vertimientos de agua residual que afectan directamente la estructura del ecosistema y la vida de la microcuenca de la quebrada Ambalá que surte al acueducto de la asociación de acueducto y alcantarillado del barrio Ambalá Acuambalá.

Al presenciar esta problemática identificamos la siguiente pregunta generadora que nos permitirá desarrollar el presente trabajo:

¿un sistema de biofiltración aporta una solución para el tratamiento de aguas residuales domesticas de una vivienda sin sistema de alcantarillado público de la vereda Ambalá, del municipio de Ibagué?

Sistematización del problema

Para la realización de la investigación de manera pertinente se procede a la elaboración de los siguientes interrogantes con el fin de establecer la información en forma secuencial para lograr el resultado esperado.

¿Qué alternativas existen para el tratamiento de aguas residuales de viviendas ubicadas fuera de la red de alcantarillado, considerando diferentes niveles de complejidad, eficiencia y costo?

¿Qué tipos de sistema de biofiltración son más adecuados para la remediación del agua contaminada domestica considerando las características específicas del agua y los objetivos del tratamiento?

¿Qué aspectos económicos, sociales y ambientales deben considerarse al implementar un sistema de biofiltración a nivel doméstico?

¿Qué medidas podemos adoptar para ser más eficientes el sistema de biofiltración en función de diferentes tipos de aguas residuales de una vivienda?

¿Qué medidas de control y monitoreo son necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de biofiltración y el agua tratada?

¿Qué factores deben considerarse al realizar el análisis de costo beneficio de un proyecto de tratamiento de aguas residuales, incluyendo aspectos económicos sociales y ambientales?

Justificación

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO, 2019) ha reconocido formalmente el acceso universal al agua potable y saneamiento como un derecho humano inalienable. Este reconocimiento subraya la interdependencia entre este derecho y otros fundamentales, como la salud, la dignidad y un entorno saludable. La provisión de agua potable y saneamiento seguro, reconocida como un derecho humano fundamental, es un factor clave para mejorar la salud, reducir la pobreza y promover el desarrollo sostenible. Este derecho no solo beneficia a las personas a nivel individual, sino que también contribuye al bienestar de las comunidades y del planeta.

El uso eficiente del agua y el tratamiento adecuado de las aguas residuales protegen los recursos hídricos priorizando la conservación de los ecosistemas acuáticos como los humedales, lagos, ríos y los ecosistemas como los páramos que cumplen un rol crucial en la captación y retención del agua, siendo fuente de gran parte del agua dulce de Colombia.

Orozco et al. (2017) mencionan que los suelos del páramo almacenan aproximadamente el 80% del agua de Colombia. En estos ecosistemas nacen casi todos los ríos del país. Lagunas, charcos y extensos tapetes de musgo se extienden por el suelo, capturando la humedad del ambiente y reteniendo el agua de las lluvias, que luego baja libre por las laderas de las montañas formando incontables ríos y quebradas de agua dulce.

Las aguas residuales son un conjunto de desechos líquidos que han sido utilizadas en diferentes actividades y que, como resultado, contienen diversos contaminantes.

Un estudio de la UNESCO revela que un preocupante 80% de las aguas residuales generadas a nivel mundial son vertidas sin tratamiento alguno en ríos, lagos y océanos, agravando la contaminación hídrica y poniendo en riesgo la salud de los ecosistemas acuáticos, estas aguas

pueden provenir de diferentes fuentes, las cuales se clasifican en cuatro categorías principales: en el ámbito doméstico, las aguas residuales provienen de nuestros hogares, cargadas de materia orgánica, nutrientes y patógenos que, sin un proceso adecuado, pueden ser un peligro para la salud colectiva y deteriora los ecosistemas. En el sector industrial, las aguas residuales son tan variadas como las industrias mismas. Desde textiles hasta químicas, cada actividad aporta su particular carga de contaminantes, incluyendo metales pesados, sustancias químicas y otros elementos que requieren un tratamiento especializado. La agricultura, fuente de alimento para la humanidad, también genera aguas residuales con una alta concentración de compuestos orgánicos, nutrientes y agroquímicos. Su manejo inadecuado puede disminuir la calidad del agua y los suelos, poniendo en riesgo la productividad y la seguridad alimentaria. Las aguas pluviales pueden transportar contaminantes como sedimentos, coliformes fecales y contaminantes atmosféricos. Su gestión eficiente es clave para prevenir inundaciones, controlar la erosión y proteger los cuerpos de agua.

Además, la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2017) menciona que una de las principales consecuencias de contaminar los recursos hídricos con aguas residuales es que el agua se convierte en vehículo de transmisión de enfermedades y patógenos que se encuentren presentes en ellas, y muchas comunidades que aún no tiene acceso al agua potable o utilizan acueductos de agua comunitarios con índices de riesgo de la calidad del agua (IRCA) bajo, medio o alto ponen en riesgo la salud y vida de los usuarios.

Vidal y Araya (2014) subrayan la importancia de los microorganismos en la transmisión de enfermedades a través del agua. Según estos autores, bacterias, protozoos y virus como el de la hepatitis A son los principales responsables de afecciones como la amebiasis y la fiebre tifoidea. Es importante destacar que la distribución geográfica de estas enfermedades es variable, con

algunas presentando un alcance global y otras siendo más comunes en regiones como Sudamérica, África y Asia.

Como lo indica el Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente (PNUMA, 2004), la práctica generalizada de verter desechos sin tratar ha sido un factor determinante en la propagación de enfermedades diarreicas a escala global.

Vidal y Araya (2014) alertan sobre el grave peligro que representa el consumo de agua contaminada, la cual se convierte en un vehículo de transmisión de diversos patógenos provenientes de desechos humanos, animales y sustancias químicas, poniendo en riesgo la salud de millones de personas en todo el mundo.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de biofiltración para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda de la vereda Ambalá Parte Alta, municipio de Ibagué, departamento del Tolima.

Objetivos Específicos

1. Realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales domésticas generadas en la vivienda y determinar los parámetros de diseño del biofiltro.
2. Identificar y seleccionar las especies de plantas y microorganismos más adecuados para llevar a cabo la filtración biológica en el biofiltro.
3. Realizar el diseño hidráulico del sistema de biofiltros y establecer aspectos técnicos de construcción y operación del humedal.

Marco de referencia

Estado del arte

Se analizaron diversos documentos de estudio con un enfoque asociado a los sistemas de biofiltración de aguas residuales domésticas.

En 2010, Rodríguez y su equipo llevaron a cabo un estudio comparativo para evaluar la eficiencia de humedales artificiales sembrados con lentejas y buchón de agua en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los resultados obtenidos demostraron que ambas especies acuáticas contribuyen de manera efectiva a la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas residuales, consolidando así el papel de los humedales artificiales como una tecnología prometedora para la depuración de aguas residuales.

En su investigación del 2016, Núñez Burga evaluó la eficiencia de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal como una solución sostenible para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en una vivienda ubicada en Lima, Perú. Este estudio de caso proporcionó valiosa información sobre la capacidad de estos sistemas para remover contaminantes y mejorar la calidad del agua.

Herrera y Rey en 2018, abordaron la problemática de la contaminación por aguas residuales en el conjunto residencial Aranjuez II, en Villavicencio, proponiendo la implementación de un biofiltro subsuperficial de flujo horizontal. Los resultados de este estudio demostraron la eficacia de esta tecnología en la reducción de la carga orgánica, ofreciendo una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales en este tipo de asentamientos.

Marco contextual

El Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial WSP 2006, como se citó en Ortiz, et al. (2009). destaca que los biofiltros son sistemas de tratamiento de aguas residuales que simulan los procesos naturales de los humedales. Estos sistemas emplean lechos filtrantes de materiales porosos de gran tamaño (5-10 cm), que sirven como hábitat para una comunidad microbiana diversa. Estos microorganismos, junto con las plantas acuáticas que crecen en la superficie, trabajan en sinergia para descomponer la materia orgánica contaminante a través de procesos aeróbicos y anaeróbicos, mejorando así la calidad del agua.





Ecoviviendas (2022), en un estudio reciente, demostró que un estructura de biofiltros para tratar el agua residual se puede realizar a pequeña escala para una vivienda por medio de tres etapas, la primera es el pretratamiento de las aguas grises en donde se ubica una trampa de grasas para las aguas grises que se encarga de eliminar los jabones y las grasas, provenientes de la lavadora de ropa, duchas, lavamanos y lavaplatos; seguido por la segunda etapa constituida por un filtro de humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) donde se deposita el agua de la trampa de grasas sumado con las aguas negras de la vivienda en el que el HAFS se encarga entre otros de remover la materia contaminante de coliformes totales y fecales; la tercera etapa consta de un tanque de almacenamiento o maduración para coleccionar el agua proveniente de la etapa anterior y realizar un tercer proceso de depuración mediante plantas acuáticas flotantes y microorganismos que contribuyen a eliminar el nitrógeno y fósforo entre otros contaminantes en el agua para obtener agua apta para el riego de plantas ornamentales y árboles frutales.

Marco teórico

Principales especies macrófitas utilizadas en humedales artificiales

Los humedales, según Zhang 2008, como se citó en Núñez (2016), se caracterizan por una rica diversidad de plantas acuáticas superiores, entre las que destacan las macrófitas emergentes, especialmente adaptadas a vivir en ambientes inundados.

Tabla 1. Especies de plantas macrófitas emergentes típicas de zonas húmedas

Lirio amarillo (<i>Iris pseudacorus</i>)	Paraguaitas (<i>Cyperus alternifolius</i>)
	
Aro de agua (<i>Lysichiton americanus</i>)	Pontederia (<i>Pontederia cordata</i>)
	

Carrizo (*Phragmites australis*)



Papiro (*Cyperus papyrus*)



Calta palustre (*Caltha palustris*)



Enea (*Thypha latifolia*)



Lirio (*Iris sibirica*)



Oreja de elefante (*Xanthosoma violaceum*)



Lirio japonés (*Iris laevigata*)



Cala (*Zantedeschia ethiopica*)



Fuente. Nuñez 2016

Tabla 2. Macrófitas flotantes más destacas (Ly, 2007) como se citó en Núñez (2016)

Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)



Lechuga de agua (*pistia estratiotes*)



Oreja de elefante (*salvinia auriculata*)



Lenteja de agua (*lemna minor*)



Nenúfar (*Nymphaea alba*)Loto, nelumbo (*Nelumbo nucifera*)

Fuente. Nuñez 2016

Caracterización de las aguas residuales domesticas:

La Resolución 631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los estándares de calidad y los límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas a cuerpos de agua superficiales, con el objetivo de proteger los ecosistemas acuáticos y garantizar la salud pública.

Tabla 3. *Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas*

Parámetro	Unidades	Aguas residuales domesticas ARD individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares
pH	Unidades de pH	6,00 A 9,00
Demanda Química de oxígeno (DQO)	$\frac{m}{L} O_2$	200,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	$\frac{m}{L}$	100,00
Sólidos Sedimentables	$\frac{m}{L}$	5,00

Grasas y Aceites	$\frac{m}{L}$	20,00
-------------------------	---------------	-------

Fuente. Resolución 0631, 2015

En su investigación, Núñez (2016, p. 141) presenta los resultados de un estudio de caso que evalúa la eficiencia de un sistema de humedal artificial a pequeña escala para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda rural de Perú. A través de un análisis detallado de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua, antes y después del tratamiento, se demuestra la capacidad del sistema para reducir significativamente la carga contaminante.

Tabla 4. *Parámetros físico-químicos y microbiológicos antes y después del tratamiento mediante el sistema de HAFSS*

Parámetros	Símbolo	Unidad	Pre – análisis	Post – análisis
Químicos				
Nitrogeno total	N	mg/L	27.96	6.27
Fosforo total	P	mg/L	4.06	0.49
Demanda Biológica de oxígeno	DBO	mg/L	285.1	12.38
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	683.0	30.45
Turbidez	T	°C	527	19.3
pH		Unidad de pH	4.4	6.5
Conductividad	C	Us/cm	820	370
Sólidos disueltos totales	SDT	mg/L	400	180
Temperatura	T	°C	27.5	28.2
Oxígeno disuelto	OD	Mg	10.7	4.2
Microbiológicos				
Coliformes totales		NMP/100 mL	79000000000	4000
Coliformes fecales		NMP/100 mL	79000000000	1000

Fuente. Núñez, 2016, p. 141

Demanda de consumo de agua

Según el acuerdo 84 de 2010 instituido por el concejo de Bogotá se establecieron los valores aproximados del consumo de agua al día de una persona común, para determinar el caudal de agua de consumo de la vivienda, se recolecto información del consumo diario de agua en la vivienda y se comparó con los valores del acuerdo 84 de 2010 para lograr obtener la siguiente información.

Tabla 5. Consumo de agua al día por persona aproximado según el acuerdo 84 de 2010

Actividad	Consumo de agua / día
Lavar ropa	60 - 100 litros
Limpiar la casa	15 - 40 litros
Lavar losa (cerrando el grifo)	100 litros
Cocinar	6 - 8 litros
Ducharse	70 litros
Lavarse los dientes (cerrando el grifo)	1,5 litros
Lavarse las manos (cerrando el grifo)	1,5 litros
Afeitarse cerrando el grifo	3 litros
Descargar la cisterna	10 - 15 litros
Riego de plantas	15 litros
Beber	1,5 litros

Fuente. Acuerdo 84 de 2010

Caudal Agua Residual Domestica

En la Resolución 0330 de 2017, para caudal de aguas residuales domesticas en el cual se realiza un método estadístico que considera factores como el número de habitantes, el tipo de vivienda, los hábitos de consumo y otros parámetros relevantes. Para la realización del cálculo del caudal de aguas residuales domésticas, utilizando la proyección de población promedio que puede llegar a alojar la vivienda se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_A = \frac{C_R \times P \times D_n}{86400}$$

Donde,

Q_A = Caudal de aguas residuales domesticas (L/seg)

C_R = Coeficiente de retorno (adimensional)

P = Nuenmro de habitantes proyectados (hab)

D_n = Dotacion neta de agua proyectada por habitante (L/hab. día)

Tabla 6. Dotación neta por habitante según la altura del nivel de mar de la zona atendida

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima (L/hab.día)
>2000 m s.n.m.	120
1000 – 2000 m s.n.m.	130
<1000 m s.n.m.	140

Fuente. Resolución 0330 de 2017

Tabla 7. Coeficiente de retorno aguas residuales domesticas

Nivel de complejidad del sistema	Coeficiente de retorno
Bajo y Medio	0,80

Medio Alto y Alto	0,85
-------------------	------

Fuente. Titulo D. RAS 2000 p. 52

De acuerdo con la Resolución 0330 de 2017, el coeficiente de retorno debe ser calculado con base de datos locales o, en ausencia de estos datos debe asumirse el valor de 0,85

Diseño de Trampa de grasas

Con el fin de determinar el caudal de diseño del sistema, se utilizarán los valores de gasto unitario proporcionados en la Tabla 8. Estos datos, que representan el consumo promedio por usuario, servirán como base para realizar los cálculos necesarios y garantizar así una adecuada dimensionarían de las instalaciones.

Tabla 8. *Unidades de gasto de los aparatos sanitarios que descargan a la trampa de grasa.*

Aparato Sanitario	Tipo	Unidad de Gasto (*)
Lavadero de cocina	Múltiple	2
Lavadero de repostería	Hotel, restaurante	4
Lavadero de ropa		3

Fuente. CEPIS 2003

(*) *Debe asumirse este número de unidades de gasto por cada grifo instalado en el lavadero.*

-El caudal de la trampa de grasas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = 0.3 \sqrt{\sum p}$$

Donde:

Q = Caudal máximo en Lt/seg.

p = Suma de todas las unidades de gasto a ser atendido por la trampa de grasa

-El volumen de la trampa de grasa se calculará para un período de retención entre 2,5 a 3,0 minutos.

Ficha técnica trampa de grasas

Según la Resolución 0330 de 2017 la trampa de grasas debe cumplir con los siguientes aspectos de diseño y requerimientos operativos. Esta información resulta fundamental para la selección adecuada de este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

- Para garantizar un funcionamiento óptimo, la trampa de grasas debe instalarse lo más cerca posible al origen del agua residual.
- El tiempo de retención para calcular el volumen de la trampa de grasas debe ser mínimo 2,5 minutos.
- El área superficial debe tener una relación de 1:1 a 3:1 dependiendo del terreno.
- La altura mínima debe ser 0,35 m.
- El mantenimiento requerido debe realizarse cuando la trampa alcance el 75% de su capacidad.

Tabla 9. Ficha técnica trampa de grasas

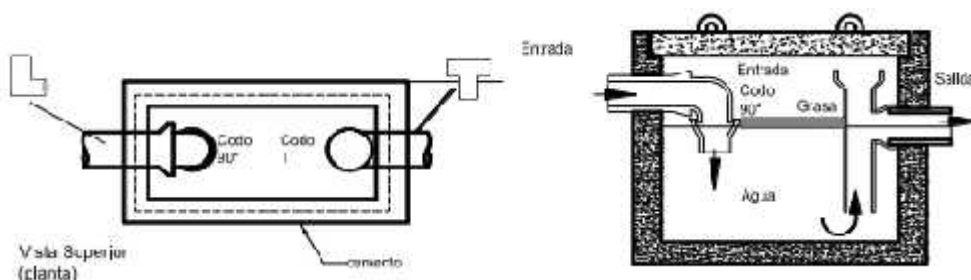
FICHA TÉCNICA TRAMPA DE GRASAS

Descripción general del sistema

Según el RAS (2010) Los separadores de grasa, dispositivos diseñados para retener residuos grasos y sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales, son fundamentales en el tratamiento previo de las aguas antes de su descarga al alcantarillado o a sistemas de tratamiento in situ. Estos equipos, dependiendo de su capacidad y aplicación, pueden clasificarse en domiciliarios, colectivos o instalarse directamente en sedimentadores primarios. Su funcionamiento se basa en la diferencia de densidad entre el agua, los sólidos y las grasas,

permitiendo así la separación de estos componentes. Los mecanismos de separación pueden variar, desde simples compuertas fijas hasta sistemas más sofisticados como el VOLTEX, que emplea una lámina fina de agua para facilitar la separación de grasas. La elección del tipo de separador dependerá del caudal de aguas residuales a tratar y de la naturaleza de los contaminantes presentes.

Figura 1 Trampa de Grasas ficha técnica



Fuente RAS (2010)

Sistemas de Pretratamiento necesarios

Aunque el sistema no requiere un pretratamiento de aguas residuales, es fundamental implementar medidas de control de flujo en los puntos de entrada. Estos mecanismos son esenciales para prevenir daños causados por sobrecargas o fluctuaciones repentinas en el caudal.

Aplicabilidad

Este sistema se emplea como una primera etapa de tratamiento para eliminar las grasas presentes en el agua residual, optimizando así el rendimiento de los procesos posteriores. Su uso es especialmente relevante en sectores como la hostelería, el sector alimenticio como los restaurantes, hospitales, lavanderías de ropa y demás, donde la presencia de grasas puede obstruir las tuberías y causar problemas en el sistema de alcantarillado.

Ventajas y desventajas

- La insuficiencia en las labores de mantenimiento conlleva a una disminución en la eficiencia de las trampas de grasa, resultando en una descarga de grasas al efluente superior a los límites permitidos.
- Las fluctuaciones bruscas en el caudal pueden comprometer la eficiencia de la trampa, al impedir la adecuada separación de la grasa y los sólidos, lo que a su vez favorece el paso de grasas al sistema de alcantarillado.

Aspectos de diseño

- Para garantizar un funcionamiento óptimo, los biofiltros deben instalarse lo más cerca posible del origen de las aguas residuales, es decir, cerca de la cocina. Esta ubicación estratégica permite interceptar las grasas y otros sólidos antes de que ingresen a sistemas de tratamiento posteriores como tanques sépticos o sedimentadores primarios, previniendo así obstrucciones, adherencia a tuberías y acumulación de residuos que podrían generar malos olores.
- Para garantizar una adecuada retención de grasas, el biofiltro debe tener una capacidad de almacenamiento de grasa, medida en kilogramos, que sea al menos un cuarto del caudal máximo de agua residual que pueda recibir por hora, expresado en litros por minuto.

El diseño del tanque del biófiltró debe cumplir con los siguientes requisitos:

- un área de al menos 0.25 metros cuadrados por cada litro por segundo de caudal, una proporción entre el ancho y el largo que oscile entre 1:4 y 1:18, y una velocidad ascendente mínima del líquido de 4 milímetros por segundo.
- La forma del biófiltró debe ser alargada, con una relación entre el largo y el ancho del área superficial que varíe entre 2:1 y 3:2.
- La profundidad mínima del tanque debe ser de 80 centímetros
- La entrada al tanque debe ser a través de una curva de 90 grados (codo) con un diámetro de al menos 75 milímetros.
- La salida del tanque se realizará mediante una unión en forma de T, con un diámetro mínimo de 75 milímetros.
- El extremo inferior del codo de entrada debe prolongarse hasta una profundidad de 0,15 metros por debajo de la superficie del líquido.
- Se requiere un desnivel mínimo de 0,05 metros entre la tubería de alimentación y la de descarga.
- El dispositivo de salida debe contar con una abertura superior para ventilación que no exceda los 0,05 metros por debajo de la losa del techo.
- La tubería de salida debe ubicarse a una distancia del fondo comprendida entre 0,075 y 0,15 metros.
- Se requiere un espacio aéreo mínimo de 0.3 metros entre el nivel del líquido y la superficie inferior de la tapa.
- La geometría de la trampa debe ser troncocónica o piramidal invertida, con una pared vertical en la sección de salida. La base horizontal deberá tener dimensiones mínimas de 0.25 metros por lado en caso de ser cuadrada o un diámetro mínimo de 0.25 metros en caso de ser circular. La inclinación de las paredes laterales debe estar comprendida entre 45° y 60° respecto a la horizontal.
- La profundidad vertical de la trampa no podrá ser inferior a 0.8 metros.
- Se autoriza el diseño de trampas con un compartimento adicional destinado al almacenamiento de grasas en aquellos casos donde la capacidad total exceda los 0.6 metros cúbicos o cuando el establecimiento opere de manera continua durante más de 16 horas diarias.
- Se deberá instalar un vertedor de rebose a una altura de 0.05 metros por encima del nivel del agua para conectar la trampa de grasa con el compartimento de almacenamiento. El volumen de almacenamiento de grasa en el compartimento deberá ser, como mínimo, un tercio del volumen total de la trampa.
- La capacidad de almacenamiento de grasa de la trampa deberá ser suficiente para garantizar un intervalo adecuado entre cada operación de limpieza.
- Se deberán establecer condiciones de flujo con mínima turbulencia para favorecer la flotación de los materiales grasos.
- Se deberán adoptar medidas para evitar el acceso de insectos, roedores y otros agentes contaminantes.
- Tiempo de retención hidráulica

Tabla 10. *Tiempo de retención hidráulica*

Tiempo de retención (minutos)	Caudal de entrada (L/s)
-------------------------------	-------------------------

3	2 - 9
4	10 – 19
5	20 o más

Fuente RAS (2010)

Rendimientos esperados

Las capacidades de retención de grasas de este sistema de tratamiento se muestran a continuación:

Tabla 11. capacidades de retención de grasas

Tipo de afluyente	Caudal (L/min)	Capacidad de retención de grasas (kg)	Capacidad máxima recomendada (L)
Cocina de restaurante	56	14	190
Habitación sencilla	72	18	190
Habitación doble	92	23	240
Dos habitaciones sencillas	92	23	240
Volumen de agua mayor de 115 litros	56	14	115
Volumen de agua mayor de 190 litros	92	23	240
Volumen de agua entre 190 y 378 litros	114	36	378

Fuente. RAS (2010)

Generación de efectos

Residuos de aceites y grasas

Aspectos particulares de operación y mantenimiento

- Un mantenimiento periódico y adecuado de las trampas de grasa es esencial para asegurar su correcto funcionamiento, prevenir la obstrucción de las tuberías y evitar la liberación de grasas al sistema de alcantarillado y la aparición de malos olores, garantizando así un ambiente más higiénico.
- La frecuencia de limpieza de las trampas de grasa debe ajustarse según la acumulación de grasa observada, considerando factores como el tipo de volumen de residuos generados.
- las trampas de grasa deben limpiarse cuando la acumulación de grasa alcance al menos el 75% de su capacidad, evitando así la obstrucción y el desbordamiento.

Fuente. RAS (2010) - Título E - Anexo 2

Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFS):

Rojas (2004) como se citó en Núñez (2016) determinó que la eficiencia de un humedal artificial en la eliminación de contaminantes se ve directamente afectada por su área superficial, es decir, por su longitud y ancho. Cuanto mayor sea esta área, mayor será la capacidad del humedal para retener y transformar los contaminantes. Por otro lado, el flujo máximo que puede soportar el humedal está limitado por su área transversal, determinada por el ancho y la profundidad del lecho.

Determinación de la carga

La carga determina dimensionamiento y la capacidad del HAFSS necesario para tratar el volumen de agua residual generado.

$$C = Q_A \times D \times S$$

Donde,

C = carga (gr/día)

Q_A = Caudal de aguas residuales domesticas (L/seg)

DBO = Demanda Biológica de Oxígeno

Área superficial

$$A = \frac{C}{C}$$

Donde,

As = Área Superficial (m^2)

$C = \text{Carga (gr/día)}$

$C_s = \text{Carga Hidráulica (m}^2/\text{g /d)}$

El Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico (RAS 2010), en su Título E, página 35, establece como valores de referencia para el diseño de humedales subsuperficiales una carga hidráulica de 0.032 m²/L/día en zonas frías o con espacio limitado, y de 0.021 m²/L/día en zonas con restricciones de espacio más severas. Estos valores son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Dimensiones del humedal

Determinar el ancho del humedal

$$A = \left(\frac{A_s}{2}\right)^{0.5}$$

Donde,

A = Ancho

A_s = Área Superficial (m²)

Determinar el largo del humedal

$$L = 2A$$

Donde,

L = Largo

A = Ancho

Área del humedal

Para determinar el área del humedal utilizamos la ecuación ancho por largo

$$á r d h u = A x L$$

Ficha técnica humedales de flujo subsuperficial

El Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico (RAS 2010), en su Anexo 2, Título E, ofrece una descripción detallada de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSS), incluyendo su principio de operación, campo de aplicación, ventajas, limitaciones, aspectos de diseño y requerimientos operativos. Esta información resulta fundamental para la selección adecuada de este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 12. *Ficha técnica de HAFSS*

FICHA TÉCNICA HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Descripción general del sistema

Como se indica en el RAS (2010) los humedales artificiales son sistemas diseñados y contruidos por el hombre para imitar los procesos naturales de depuración del agua, pero con un control preciso sobre sus condiciones. A diferencia de los humedales naturales, estos sistemas cuentan con estructuras impermeables que evitan la pérdida de agua y permiten un manejo más eficiente del flujo hídrico. Se emplean materiales específicos como sustratos para proporcionar un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de microorganismos. Al hacer circular el agua a tratar a través de estos sistemas, se inducen una serie de reacciones físicas, químicas y biológicas que conducen a la depuración del agua. Los humedales contruidos son sistemas complejos donde interactúan diversos elementos, cada uno con un papel fundamental en el proceso de tratamiento. Estos sistemas, según Salas Rodríguez y colaboradores (2007), pueden ser considerados como un complejo ecosistema en el que los principales actores son: el sustrato, la vegetación y el agua a tratar.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial constituyen una tecnología de tratamiento de aguas residuales basada en procesos ecosistémicos. Estos sistemas simulan las funciones de un humedal natural, aprovechando la capacidad de la vegetación acuática y los microorganismos asociados para depurar el agua.

La vegetación empleada en estos sistemas, típicamente macrófitas emergentes y anfibias, desempeña un papel crucial en la remoción de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos. Estas plantas, adaptadas a condiciones de inundación, poseen sistemas radiculares extensos y aerénquima bien desarrollado, lo cual les permite crecer en suelos saturados y oxigenar el sustrato. El sustrato, generalmente un material granular como arena o grava,

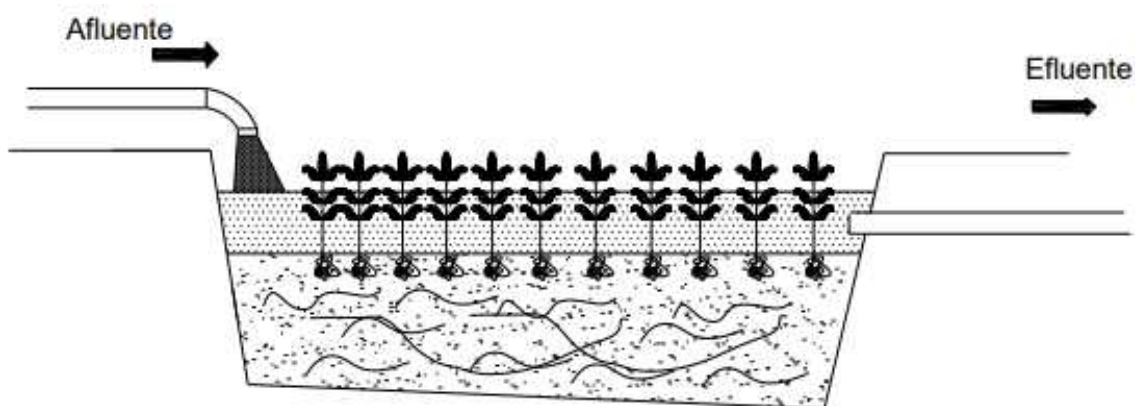
proporciona un soporte físico para el crecimiento radicular y alberga una diversa comunidad microbiana responsable de la degradación de la materia orgánica y la transformación de compuestos nitrogenados.

El flujo subsuperficial del agua a través del sustrato favorece la formación de biopelículas microbianas, las cuales desempeñan un papel fundamental en la remoción de contaminantes. Estos sistemas, al proporcionar un área de contacto sólido-líquido extensa y tiempos de retención hidráulicos adecuados, optimizan los procesos de adsorción, biodegradación y transformación de los contaminantes.

Salas Rodríguez y colaboradores (2007) destacan la importancia de la selección adecuada de la vegetación y del sustrato para garantizar la eficiencia de estos sistemas. Asimismo, enfatizan la necesidad de un diseño cuidadoso considerando factores como la carga orgánica, la calidad del agua afluyente y las condiciones climáticas locales.

En resumen, los humedales artificiales de flujo subsuperficial ofrecen una alternativa sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la protección de los recursos hídricos y a la restauración de ecosistemas degradados.

Figura 2 Humedal Artificial



Fuente RAS (2010)

Sistema de pretratamiento necesarios

El pretratamiento de aguas residuales tiene como objetivo principal eliminar los sólidos gruesos, las grasas y los flotantes que pueden obstruir las tuberías y saturar los medios filtrantes de los sistemas de tratamiento. Al remover estos contaminantes, se protege la infraestructura y se garantiza una operación eficiente. Además, para minimizar la carga de sólidos sobre los sistemas biológicos, como los humedales, es fundamental implementar etapas de pretratamiento físico, tales como fosas sépticas o lagunas anaerobias. De esta manera, se optimiza el proceso de tratamiento y se mejora la calidad del efluente final.

Aplicabilidad

Si bien esta tecnología ofrece una solución eficaz para el tratamiento de aguas residuales en una amplia gama de climas, su implementación requiere de una evaluación cuidadosa del espacio disponible. Aunque técnicamente es viable para cualquier tamaño de población, su carácter extensivo puede representar un desafío en áreas con limitaciones geográficas.

Ventajas y desventajas

-
- Los humedales artificiales, según Salas Rodríguez et al. (2007), ofrecen una serie de ventajas que los hacen atractivos como sistemas de tratamiento de aguas residuales. Entre ellas destacan:
 - Sencillez operativa: Sus requerimientos de mantenimiento son mínimos, limitándose a tareas sencillas como la limpieza y poda de la vegetación.
 - Bajo consumo energético: Al aprovechar la gravedad para el flujo de agua, minimizan el consumo energético.
 - Alta fiabilidad: Al carecer de equipos mecánicos complejos, presentan una baja tasa de averías.
 - Tolerancia a cargas variables: Gracias a sus largos tiempos de retención, pueden adaptarse a fluctuaciones en el caudal y la carga contaminante.
 - Múltiples usos: La biomasa producida puede tener diversos usos, como ornamentación o alimentación animal.
 - Integración ambiental: Se adaptan fácilmente al entorno y pueden mejorar la calidad del paisaje.
 - Eficiencia en el uso del suelo: En comparación con otros sistemas, requieren menor superficie, especialmente los humedales de flujo subsuperficial.
 - Ausencia de problemas asociados: Al circular el agua bajo la superficie, evitan problemas de olores y proliferación de insectos.
 - Sin embargo, como todo sistema, presentan ciertas limitaciones. Entre las principales desventajas se encuentran:
 - Requerimiento de espacio: Necesitan una mayor superficie de terreno que otros tratamientos convencionales, lo cual puede encarecer su implementación en ciertas zonas.
 - Tiempo de puesta en marcha: Se requiere un periodo de maduración antes de alcanzar su máximo rendimiento.
 - Pérdidas de agua: La evapotranspiración puede incrementar la salinidad de los efluentes.
 - Limitada flexibilidad: Una vez construidos, ofrecen pocas posibilidades de modificación, por lo que su diseño debe ser cuidadoso y preciso.

Aspectos de diseño

Tradicionalmente, el diseño de humedales artificiales se basaba en modelos simplificados que asumían un comportamiento lineal del sistema. Sin embargo, estudios recientes, como los de Kadlec y Wallace (2008), han demostrado que esta aproximación es insuficiente para capturar la complejidad de estos ecosistemas. La variabilidad en las condiciones ambientales y la interacción de múltiples procesos biológicos y químicos hacen que los humedales sean sistemas altamente dinámicos y difíciles de modelar. En respuesta a esta complejidad, los investigadores han desarrollado modelos más sofisticados, como el modelo P-k-C*, que consideran un mayor número de variables y ofrecen una representación más realista del comportamiento de los humedales.

- Definir la composición inicial de las aguas residuales.
 - Determinar los límites máximos permisibles de contaminantes en el agua de salida, de acuerdo con la regulación ambiental.
 - Definir el flujo hidráulico de diseño.
 - Evaluar las condiciones climáticas del sitio.
-

- Elegir el tipo de humedal más adecuado y establecer los criterios de dimensionamiento.
- Estimar la eficiencia de los procesos biológicos.
- Determinar el grado de mezcla y la eficiencia de remoción de cada contaminante.
- Optimizar el diseño del humedal para cumplir con los objetivos de tratamiento y las restricciones operativas.

El diseño físico del humedal incluye aspectos como el número y la forma de las celdas, así como la relación entre el largo y el ancho de las mismas. La fase de construcción abarca la ejecución de las obras civiles, como el movimiento de tierra, la construcción de diques y la instalación de sistemas de impermeabilización. Finalmente, la selección y establecimiento de la vegetación es crucial para garantizar el correcto funcionamiento del humedal. Se debe seleccionar un conjunto de especies vegetales adaptadas a las condiciones locales y capaces de soportar las cargas contaminantes. La densidad de plantación y las técnicas de siembra también influyen en el éxito de la revegetación.

Rendimientos esperados

En la siguiente tabla se presentan los rendimientos típicos de los humedales construidos de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. (Salas Rodríguez et al. 2007)

Tabla 13. Rendimientos típicos de los humedales de flujo subsuperficial

Constituyente	%
SS	85 – 95
DBO	80 – 90
DQO	75 – 85
N total (mg/l)	20 – 40
P total (mg/l)	15 – 30
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	90 – 99

Fuente. RAS (2010)

Aspectos particulares de operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento de humedales artificiales requieren de una gestión cuidadosa para garantizar su eficiencia y durabilidad. Entre las principales actividades a considerar se encuentran:

- **Mantenimiento del pretratamiento:** Es fundamental asegurar un funcionamiento óptimo de las etapas previas al humedal, como tamizado y desarenado, para evitar la obstrucción del sistema y la proliferación de organismos patógenos.

-
- **Limpieza de sistemas de distribución:** La frecuencia de limpieza de los canales y tuberías dependerá de la carga orgánica y de la presencia de sedimentos, con el objetivo de mantener una distribución homogénea del flujo.
 - **Protección de la vegetación:** Se deben tomar medidas para evitar el daño a las plantas, ya sea por herbivoría o por compactación del sustrato. El cercado del humedal y la implementación de medidas de control de plagas pueden ser necesarias.
 - **Gestión de la biomasa:** La cosecha de biomasa puede ser una práctica beneficiosa para la remoción de nutrientes, especialmente en sistemas diseñados para este fin. Sin embargo, es importante considerar el momento óptimo de cosecha para evitar la liberación de nutrientes al medio.
 - **Control de malezas:** La competencia de las malezas puede afectar el crecimiento de las macrófitas y reducir la eficiencia del sistema. Se recomienda la extracción manual de las malezas para evitar el uso de herbicidas y proteger la biodiversidad asociada al humedal.
 - **Monitoreo fitosanitario:** Es necesario realizar inspecciones periódicas para detectar la presencia de enfermedades y plagas en la vegetación. En caso de detectar problemas, se deben aplicar tratamientos fitosanitarios específicos, siempre bajo la supervisión de un técnico especializado.
-

Fuente. RAS (2010) Título E Anexo 2

Marco conceptual

Aguas Residuales: Las AR, producto del uso doméstico, industrial y agrícola, experimentan alteraciones significativas en su composición debido a la actividad humana. Según Mara (1993), estas aguas contienen una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas, cuya degradación es llevada a cabo principalmente por microorganismos. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO define las aguas residuales como aquellos cuerpos hídricos que han perdido su calidad original debido a la contaminación antropogénica.

Aguas Residuales Domésticas: Las ARD resultantes de las actividades diarias en hogares y establecimientos comerciales, constituyen una compleja mezcla de materia orgánica, principalmente heces fecales y restos de alimentos, así como detergentes y otros compuestos

químicos. Estos efluentes, según Merli y Ricciuti (2009), si no son tratadas adecuadamente, debido a su alto contenido de nutrientes y microorganismos patógenos representan una carga contaminante significativa para los cuerpos receptores.

Aguas Residuales Negras: Como se indica en la Resolución 631 de 2015, corresponden a las ARD provenientes de las descargas de los servicios sanitarios como los inodoros, contaminada por materia fecal y orina.

Aguas Residuales Grises: La Resolución 631 de 2015 define estas aguas como los desechos que abarcan descargas de las actividades de aseo como ducha, lavamanos, lavado de ropa, limpieza general, lavaplatos y preparación de alimentos.

Biófiltro: Según Fernández (2004), los biofiltros son sistemas de tratamiento de aguas residuales que aprovechan la capacidad depuradora de las macrófitas. Estas plantas, cultivadas en un lecho de grava, establecen complejas interacciones físicas, químicas y biológicas que permiten la purificación gradual del agua. Este proceso natural se divide en tres etapas fundamentales: recolección, tratamiento y evacuación del agua tratada.

De acuerdo con Ortiz et al. (2014), los biofiltros son sistemas de tratamiento de agua que dependen de la actividad de microorganismos y plantas. Estos sistemas, compuestos por una trampa de grasas y un filtro anaeróbico, permiten la degradación biológica de sustancias contaminantes orgánicas.

Artega (2018) destaca que, para seleccionar el diseño más adecuado y optimizar la eficiencia de remoción de contaminantes en cada caso. Los biofiltros son sistemas versátiles que

pueden adaptarse a diferentes condiciones, según la profundidad del agua y la naturaleza de las sustancias a tratar. Esta diversidad se refleja en su clasificación: sistemas de flujo libre (FL), donde las plantas flotan libremente, y sistemas subsuperficiales (FSS), con plantas enraizadas en un sustrato. Dentro de los FSS, encontramos los sistemas de flujo vertical y horizontal, cada uno con características y aplicaciones específicas

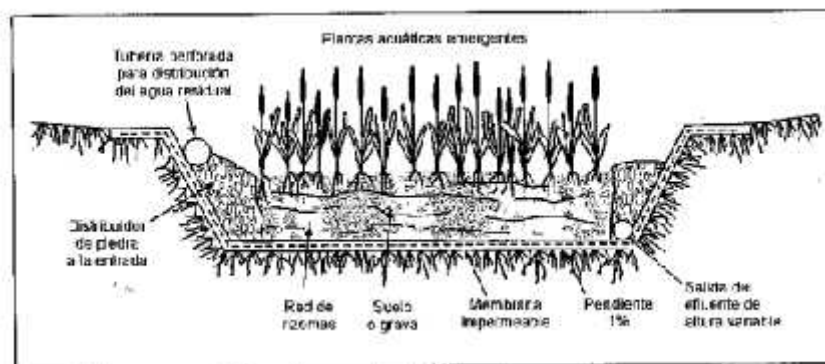
Arango (2003) también destaca que los bío-filtros han sido una opción atractiva para los países en desarrollo debido a sus costos accesibles y su fácil manejo. Al requerir inversiones iniciales y gastos operativos relativamente bajos, estos sistemas resultan ideales para comunidades rurales. Además, su funcionamiento es sencillo, lo que reduce la necesidad de personal altamente capacitado y permite su implementación en espacios reducidos.

Humedal Artificial: Inspirados en los procesos naturales de purificación del agua, los humedales artificiales como indican Romero et al., (2009) ofrecen una alternativa ecológica y eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas, caracterizados por su lecho poroso y su vegetación acuática, son capaces de eliminar una gran variedad de contaminantes. La configuración de un humedal artificial para Ortiz et al., (2014) ya que son ecosistemas construidos, rellenos con materiales porosos y colonizados por vegetación acuática puede variar considerablemente, desde sistemas de flujo superficial hasta sistemas de flujo vertical, lo que permite adaptar su diseño a las necesidades específicas de cada proyecto.

Humedal Artificial de flujo Subsuperficial HAFSS: para Romero (1999) los humedales de flujo subsuperficial, el agua se mueve lentamente a través de un lecho poroso compuesto por grava y arena, donde las plantas emergentes desempeñan un papel fundamental en los procesos de

depuración. La vegetación, al oxigenar el medio y proporcionar una gran superficie de contacto para el desarrollo de microorganismos, contribuye a la eliminación de contaminantes. Este tipo de humedal, caracterizado por su baja pendiente y su lecho poroso, ofrece una alta eficiencia de tratamiento.

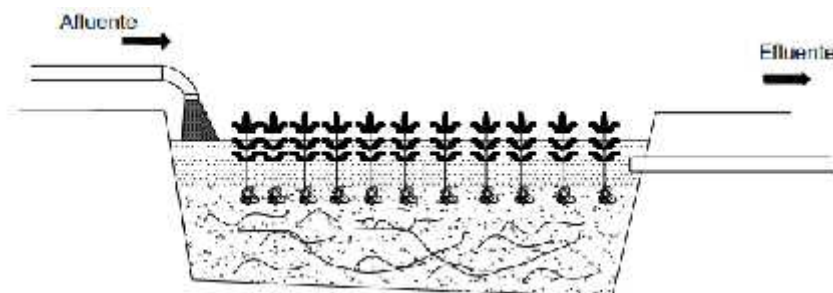
Figura 3. Humedal Artificial



Fuente. Romero, 1999

(URL-7, 2009, como se citó en Ferro 2012), señala que los humedales construidos funcionan gracias a la conductividad hidráulica gracias a la interacción entre el substrato, las plantas y los microorganismos. El substrato poroso permite el flujo de agua y la fijación de las plantas, mientras que las raíces de estas últimas suministran el oxígeno necesario para la actividad de los microorganismos que degradan los contaminantes.

Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial



Fuente. Titulo E, RAS, 2010

La tecnología de los humedales construidos ofrece una solución versátil y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, con una amplia gama de aplicaciones climáticas como lo indica Salas Rodríguez et al., (2007). Sin embargo, su implementación a gran escala, particularmente en áreas urbanas, puede verse limitada por la necesidad de grandes extensiones de terreno, lo que representa un desafío en términos de disponibilidad de suelo.

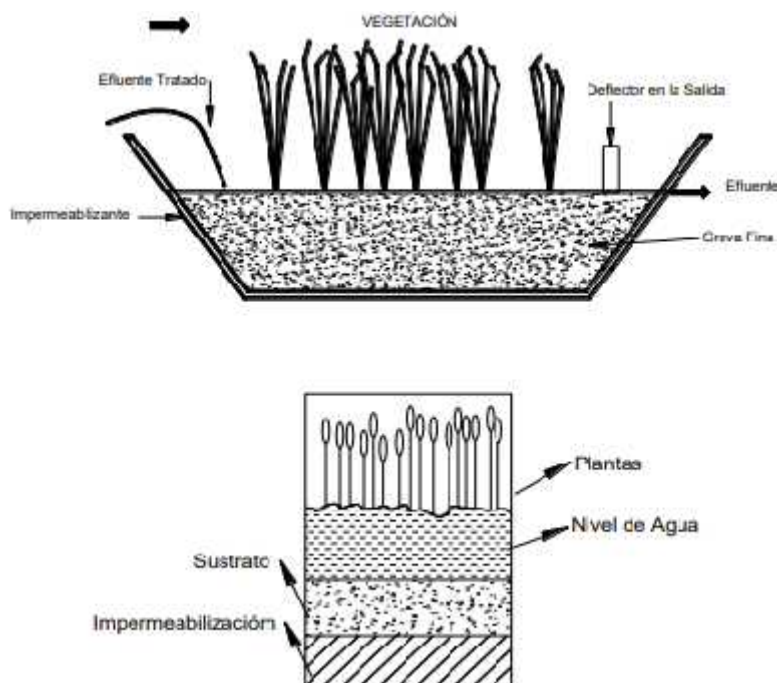
Tabla 14. Rendimiento típico del humedal artificial de flujo subsuperficial

CONSTITUYENTE	%
SS	85-95
DBO5	80-90
DQO	75-85
Ntotal (mg/l)	20-40
Ptotal (mg/l)	15-30
Coliformes fecales (NMP/100ml)	90-99

Fuente. RAS, Título E, 2010

Humedal artificial de flujo superficial HAFS: Según RAS (2010) Si bien los humedales construidos son una tecnología versátil y adaptable, su aplicación puede verse condicionada por factores como la disponibilidad de suelo. A pesar de su eficacia en diversos climas, la necesidad de grandes extensiones de terreno limita su implementación en áreas urbanas con alta densidad poblacional.

Figura 5. Humedal artificial de flujo superficial



Fuente. Titulo E - RAS, 2010

la EPA (2000) ha realizado un estudio exhaustivo en 27 sistemas de este tipo con el fin de evaluar la capacidad de los humedales artificiales de flujo superficial para tratar una amplia gama de aguas residuales. Este análisis ha permitido establecer rangos de eficiencia en la remoción de contaminantes, considerando las características variables de los afluentes y efluentes, lo que proporciona una valiosa referencia para el diseño y operación de estos sistemas.

Tabla 15. Características medias de los afluentes y efluentes de un conjunto de 27 humedales artificiales de flujo superficial sometidos a seguimiento

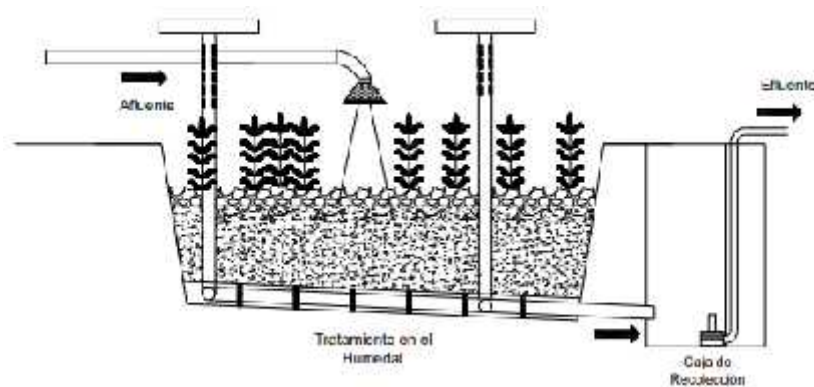
Constituyente	Afluente	Efluente
SS (mg/l)	69	15
DBO5(mg/l)	70	15

N-NTK (mg/l)	18	11
N-NH₃/NH₄ (mg/l)	9	7
N-NO₃ (mg/l)	3	1
Ntotal (mg/l)	12	4
Ptotal (mg/l)	5	2
Pdisuelto (mg/l)	3	2
Coliformes fecales (NMP/100ml)	73000	1320

Fuente. RAS - Título E, 2010

Humedal artificial de flujo vertical HAFV: el título E de RAS (2010) señala que el agua residual, una vez aplicada sobre la superficie del humedal, desciende por gravedad a través de los poros del material filtrante.

Figura 6. Humedal de flujo vertical



Fuente. Título E – RAS, 2010

La versatilidad de esta tecnología ha sido demostrada en múltiples proyectos a nivel mundial. Sin embargo, su característica principal, su carácter extensivo, que demanda amplias

superficies, puede limitar su implementación en zonas con alta densidad poblacional o con restricciones de uso del suelo. A pesar de ello, su adaptabilidad a diversos contextos la convierte en una opción viable para el tratamiento de aguas residuales en muchas regiones.

De acuerdo con Kadlec & Knight (1996), Los HAFV son capaces de reducir la DBO en aguas residuales hasta niveles inferiores a 20 mg/L, con eficiencias que pueden superar el 90%. Este alto rendimiento se debe en parte a los procesos biológicos que ocurren en el humedal, sin embargo, el ciclo del carbono intrínseco a estos sistemas establece un límite inferior para la concentración de DBO en el efluente.

Brix & Arias (2005) destaca que los humedales construidos, especialmente los de flujo vertical, son sistemas altamente eficientes en la remoción de nutrientes como el nitrógeno y, en menor medida, el fósforo. Estos sistemas alcanzan tasas de nitrificación y desnitrificación significativas, reduciendo las concentraciones de amonio en el efluente a niveles inferiores a 5 mg/L. Además de su capacidad para tratar nutrientes, los humedales de flujo vertical son efectivos en la eliminación de patógenos, logrando reducciones de hasta dos unidades logarítmicas.

Funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuáticos:

Orozco, 2010 indica que las plantas que habitan en humedales presentan adaptaciones estructurales que les permiten vivir en suelos inundados. Estas adaptaciones incluyen sistemas internos de aireación que transportan oxígeno desde las partes aéreas hacia las raíces, creando una zona oxidada en la rizosfera. Este no solo es esencial para la supervivencia de la planta, sino que también juega un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos del humedal, al favorecer la descomposición de materia orgánica y la actividad microbiana.

Tabla 16. *Funciones de las plantas en sistemas de tratamientos acuáticos*

Raíces y/o tallos en la columna de agua	Superficies que sirven tanto de sustrato para el crecimiento bacteriano como de filtro para la retención de partículas sólidas..
Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua	Los tallos y hojas flotantes actúan como una cubierta vegetal que atenúa la luz solar, inhibiendo el crecimiento de algas, y reducen la fuerza del viento sobre la superficie del agua, modulando la transferencia de gases esenciales para la respiración de las partes sumergidas de la planta.

Fuente. Orozco, 2010

Biófiltros Con Macrófitas Emergentes: (Brix et al., 2005 como se citó en Orozco, 2010)

Las plantas emergentes desempeñan un papel crucial en la purificación del agua al estabilizar los sedimentos, reducir la velocidad del flujo y facilitar la sedimentación de partículas. Además, estas plantas actúan como biofiltros, capturando nutrientes y contaminantes del agua y transformándolos en biomasa. La oxigenación de los sedimentos, gracias a la liberación de oxígeno por sus raíces, promueve la actividad microbiana y acelera los procesos de degradación de la materia orgánica.

Biófiltros Con Macrófitas Flotantes: Valdés (2015) señala que macrófitas como el lechuguín y la lenteja de agua actúan como filtros biológicos, reteniendo sólidos en sus raíces y acumulando nutrientes como nitrógeno y fósforo en sus tejidos. Estos procesos físicos y biológicos contribuyen significativamente a la mejora de la calidad del agua.

Totora o thypa: Orozco (2010) destaca a la espadaña como una especie robusta y de rápido crecimiento, ideal para establecer una cobertura vegetal en humedales construidos. Su capacidad

para adaptarse a diferentes condiciones y producir una gran cantidad de biomasa la convierte en una opción atractiva. No obstante, su potencial de remoción de nutrientes es limitado y su sistema radicular no es adecuado para sustratos gruesos, lo que limita su aplicación en ciertos tipos de sistemas.

Eichhornia crassipes o Jacinto de agua: Castillo (1990) describe al Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como una macrófita flotante de crecimiento vegetativo acelerado, capaz de formar densas poblaciones en poco tiempo.

Castillo (1990) cita estudios previos que demostraron el potencial del Jacinto de agua para tratar aguas residuales. Miner (1971) ya había investigado su uso en lagunas anaeróbicas para el tratamiento de desechos porcinos, mientras que Rogers y Davis (1972) estimaron que una hectárea de esta planta podía absorber los nutrientes de las aguas residuales de una población considerable.

Rodríguez et al. (2009), citando a la EPA (1998b), destacan el potencial del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como una fuente de nutrientes para la agricultura. Esta planta acuática, a pesar de ser considerada una plaga debido a su rápido crecimiento, tiene la capacidad de acumular grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal, los cuales pueden ser recuperados y utilizados como enmienda orgánica.

Carrizo o Phragmites: Lara (2000) afirma que los carrizos presentan ventajas significativas respecto a otras especies de macrófitas utilizadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Su sistema radicular, más profundo que el de la espadaña, pero menos que el del junco, favorece la oxigenación del sustrato y la estabilización del suelo. Además, su valor nutritivo relativamente bajo los protege del ataque de herbívoros.

Cyperus Papyrus o Papiro: Aragón et al. (2015) resaltan las cualidades del papiro (*Cyperus spp.*) como una macrófita de gran interés para la Fito remediación. Sus rizomas robustos, su tolerancia a condiciones ambientales adversas y su capacidad de soportar altas temperaturas y niveles de insolación lo convierten en una especie muy adaptable para su uso en sistemas de tratamiento de aguas residuales. El papiro, una planta acuática de gran belleza y relevancia histórica, puede alcanzar alturas impresionantes, superando los cinco metros. Sus largos tallos, hojas estrechas y espigas marrones lo hacen fácilmente reconocible. Esta planta, adaptada a vivir en zonas húmedas y soleadas, presenta una eficiente vía de fotosíntesis que le permite crecer rápidamente. Sus rizomas le permiten arraigarse en suelos inundados y sus nuevos brotes siempre emergen del mismo segmento del tallo. A lo largo de la historia, el papiro ha sido fundamental para diversas culturas, siendo utilizado para la fabricación de papel, esteras y otros objetos. Hoy en día, se cultiva principalmente con fines ornamentales.

Lemna Minor o Lenteja de agua: La lenteja de agua (*Lemnaceae*) es un grupo de plantas acuáticas flotantes caracterizadas por una estructura vegetativa simplificada. A diferencia de la mayoría de las plantas, las lemnaceas no poseen una diferenciación clara entre tallo y hoja, sino que presentan una estructura unificada conocida como fronda. Esta adaptación les permite maximizar la absorción de nutrientes a través de toda su superficie, incluyendo la parte inferior de la fronda y las raíces (EPA, 2000, citado en Rodríguez et al., 2009). Esta eficiencia en la captación de nutrientes, combinada con su alta tasa de reproducción, las convierte en organismos modelo para el estudio de la fisiología vegetal en ambientes acuáticos.

Mecanismos De Remoción De Contaminantes

Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno: La investigación de Mena 2014, citada en Vergara (2021), revela el potencial del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como una solución natural y económica para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta planta acuática ha demostrado ser altamente eficiente en la eliminación de contaminantes orgánicos, reduciendo hasta un 70% de la demanda bioquímica de oxígeno en poco tiempo. Estos resultados posicionan al jacinto de agua como una alternativa viable y sostenible para comunidades con recursos limitados, especialmente en zonas rurales.

Remoción de fósforo: (Rincón y Millán 2013, citados por Vergara 2021), identificaron una limitación en la remoción de fósforo en humedales artificiales, atribuyéndola a una interacción insuficiente entre el agua y el suelo. Para superar esta restricción, se ha propuesto la sustitución de la grava por materiales como arena o tierra, lo que favorece una mayor retención hidráulica y, por ende, una remoción más eficiente de nutrientes."

Remoción de Nitrógeno: (Mena 2014, como se citó en Vergara 2021) Las diferentes formas químicas del nitrógeno desempeñan un papel fundamental en los procesos ecológicos de los humedales., destaca la importancia del amonio, nitrito y nitrato como las principales especies nitrogenadas en fase acuosa de estos ecosistemas. Asimismo, señala la presencia de compuestos nitrogenados gaseosos, como el óxido nitroso y el óxido nítrico, los cuales pueden influir en la dinámica atmosférica y contribuir a la formación de contaminantes.

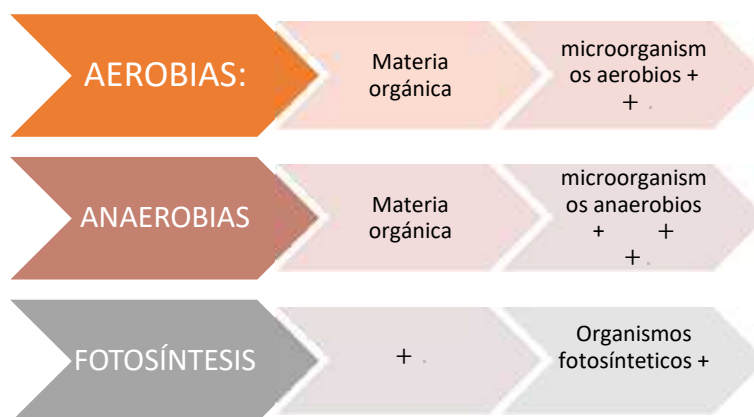
Sólidos Suspendidos: (Rincón y Millán 2013, citados por Vergara 2021), analizaron que la vegetación y el lecho filtrante son factores clave en la eficiencia de los humedales artificiales para la remoción de sólidos suspendidos. Londoño Cardona y Marín Vanegas (2009) atribuyen esta eficiencia a procesos como la sedimentación, precipitación y adsorción. Por su parte, sugieren que una densa cobertura vegetal y un lecho filtrante de tamaño adecuado (10-15 mm) son fundamentales para optimizar la retención de sólidos en estos sistemas.

Beneficios Ambientales Del Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas: Los beneficios ambientales del tratamiento de aguas residuales, según Freeman (1982), evolucionan en tres etapas. Inicialmente, procesos invisibles a simple vista, como los físicos, químicos y biológicos, purifican el agua. Posteriormente, se produce una transición hacia beneficios más tangibles, como la mejora de la calidad del agua para actividades recreativas y una mayor visibilidad paisajística. Finalmente, estos cambios se traducen en una mejor calidad de vida y salud para las personas.

Procesos Básicos De Tratamiento Biológico: De acuerdo con Arango (2003) La biodegradación de la materia orgánica en aguas residuales se logra mediante diversos procesos biológicos. Los lechos bacterianos y los lodos activados son ejemplos de sistemas que emplean cultivos microbianos para oxidar la materia orgánica y convertirla en compuestos más simples. Esta oxidación biológica, es más eficaz que los tratamientos físicos y químicos convencionales.

Estequiometría: Como señala Merli & Ricciuti (2009) Las reacciones bioquímicas que ocurren en los tratamientos biológicos son sensibles a las condiciones ambientales y a la composición del agua residual. La estequiometría de estas reacciones varía considerablemente dependiendo de los microorganismos presentes y de los compuestos a tratar. Las reacciones típicas son:

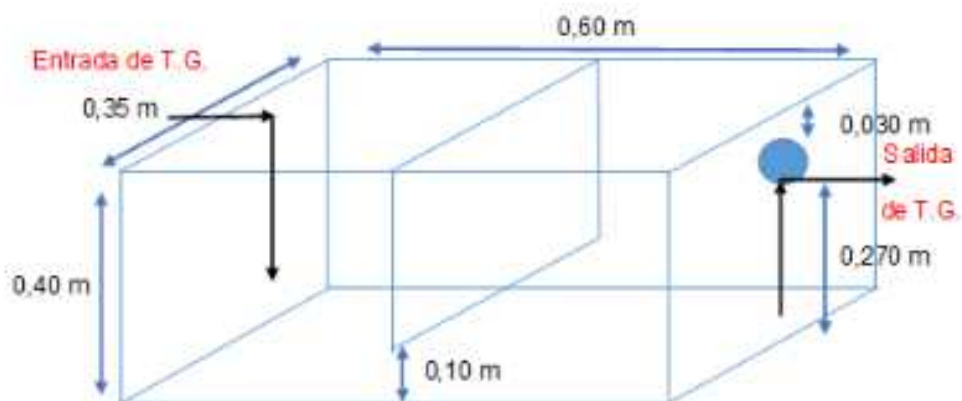
Figura 7. Reacciones de microorganismos presentes por especie



Fuente. Merli & Ricciuti, 2009

Trampa de grasas: Tiene la función de retener los residuos de aceites, jabones y demás grasas que contaminan el agua, puede tener una o dos cámaras dependiendo del flujo de agua residual continuo.

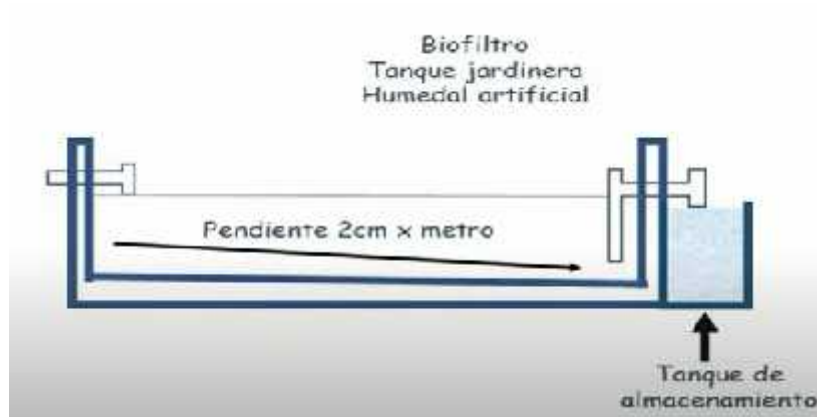
Figura 8. Trampa de grasas



Fuente. Chinchilla, 2015

Taque de almacenamiento o maduración: Con un tanque de almacenamiento puede llevarse a cabo procesos complementarios en un sistema de biofiltros añadiendo mejor depuración del nitrógeno, el fosforo y otros contaminantes presentes en el agua gracias a diversas especies de plantas acuáticas flotantes como el lirio acuático, el helecho de agua, el trébol de agua, y algas microscópicas.

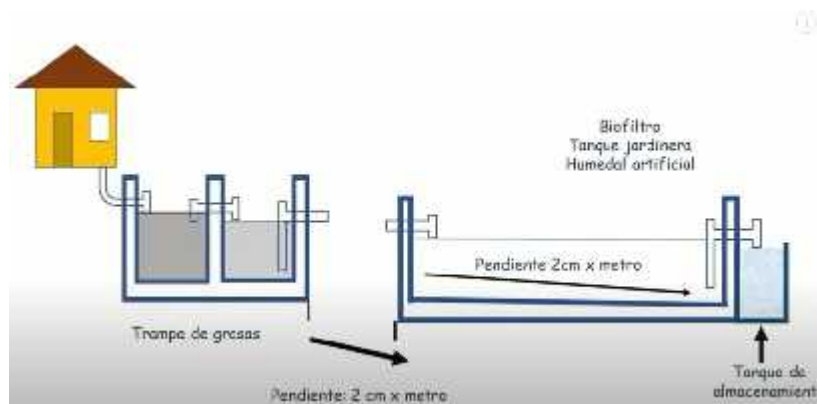
Figura 9. Tanque de almacenamiento



Fuente. Chinchilla, 2015

Diseño de un sistema de bóifltros de una vivienda sin sistema de alcantarillado publico

Figura 10. Sistema de bóifltro: trampa de grasas, humedal artificial y tanque de almacenamiento



Fuente. Chinchilla, 2015

Marco normativo

Ley 142 de 1994, dispone que la prestación del servicio público de saneamiento básico es obligatoria, abarcando el tratamiento y la disposición final de las aguas residuales domésticas.

Decreto 3930 de 2010, regula la calidad de las aguas residuales y los vertimientos al agua y establece los estándares de calidad que deben cumplirse antes de su vertimiento. Este decreto también establece los requisitos y procedimientos para la obtención de permisos de vertimiento.

Decreto 1594 de 1984, El Decreto 1594 de 1994 reguló los usos del recurso hídrico y estableció estándares de calidad para las aguas residuales vertidas en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado.

Ley 373 de 1997, Esta ley define las estrategias y acciones necesarias para reducir el desperdicio de agua a nivel nacional.

Resolución 0631 de 2015, Mediante la Resolución 631 de 2015 se establecen los criterios de calidad que deben cumplir las descargas de aguas residuales, tanto en cuerpos de agua superficiales como en redes de alcantarillado.

Resolución 1207 de las 2014, La Resolución 1207 de 2014 establece las normas para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas, promoviendo su reutilización en diversas actividades.

Resolución 0330 de 2017, adaptación Al Reglamento Técnico Par El Sector Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS

Metodología

Método

Con el fin de cumplir los objetivos en este proyecto se adoptó una metodología de investigación mixta, la cual permitió diseñar de manera integral el sistema de biofiltros a través del estudio del caso práctico en la vereda Ambalá, con la cual se busca desarrollar una solución sostenible y eficiente que contribuya a la protección de los recursos hídricos en zonas rurales. Como parte del proceso, se llevaron a cabo una serie de visitas a la vivienda en las cuales se logró realizar una caracterización inicial del estado del vertimiento de aguas residuales, seguido de una encuesta aplicada a todos los integrantes del núcleo familiar, que permitió conocer los hábitos de consumo de agua en el día a día. Seguido de esta información, se realiza una revisión de literatura que nos permita determinar los parámetros del diseño del sistema de biofiltros.

Tipo de estudio

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), esta investigación se clasifica como aplicada, ya que busca generar conocimiento útil para resolver un problema específico y contribuir al desarrollo científico y tecnológico. "Se trata de una investigación aplicada que combina conocimientos teóricos y prácticos para generar soluciones innovadoras a un problema real. Al diseñar y construir un sistema de biofiltración, no solo resolvemos un problema específico, sino que también contribuimos al avance del conocimiento en el campo del tratamiento de aguas residuales y la protección ambiental.

El trabajo de campo se realiza mediante la recopilación de datos necesarios de la vivienda de estudio para así poder realizar un sistema no convencional para la remediación del agua residual doméstica.

Alcance de la investigación

Esta investigación combina métodos descriptivos, exploratorios y propositivos para desarrollar soluciones innovadoras y asequibles para el tratamiento de aguas residuales a pequeña escala, utilizando tecnologías alternativas. El trabajo se lleva a cabo mediante investigaciones de campo y recolección de datos de información tras conocer la actual situación de los vertimientos de aguas residuales en las zonas sin red de sistema de alcantarillado ni disposición final de aguas residuales.

Población objetivo

La vivienda seleccionada para este estudio es representativa de las viviendas unifamiliares ubicadas en zonas rurales altas de Ibagué, como la vereda de Ambalá.

El agua residual generada en esta vivienda servirá como población a investigar para analizar las características y el tratamiento de las aguas residuales domésticas en este tipo de asentamientos.

Vivienda de estudio

La vivienda de estudio se encuentra localizada en la parte alta de la vereda Ambalá, correspondiente a las siguientes coordenadas latitud 4.487765 y longitud -75.202117

Recolección de datos

Entrevistas: realizar entrevistas estructuradas con los residentes de la vivienda para obtener información sobre sus hábitos de uso de agua, la disposición de aguas residuales y sus expectativas respecto al sistema de biofiltración

Observación directa y registro de datos cuantitativo: observar directamente el uso del agua de la vivienda y como se manejan las aguas residuales.

Fases de la investigación

El desarrollo del proyecto se realizó en tres diferentes fases específicamente de la siguiente manera:

Fase 1: caracterización y parámetros del biofiltro

En esta fase inicial se realizó una caracterización de las Aguas Residuales Domesticas (ARD) teniendo en cuenta las concentraciones contaminantes presentes en las ARD se definieron los componentes fisicoquímicos y microbiológicos de las ARD y se establecieron los procesos apropiados para la depuración de la totalidad de los desechos líquidos incorporados en tratamientos de ARD adaptados a baja escala.

También, se realizó una encuesta dirigida a los habitantes de la vivienda que permitió evaluar factores como los hábitos de consumo de agua y el tipo de vivienda. Además, se especificaron de los criterios de diseño necesarios para el sistema más adecuado de tratamiento a las aguas residuales (AR) de la vivienda, lo que permitió determinar las etapas y el dimensionamiento del biofiltro en función de las remociones de materia orgánica, nutrientes y patógenos presentes.

Fase 2: Selección de especies para la filtración biológica.

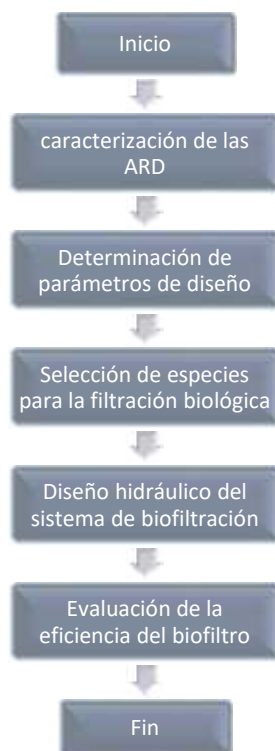
Mediante una revisión de literatura científica se analizaron múltiples procesos de tratamientos de aguas residuales domésticas que utilizaron diferentes especies de plantas fitorremediadoras para realizar la depuración de los contaminantes, en esta fase se ejecuta una exploración para definir cuales plantas y microorganismos son los más adaptables para el diseño, comparando las diferencias en aspectos como la capacidad de remoción de contaminantes, adaptabilidad al diseño y ventajas para la fitorremediación.

Fase 3: Diseño hidráulico del sistema de biofiltros y aspectos técnicos de construcción y operación del humedal

En esta etapa se llevarán a cabo los cálculos para el diseño hidráulico del sistema de tratamiento, como el dimensionamiento del diseño físico del biofiltro, calculando el volumen a partir del cálculo del caudal, considerando variables como el tiempo de retención hidráulico, la carga orgánica, y la distribución del flujo.

La revisión bibliográfica servirá como punto de partida para desarrollar especificaciones técnicas detalladas que aseguren la correcta construcción y operación del biofiltro. Se determinarán con precisión las dimensiones de cada componente, los materiales a utilizar buscarán promover el desarrollo de biopelículas, facilitando la operación y mantenimiento del sistema, también se determinarán los procedimientos constructivos a seguir. Esta rigurosidad en el diseño permitirá optimizar el desempeño del sistema, minimizar los costos de mantenimiento a largo plazo y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

Figura 11. Proceso Metodológico



Fuente. Autor.

Resultados

Primer resultado

Caracterización de aguas residuales domesticas

La Resolución 631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los estándares de calidad y los límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas a cuerpos de agua superficiales, con el objetivo de proteger los ecosistemas acuáticos y garantizar la salud pública.

Tabla 17. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas

Parámetro	Unidades	Aguas residuales domesticas AR individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares
pH	Unidades de pH	6,00 A 9,00
Demanda Química de oxígeno (DQO)	$\frac{m}{L} O_2$	200,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	$\frac{m}{L}$	100,00
Sólidos Sedimentables	$\frac{m}{L}$	5,00
Grasas y Aceites	$\frac{L}{m}$	20,00

Fuente. Resolución 0631, 2015

La revisión bibliográfica permitió obtener información sobre la eficiencia de los biofiltros con humedales artificiales para la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas.

Los rendimientos esperados utilizando los diferentes tipos de humedales artificiales se analizaron de las fichas técnicas descritas en el anexo 2 del Título E del Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico RAS, comparando los humedales construidos de flujo subsuperficial, de flujo superficial y de flujo vertical.

Se analizaron los resultados esperados para cada tipo de humedal, encontrando reducciones notorias para zonas de piso térmico frío utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial, las remociones promedio varían entre los siguientes resultados: 85% hasta 95% de remoción en los sólidos suspendidos, 80% hasta 90% en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), 75% hasta 85% en la demanda química de oxígeno DQO. Además, de las disminuciones de nutrientes con remociones de nitrógeno total de 20% hasta 40%, y fosforo total de 15% hasta 30%. La eficacia de remoción de coliformes totales puede llegar a ser de 90% hasta 99% indicando una adecuada desinfección del efluente.

Estos resultados posicionan el uso de los biofiltro con humedales artificiales de flujo subsuperficial como una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizable a diferentes escalas en comunidades rurales que se encuentren en las zonas húmedas o piso térmico frío el cual va aproximadamente desde los 1900 msnm hasta 2500 metros de altura, implementar un biofiltro ayuda a mejorar las condiciones del agua residual para disminuir la contaminación del medio alrededor de sus viviendas, reduciendo los posibles focos de enfermedades y malos olores. La elección de un pre tratamiento que sea acorde a las condiciones propuestas para el biofiltro de humedal artificial nos llevan a la incorporación de una trampa de grasas, la cual requiere una inversión de bajo costo y ayuda de manera significativa a la vida útil del humedal, ya que si las grasas y los aceites de las aguas residuales domésticas entraran directamente al humedal puede

ocasionar taponamientos del sistema y limitaciones en la actividad microbiana pues estos compuestos al tener contacto con el agua fría pueden sodificarse y limitar el paso de oxígeno.

Como etapa adicional en el sistema de biofiltración se evaluaron maneras de reducir aún más la carga orgánica del efluente al incorporar un tanque de almacenamiento de plantas flotantes las cuales absorben nutrientes como el fósforo y nitrógeno permitiendo mejorar los porcentajes de remoción de estos contaminantes y ayudando a sedimentar los sólidos suspendidos que pudieran pasar derecho por el humedal.

Parámetros del diseño

Demanda de consumo de agua

Para lograr establecer la demanda de agua en la vivienda de estudio, se realizó un diagnóstico inicial utilizando el proceso investigativo por encuesta, el cual permite realizar un análisis de consumo de agua por actividad, frecuencia, número de personas, consumos individuales y consumos totales con el fin de conocer los hábitos de consumo de la vivienda y buscar posibles áreas de mejora. Se realiza la siguiente encuesta a todos los habitantes de la vivienda:

Tabla 18. Respuesta de la encuesta por el número de habitantes de la vivienda

Pregunta	Persona 1: 41 años	Persona 2: 36 años	Persona 3: 14 años
Persona entrevistada	Hombre	Mujer	Hombre
Tu rol en la vivienda es:	Padre	Madre	Hijo
¿Vivienda rural o urbana?	Rural	Rural	Rural
¿Tipo de propiedad?	Casa lote	Casa lote	Casa lote

Actividad productiva asociada, cual	Vivienda productiva, gallinas, 1 vaca, 1 ternero		
¿Cuántas personas viven en la casa?	3	3	3
¿La vivienda tiene energía eléctrica?	Si	Si	Si
¿La vivienda tiene red de agua potable?	No	No	No
¿La vivienda tiene red de alcantarillado público?	No	No	No
¿La vivienda tiene pozo séptico, baño seco u otro?	No	No	No
¿Cree que es importante hacer uso adecuado del agua?	Si	Si	Si
¿Considera que tiene buenos hábitos de uso adecuado del agua?	Si	Si	Si
¿Está dispuesto a implementar mejores hábitos para hacer un uso adecuado del agua?	Si	Si	Si
¿Tiene conocimiento de hábitos que sirven para hacer uso adecuado del agua?	Si, cerrar la llave al lavar la loza, cepillarme o lavarme las manos. No dejar la llave abierta.	Si, usar poca agua para lavar la casa, no dejar la llave corriendo agua cuando no se necesita	Si, cerrar la llave del agua mientras te lavas los dientes
¿La vivienda realiza recolección de agua lluvia?	No	No	No
Tienes instalado algún sistema de economizador de agua, ¿cuál?	No	No	No

¿Cuántos inodoros tiene la vivienda?	1	1	1
¿Cuántos lavamanos tiene la vivienda?		No tiene lavamanos	
¿Cuántas duchas tiene la vivienda?	1	1	1
¿Cuántos lavaplatos tiene la vivienda?		No tiene lavaplatos	
¿Describe cómo lavas los platos? Llave a choro___ Filtro economizador___		En el lavadero, llave a chorro	
¿Cuántos lavaderos tiene la vivienda?	1	1	1
¿Cuántas lavadoras tiene la vivienda?	1	1	1
¿Cómo es tu lavadora? Es un modelo con más de cinco años		No tiene lavadora	
¿Es un modelo con economizador de agua?		No tiene lavadora	
¿Cuántas veces al día se lava los dientes en casa?	2 veces	3 veces	3 veces
¿Al lavarse los dientes cierra la llave del agua mientras se cepilla los dientes?	Si	Si	Si
¿Cuántas veces al día se ducha en casa?	2 veces	1 ves	1 ves
¿Cuánto tiempo demora abierta la llave del agua mientras se ducha?	7 min aprox	10 mins aprox	10 mins aprox

¿Al ducharse cierra la llave del agua mientras se enjabona?	No	Si	Si
¿Cuántas veces al día se lava la loza en su casa?	3 veces / día	3 veces / día	3 veces / día
¿Al lavar la loza cierra la llave mientras enjabona los utensilios de cocina?	Si	Si	Si
¿Cuál es el consumo de agua de la lavadora?		No tiene lavadora	
¿Al lavar la ropa en la lavadora utiliza carga completa?		No tiene lavadora	
¿Cuántas veces en la semana lava la ropa?	2 veces	2 a 3 veces	Nose
¿Cuántas veces al día descarga el baño de la casa?	4 veces	4 a 5 veces	5 veces
¿Descarga en el inodoro toallas higiénicas, condones, tampones, algodones, medicamentos vencidos, o diferentes tipos de residuos?	No	No	No
¿Se lava las manos cada vez que entra al baño?	No	Si	Si
¿Cierra la llave del lavamanos cuando se enjabona las manos?	No	Si	Si
¿Cuántas veces en la semana realiza limpieza de la vivienda?		7 días / semana	
¿Con que frecuencia realiza riego de las plantas de su vivienda?		Cada 2 días	

¿Hace uso de agua para otro tipo de actividad a parte de las domésticas?

1 vaca, 1 ternero, 7 gallinas

Nota. Resultados encuesta con los habitantes de la vivienda

El análisis cualitativo permite identificar cuáles son las actividades que más agua consumen en la vivienda como ducharse, lavar la ropa, regar las plantas y demás, se analiza si existe alguna relación entre la frecuencia con que se realizan ciertas actividades y el consumo total del agua, se evalúa si el número de personas que realizan cada actividad influye significativamente en el consumo. El análisis cuantitativo permite identificar los picos de consumo de los momentos del día o semana en los que el uso del agua incrementa significativamente, al igual que lograr calcular el consumo promedio por persona y realizar estimaciones periódicas.

Los valores del uso del agua por actividad según el acuerdo 84 de 2010

Tabla 19. Consumo de agua en la vivienda estudio

Actividad	Consumo de agua por actividad / día	Frecuencia	Número de personas por actividad	Total de consumo de agua persona / Mes	Total de consumo de agua de la vivienda / Mes
Lavar ropa	90 litros	3 veces / semana	3	360 litros	1.080 litros
Limpia la casa	15 litros	1 vez/día	1	150 litros	450 litros
Lavar losa	100 litros	3 veces / día	1	1.000 litros	3.000 litros
Cocinar	8 litros	3 veces / día	1	80 litros	240 litros
Ducharse	70 litros	1 vez / día	3	2.100 litros	6.300 litros
Lavarse los dientes	1,5 litros	3 veces / día	3	45 litros	135 litros
Lavarse las manos	1,5 litros	4 a 5 veces /día	1	45 litros	135 litros
Afeitarse	3 litros	Cada 2 días	1		600 litros

Descargar la cisterna	15 litros	4 a 5 veces / día	3	450 litros	1.350 litros
Riego de plantas	15 litros	1 vez / día	1	150 litros	450 litros
Beber	1,5 litros	1 vez / día	3	45 litros	135 litros
TOTAL				4.425 litros / persona /	13.875 litros / vivienda / mes

Nota. Análisis de consumo de agua

Parámetros de diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFS)

Caudal Agua Residual Domestica

Para determinar el caudal de las aguas residuales domesticas de la vivienda estudio, se aplica la normativa de la resolución 0330 de 2017, utilizando el método de proyección de población, en el cual se realiza un estudio estadístico que considera factores como el número de habitantes, el tipo de vivienda, los hábitos de consumo y otros parámetros relevantes, para la realización del cálculo del caudal de aguas residuales de la vivienda, se debe tener en cuenta la población promedio que puede llegar alojar el hogar.

$$Q_A = \frac{C_R \times P \times D_N}{86400}$$

Donde,

Q_A = Caudal de aguas residuales domesticas (L/seg)

C_R = Coeficiente de retorno (adimensional)

P = Nuemro de habitantes proyectados (hab)

D = Dotacion de agua proyectada por habitante (L/hab. día)

Área superficial del humedal:

$$A = \frac{C}{C_s}$$

Donde,

As = Área Superficial (m^2)

C = Carga (gr/día)

Cs = Carga Hidráulica ($m^3/g /d$)

El Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico (RAS, 2010), en su Título E, página 35, establece como valores de referencia para el diseño de humedales subsuperficiales una carga hidráulica de 0.032 $m^3/L/día$ en zonas frías o con espacio limitado, y de 0.021 $m^3/L/día$ en zonas con restricciones de espacio más severas. Estos valores son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Determinación de la carga:

$$C = Q_A \times D$$

Donde,

C = carga (gr/día)

Q_A = Caudal de aguas residuales domesticas (L/seg)

DBO = Demanda Biológica de Oxígeno (Tomado de la tabla 4)

Dimensiones del humedal

A = Ancho

$$A = \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

L = Largo

$$L = 2A$$

Área del humedal

$$\text{área del humedal} = A \times L$$

Profundidad del humedal

De acuerdo con Parrao (2018), la profundidad del humedal esta es un factor determinante en el funcionamiento de un humedal, ya que condiciona la cantidad de agua almacenada, este parámetro se ve condicionado por la profundidad radicular de la vegetación, variando según las características de las especies seleccionadas.

Tabla 20. *Extensión radicular de las plantas emergentes*

Plantas emergentes	Crecimiento radicular en el sustrato
Scirpus Spp	0.7 m
Phragmites Australis	>0.6 m
Typha Latifoidea	0.3 m

Fuente. Parrao (2018)

Diseño de Trampa de grasas

Caudal trampa de grasas:

$$Q = 0.3 \sqrt{\Sigma p}$$

$$Q = 0.3 \sqrt{\Sigma p}$$

Donde:

Q = Caudal máximo en Lt/seg.

p = Suma de todas las unidades de gasto a ser atendido por la trampa de grasa (tabla nº 8)

-El volumen de la trampa de grasa se calculará para un período de retención de 2,5 minutos.

Volumen trampa de grasas:

$$V = Q \times T$$

Área superficial:

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

Donde,

Va = velocidad ascendente según el RAS 0,004 m/seg

Largo y ancho de la trampa de grasas en relación 1:1

$$A = L \times B$$

$$L = B$$

$$B = \sqrt{\frac{A}{1}}$$

Donde,

L= largo de la trampa de grasas

B = ancho de la trampa de grasas

Profundidad de la trampa de grasas:

$$H = \frac{V}{A}$$

Donde,

H = profundidad trampa de grasas

As= Área superficial

Segundo resultado

La selección de especies para el sistema de biofiltros es una parte fundamental para determinar la eficacia del mismo, se seleccionan las plantas más favorables de la revisión de literatura, adaptables a las características y condiciones climáticas de las zonas aledañas como quebradas, humedales y ríos, priorizando aquellos con potencial para la fitoremediación y aplicación en humedales artificiales.

Tabla 21. Eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales

Revisión bibliográfica	% de Remoción de humedales artificiales			
	DBO5	DQO	SST	CF
León y Lucero (2009) evaluaron la efectividad del jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>), la lenteja de agua (<i>Lemna gibba</i>) y el helecho acuático (<i>Azolla filiculoides</i>) en la depuración de aguas residuales domésticas en comunidades y hogares del cantón Cotacachi, Ecuador.	87%	76%	95%	
Gómez (2017) evaluó la efectividad de humedales artificiales verticales, utilizando las especies <i>Cyperus alternifolius</i> y <i>Chrysopogon zizanioides</i> , para tratar aguas residuales.	97%	91%	86%	95%
Coronel (2016) investigó la capacidad del jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) y la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) para purificar las aguas residuales de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas en Chachapoyas durante el año 2015.	90%	87%	87%	97%
Ayala et al. (2019) evaluaron la capacidad de tres especies acuáticas: jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>), ninfoides sudamericana (<i>Nymphoides humboldtiana</i>) y berro de agua (<i>Nasturtium officinale</i>) para tratar aguas residuales domésticas a través de sistemas de fitorremediación.	84%	84%	80%	83%

Núñez (2016) exploró la posibilidad de tratar las aguas residuales domésticas a nivel doméstico utilizando humedales artificiales, específicamente empleando la especie <i>Cyperus papyrus</i> .	96%	96%	55%	99%
--	-----	-----	-----	-----

Nota. Revisión bibliográfica de sistemas de tratamientos de AR, utilizando humedales artificiales.

La selección del papiro (*Cyperus papyrus*) como planta macrófita emergente para el humedal artificial (HAFSS) se basa en su notable capacidad para depurar aguas residuales. Según Núñez (2016) esta especie exhibe un vigoroso crecimiento y un extenso sistema radicular, lo que le permite absorber eficientemente una amplia gama de contaminantes removiendo hasta 96% de DBO5, 96% de DQO, 55% de SST y 99% de CF. Además, su rusticidad y adaptabilidad a diversos ambientes lo convierten en una opción resiliente y sostenible para sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Con el fin de compensar el bajo porcentaje de remoción de SST del tratamiento de HAFSS con la planta papiro se opta por la instalación de un tanque de maduración o tanque de almacenamiento, surtido con plantas flotantes como lo son el Jacinto de agua y la lenteja de agua que permita mejorar la eficiencia de nuestro sistema de biofiltración. León y Lucero (2009) expresan en su estudio que las combinaciones de estas plantas tienen una extraordinaria capacidad para absorber contaminantes y su rápido crecimiento pueden abarcar grandes cantidades de superficie en poco tiempo. Estas plantas acuáticas flotantes, al proliferar rápidamente en diversos ambientes, contribuye de manera eficaz a la purificación del agua, convirtiéndose en una solución sostenible y económica para el tratamiento de AR.

Tabla 22. Plantas macrófitas seleccionadas para el HAFSS

Tratamiento del biofiltro	Especie de macrófita	Ventajas para la fitorremediación	Adaptabilidad al humedal	Capacidad de remoción de contaminantes
HAFSS	<i>Cyperus Papyrus</i> o Papiro (Macrófita emergente)	Resistencia a plagas, adaptabilidad a climas tropicales, sistema radicular extenso.	Adecuado para zonas con alta humedad y suelos orgánicos, tolera inundaciones prolongadas.	Eficiente en la estabilización de sedimentos y la remoción de metales pesados.
Tanque de almacenamiento	<i>Eichhornia crassipes</i> o Jacinto de agua (Macrófita flotante)	Gran capacidad de absorber nutrientes (N, P, Ca, K, etcétera) y acumular nutrientes del medio acuático, con un alto potencial como fertilizante orgánico.	Se desarrolla rápidamente en cuerpos de agua cálidos y con alta concentración de nutrientes, creando densas coberturas vegetales.	Eficiente en la remoción de nitrógeno, fósforo y metales pesados.
Tanque de almacenamiento	<i>Lemna Minor</i> o Lenteja de agua (Macrófita flotante)	Alta tasa de crecimiento, amplia tolerancia a condiciones ambientales, capacidad de absorber nutrientes.	Excelente adaptación a aguas estancadas y con poca profundidad, alta tolerancia a variaciones de temperatura y pH.	Alta capacidad de absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como de metales pesados como cadmio y plomo.

Nota. Ventajas de las especies de plantas macrófitas de los mejores porcentajes de remoción en los estudios de la revisión bibliográfica

Tercer resultado

Diseño del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFS)

Caudal Agua Residual Domestica

$$Q_A = \frac{C_R \times P \times D_N}{86400}$$

$$C_R = 0,85$$

$$P = 5 \text{ (hab)}$$

$$D_N = 120 \text{ (L/hab. día)}$$

86400 = número segundos por día (seg/día)

Reemplazando las constantes se obtiene el valor de caudal de aguas residuales

$$Q_A = \frac{0,85 \times 5 \text{ ha} \times 120 \left(\frac{\text{L}}{\text{ha} \cdot \text{d}} \right)}{86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}}$$

$$Q_A = \frac{0,85 \times 5 \text{ ha} \times 120 \left(\frac{\text{L}}{\text{ha} \cdot \text{d}} \right)}{86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}}$$

$$Q_A = 0,0060 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Según la resolución 0330 de 2017, cuando el caudal del diseño es menor a 1,5 L/seg debe adoptarse este valor como caudal del diseño.

$$Q_A = 1,5 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Área superficial del humedal:

$$A = \frac{C}{C_s}$$

Donde,

A_s = Área Superficial (m^2)

C = Carga (gr/día)

C_s = Carga Hidráulica ($m^2/g /d$)

Carga hidráulica de 0.032 $m^2/L/día$ en zonas frías o con espacio limitado.

Determinación de la carga:

$$C = Q_A \times D$$

Donde,

C = carga (gr/día)

Q_A = Caudal de aguas residuales domesticas (L/seg)

DBO = Demanda Biológica de Oxígeno (Tomado de la tabla 4)

Reemplazando los valores nos queda que,

$$D = 285.1 \frac{m}{L}$$

$$Q_A = 1,5 \frac{L}{s}$$

$$C = 1,5 \frac{L}{s} \times 285,1 \frac{m}{L}$$

$$C = 427,7 \frac{m}{d}$$

Reemplazando los valores en la ecuación del área superficial

$$A = \frac{427,7 \frac{g}{d}}{\frac{m^2}{0,032 \frac{g}{dia}}}$$

$$A = 1,4 m^2$$

Dimensiones del humedal

A = Ancho

$$A = \left(\frac{A}{2}\right)^{0,5}$$

$$A = \left(\frac{13,4 m^2}{2}\right)^{0,5}$$

$$A = 2,6 m$$

L = Largo

$$L = 2A$$

$$L = 2 \times 2,6$$

$$L = 5,2 m$$

Área del humedal:

$$\text{área húmeda} = A \times L$$

$$\text{área húmeda} = 2,6 \text{ m} \times 5,2 \text{ m}$$

$$\text{área húmeda} = 13,5 \text{ m}^2$$

Profundidad de la Humedal Artificial:

$$H = 0.7 \text{ m}$$

Según tabla 17. Extensión de raíces de plantas emergentes para humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Diseño de Trampa de grasas

Caudal trampa de grasas:

$$Q = 0.3 \sqrt{\sum p}$$

Donde:

Q = Caudal máximo en Lt/seg.

p = Suma de todas las unidades de gasto a ser atendido por la trampa de grasa (tabla nº 8)

-El volumen de la trampa de grasa se calculará para un período de retención de 2,5 minutos.

$$Q = 0.3 \sqrt{5}$$

$$Q = 0,671 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$Q = 0,0067 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Volumen trampa de grasas:

$$V = Q \times T$$

Q = Caudal máximo en Lt/seg.

Tr = tiempo de retención 2,5 min = 150 seg

$$V = 0,0067 \frac{m^3}{s} \times 150 s$$

$$V = 1,005 m^3$$

Área superficial:

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

Entonces,

$$A = \frac{0,0067 \frac{m^3}{s}}{0,004 \frac{m}{s}}$$

$$A = 1,7 m^2$$

Donde,

V_a = velocidad ascendente según el RAS 0,004 m/seg

Largo y ancho de la trampa de grasas en relación 1:1

$$A = L \times B$$

$$L = B$$

$$B = \sqrt{\frac{A}{1}}$$

Donde,

L = largo de la trampa de grasas

B = ancho de la trampa de grasas

$$B = \sqrt{\frac{1,7m^2}{1}} = 1,30 m$$

$$L = 1,30 m$$

Profundidad de la trampa de grasas:

$$H = \frac{V}{A}$$

Donde,

H = profundidad trampa de grasas

$$H = \frac{1,005 m^3}{1,7 m^2} = 0,6 m$$

De acuerdo a los parámetros establecidos por el Reglamento técnico de Aguas residuales y Saneamiento básico RAS (2010) la profundidad mínima de la trampa de grasa debe ser 0.8m, por lo que se recomienda considerar estos valores, con la intención de mantener un diseño bajo las normativas determinadas.

Aspectos técnicos de construcción y operación del humedal

Basado en el prototipo de Parrao (2018), se implementó un humedal artificial para tratar las aguas residuales de una vivienda individual. Este sistema, compuesto por una serie de capas de grava y vegetación, recibe las aguas grises y negras a través de un sistema de tubería de PVC.

-) Impermeabilización del humedal con material aislante: geomembrana de PVC de espesor de 0,2 mm
-) Se emplearon tuberías de PVC de 110 mm de diámetro con perforaciones en la parte inferior para la alimentación del humedal.

-) Para la salida del agua tratada, se utilizó un tubo de PVC de 32 cm de diámetro con tres ramales de distribución.
-) Se utilizó material granular de diferentes tamaños para el relleno del humedal: piedra de 150 mm en las zonas de transición y grava de río de 25 mm en el lecho de biofiltración.
-) Se estableció una población de *Scirpus spp.* en el humedal, con una densidad de plantación de 3 a 6 individuos por metro cuadrado.

Aspectos técnicos de la Trampa de Grasas

La ficha técnica del reglamento de aguas residuales y saneamiento básico RAS (2010) estipula los siguientes aspectos del diseño:

- Para garantizar un funcionamiento óptimo, los biofiltros deben instalarse lo más cerca posible del origen de las aguas residuales, es decir, cerca de la cocina. Esta ubicación estratégica permite interceptar las grasas y otros sólidos antes de que ingresen a sistemas de tratamiento posteriores como tanques sépticos o sedimentadores primarios, previniendo así obstrucciones, adherencia a tuberías y acumulación de residuos que podrían generar malos olores.
- Para garantizar una adecuada retención de grasas, el biofiltro debe tener una capacidad de almacenamiento de grasa, medida en kilogramos, que sea al menos un cuarto del caudal máximo de agua residual que pueda recibir por hora, expresado en litros por minuto.

El diseño del tanque del biofiltro debe cumplir con los siguientes requisitos:

- un área de al menos 0.25 metros cuadrados por cada litro por segundo de caudal, una proporción entre el ancho y el largo que oscile entre 1:4 y 1:18, y una velocidad ascendente mínima del líquido de 4 milímetros por segundo.

- La forma del biofiltro debe ser alargada, con una relación entre el largo y el ancho del área superficial que varíe entre 2:1 y 3:2.
- La profundidad mínima del tanque debe ser de 80 centímetros
- La entrada al tanque debe ser a través de una curva de 90 grados (codo) con un diámetro de al menos 75 milímetros.
- La salida del tanque se realizará mediante una unión en forma de T, con un diámetro mínimo de 75 milímetros.
- El extremo inferior del codo de entrada debe prolongarse hasta una profundidad de 0,15 metros por debajo de la superficie del líquido.
- Se requiere un desnivel mínimo de 0,05 metros entre la tubería de alimentación y la de descarga.
- El dispositivo de salida debe contar con una abertura superior para ventilación que no exceda los 0,05 metros por debajo de la losa del techo.
- La tubería de salida debe ubicarse a una distancia del fondo comprendida entre 0,075 y 0,15 metros.
- Se requiere un espacio aéreo mínimo de 0.3 metros entre el nivel del líquido y la superficie inferior de la tapa.
- La geometría de la trampa debe ser troncocónica o piramidal invertida, con una pared vertical en la sección de salida. La base horizontal deberá tener dimensiones mínimas de 0.25 metros por lado en caso de ser cuadrada o un diámetro mínimo de 0.25 metros en caso de ser circular. La inclinación de las paredes laterales debe estar comprendida entre 45° y 60° respecto a la horizontal.

- Se autoriza el diseño de trampas con un compartimento adicional destinado al almacenamiento de grasas en aquellos casos donde la capacidad total exceda los 0.6 metros cúbicos o cuando el establecimiento opere de manera continua durante más de 16 horas diarias.
- Se deberá instalar un vertedor de rebose a una altura de 0.05 metros por encima del nivel del agua para conectar la trampa de grasa con el compartimento de almacenamiento. El volumen de almacenamiento de grasa en el compartimento deberá ser, como mínimo, un tercio del volumen total de la trampa.
- La capacidad de almacenamiento de grasa de la trampa deberá ser suficiente para garantizar un intervalo adecuado entre cada operación de limpieza.
- Se deberán establecer condiciones de flujo con mínima turbulencia para favorecer la flotación de los materiales grasos.
- Se deberán adoptar medidas para evitar el acceso de insectos, roedores y otros agentes contaminantes.
- Tiempo de retención hidráulica

Tabla 23. Tiempo de retención hidráulica

Tiempo de retención (minutos)	Caudal de entrada (L/s)
3	2 - 9
4	10 – 19
5	20 o más

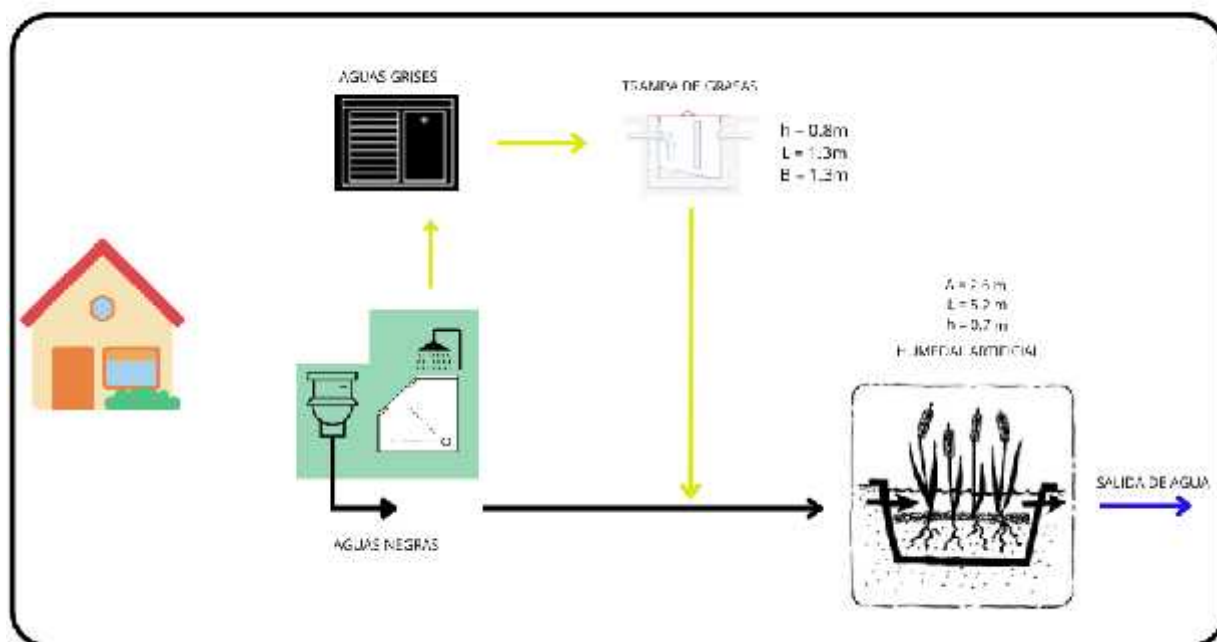
Fuente: RAS (2010)

Tanque de almacenamiento

Se realiza la implementación de un tanque de almacenamiento de agua en el cual se pueda plantar macrófitas flotantes como la lenteja de agua para mejoría en la remoción de contaminantes como nitrógeno y fosforo. Un tanque de almacenamiento de 500 litros de volumen, puede almacenar

agua para los eventos de sequía que se puedan presentar en la finca con el fin de ser utilizada para riego de las plantas o aseo. Igualmente, el tanque de almacenamiento permite tener un efluente constante sin descargas repentinas que puedan afectar el recorrido hacia el afluente cercano.

Figura 12 Esquema del sistema propuesto



Fuente: Autor

Conclusiones

A través del presente trabajo se consiguió evaluar la eficiencia del uso de bío-filtros para sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas ARD con el fin de identificar las etapas más adecuadas para lograr la remoción de contaminantes en para una vivienda de la vereda Ambalá parte alta de la ciudad de Ibagué que no cuenta con sistema de alcantarilla y saneamiento básico. Se analizaron los diferentes tipos de humedales artificiales con relación a los resultados de remociones de contaminantes de tres tipos de humedales artificiales los cuales son humedal artificial de flujo vertical, humedal artificial de flujo superficial y humedal artificial de flujo subsuperficial, identificando el HAFSS como mejor alternativa para diseño de sistema de bío-filtros debido a sus características, modelo de diseño, construcción de bajo costo, operación sencilla y fácil mantenimiento. La selección de plantas emergentes como el papiro se basa en su alta capacidad de remociones hasta 96% en DBO5 Y DQO, 55% en SST y 99% en Coliformes, igualmente que la selección de plantas flotantes como la lenteja de agua y Jacinto de agua demuestran remociones de 87% de DBO5, 76% de DQO y 95% de SST permiten que la combinación de tratamientos lleve a cabo los procesos de remoción de contaminantes más eficientes. El diseño de las fases y sus componentes, el cálculo del recurso hídrico, la demanda de consumo de agua, la encuesta realizada, el cálculo del caudal de agua residual, la determinación de la carga, el diseño de la trampa de grasas, el diseño del HAFSS, las dimensiones del humedal,

el lecho filtrante, el tanque de almacenamiento y los aspectos técnicos de construcción y operación permitieron diseñar el sistema de biofiltración para la vivienda.

Recomendaciones

La demanda de consumo de agua permite identificar cuáles son los consumos elevados de la vivienda y sugerir las siguientes recomendaciones en los hábitos de uso del agua para todos los miembros de la familia:

-) Reduce el tiempo de ducha en los que la llave tiene agua corriendo
-) Utilizar dispositivos ahorradores de agua en la llave del lavaplatos y ducha
-) Cerrar la llave del agua mientras estas cepillándote los dientes y lavándote las manos
-) Ahorra agua al afeitarte llenando de agua un recipiente en vez de dejar la llave corriendo
-) Revisa constantemente gotereo de grifos
-) Evita la evaporación del agua regando a las horas más calorosas, mejor realiza el riego por la mañana o al atardecer
-) Utiliza un barril para recoger el agua lluvia, involucra a todos los miembros de tu hogar en el ahorro de agua.

La frecuencia de limpieza de las trampas de grasa debe ajustarse según la acumulación de grasa observada, considerando factores como el tipo de volumen de residuos generados. las trampas de grasa deben limpiarse cuando la acumulación de grasa alcance al menos el 75% de su capacidad, evitando así la obstrucción y el desbordamiento.

La falta de mantenimiento adecuado en las trampas de grasa provoca una acumulación excesiva de grasas, lo que reduce su eficiencia y permite que estos contaminantes pasen al sistema de alcantarillado. Además, las cargas hidráulicas variables generan turbulencias en la trampa, dificultando la separación de las fases y permitiendo el arrastre de grasas hacia el efluente. Para garantizar un funcionamiento óptimo, es fundamental realizar un mantenimiento regular y evitar descargas abruptas.

Para garantizar la eficiencia y durabilidad de los humedales artificiales, se recomienda realizar inspecciones y limpieza periódica de pretratamientos, canales y tuberías para evitar obstrucciones. Implementar medidas para prevenir daños a las plantas, como cercado y control de plagas, favoreciendo así la salud del ecosistema. Realizar cosechas de biomasa de manera oportuna para optimizar la remoción de nutrientes y evitar la liberación de nutrientes al medio. Eliminar manualmente las malezas para evitar el uso de herbicidas y proteger la biodiversidad. Realizar inspecciones periódicas y aplicar tratamientos fitosanitarios específicos cuando sea necesario, bajo supervisión técnica.

Referencias bibliográficas

Acuerdo 84, 2010 (Consejo de Bogotá) *Consumo de agua al día por persona aproximado*

Alfárez, L., Nieves, N., (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. Revista: Caribeña de Ciencias Sociales.

<https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html/hdl.handle.net/20.500.11763/caribe1906tratamiento-aguas-residuales>

Aragón R., Parra, A. y Peña, M. (2015). Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales. Google académico. Recuperado de:

<http://revistas.sena.edu.co/index.php/agroeccyt/article/view/932>

Arango. (2003). *EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL SISTEMA TOHÁ EN LA REMOCIÓN DE Salmonella EN AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS*. Obtenido de <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Arango%20Jessica.pdf>

Artega. (2018). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES*. Obtenido de <https://www.biopasos.com/biblioteca/Propuesta-metodologica-construccions-humedales-artificiales.pdf>

Ayala R., Calderón E., Rascón J., Gomes V. y Collazos R., (2019). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable, 2(3), pág:48-53.

Castillo, J. (1990). *El uso del lirio acuatico (Eichhornia crassipes) en el trataiento de aguas residuales*. Obtenido de Tecnologia en marcha, Vol 10 :

<file:///C:/Users/FM%20TECNOLOG%C3%8DA/Downloads/Dialnet-ElUsoDelLirioAcuaticoEichhorniaCrassipesEnElTratam-5678790.pdf>

Centro de Información Municipal para la Planeación Participativa. (2014). Integración de la población a los servicios de agua potable y saneamiento básico Ibagué. CIMPP Ibagué.

[ProjectSummary \(ibague.gov.co\)](ProjectSummary(ibague.gov.co))

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. 2003. Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa. Lima.

CEPIS. (2003). Especificaciones Técnicas para el Diseño de Trampa de Grasa. In: Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural. Lima. p. 7.

<file:///C:/Users/FM%20TECNOLOG%C3%8DA/Downloads/ESPECIFICACIONES%20T%C3%89CNICAS%20PARA%20EL%20DISE%C3%91O%20DE%20TRAMPA%20DE%20GRASA.pdf>

Chinchilla, M. (2015). *Relación de parámetros de diseño de trampas de grasas (desengrasadores) versus su eficiencia, en aguas residuales comerciales*.

CIMPP. (2021). Centro de Información Municipal Para la Planeación Participativa.

INTEGRACIÓN DE LA POBLACIÓN A LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO IBAGUÉ. <https://cimpp.ibague.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/2020730010019.pdf>

CIMPP. (2021). *Centro de Información Municipal Para la Planeación Participativa* . Obtenido de INTEGRACIÓN DE LA POBLACIÓN A LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO IBAGUÉ: <https://cimpp.ibague.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/2020730010019.pdf>

Congreso de la República de Colombia (julio 11, 1994). Ley 142. régimen de los servicios públicos domiciliarios.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Coronel E., (2016). Eficiencia del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y lentejas de agua (*Lemna minor*) en el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas-2015

Ecoviviendas (2022). *Biófiltro: Aspectos técnicos del funcionamiento y mantenimiento*. [video]. YouTube.

https://www.youtube.com/watch?v=WJFNIVCP3M&ab_channel=Econvivencias

Fernandez, J. (2004). *Manual de Fitodepuración*. Obtenido de Madrid: Universidad: https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Ferro, Encizo, A. (2012). Evaluación De Sostenibilidad Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales Del Corregimiento De Felidia Zona Rural Del Municipio De Santiago De Cali. [Trabajo de grado, Universidad del Valle]. Biblioteca virtual Univalle

Franceys, R, Pickford, J Y Reed, R. 1992. A Guide to the Development of on-Site Sanitation. WHO.

Freeman. (1982). *Control de la contaminación del aire y el agua una evaluación de costo-beneficio*. New York: Wilye .

- Gómez Y., (2017). Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento de aguas servidas.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, M. . (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico : Sexta Edic.
- Herrera, W. Rey, Z.(2018). Implementación de biofiltro como agente depurador de aguas residuales del conjunto Aranjuez ii, en el municipio de Villavicencio meta.
<https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5cd7c91c-034a-4bea-9a7a-b67b806a508f/content>
- León M y Lucero A., (2009). Estudio de *Eichhornia crassipes*, *Lemna gibba* y *Azolla filiculoides* en el tratamiento biológico de aguas residuales domesticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del Canton Cotacachi. Ibarra, Ecuador. Universidad. Técnica del Norte, pág: 29-37.
- Mara. (1993 p. 7). *Tratamiento de aguas residuales en climas cálidos*. Londres.
- Mena, P. (2014). *evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (hafssh) en el colegio comfamiliar siglo xxi, sede campestre corregimiento de san fernando*.
- Merli, Ricciuti. (2009). Microbiología de las aguas residuales - Aplicación de biosólidos en suelo. Procesos fundamentales físico-químicos y microbiológicos :
http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem_fi_qui_micrb_09/biosolidos_en_suelo.pdf
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y de

dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS) – Título B, Sistemas de Acueducto. Minvivienda. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS) – Título D, Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias. Minvivienda. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_d.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS) – Título E, *Tratamiento de Aguas Residuales*. Minvivienda. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS) – *Título E, Anexo 2. Fichas de tecnología de tratamiento de agua residual*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-2-tecnologias-ar-titulo-e-final.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS) – Título J: Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural. Colombia.

Muñoz, K., Vásquez, M., (2018). Tendencias actuales para el tratamiento de aguas residuales domesticas: una revisión de la literatura científica. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23046/Mu%c3%b1oz%20Tello%2>

0Keyla%20Madaly%20-

%20Vasquez%20Perez%20Milagros.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Núñez, R. (2016) Tratamiento de aguas residuales domesticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro). [Trabajo de grado, E.P Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión]. Repositorio de tesis Universidad Peruana Unión. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/555>

ONU (2018). Desafios globales del agua. *Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/water>

OPS (2017). Agua y saneamiento. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f.). Definición de aguas residuales. Disponible en: <https://www.fao.org/>

Orozco (2010) *efectividad en la remoción de organismos patógenos de aguas residuales domésticas utilizando humedales construidos con diferentes tipos de flujos*. EFECTIVIDAD EN LA REMOCIÓN DE ORGANISMOS PATÓGENOS DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO HUMEDALES CONSTRUIDOS CON DIFERENTE TIPOS DE FLUJOS (utp.edu.co)

Orozco et al. (2017). *Contemplan, Comprenden, Conservan*. https://guianaturaleza.colombia.travel/pdf/USAID_Procolombia_Manual-para-guias.pdf

Ortiz, J., Masera, O., Fuente, A. (2009). *La ecotecnología en México*. <https://books.google.com.co/books?id=RMrmBgAAQBAJ&pg=PA64&dq=biofiltro+domestico&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjn67eg4pP7AhX0SDABHZNABi0Q6AF6BAgMEAI#v=onepage&q=biofiltro%20domestico&f=false>

Ortiz, Masera, Fuentes . (2014). *La Ecotecnología en Mexico* .

<https://books.google.com.co/books?id=RMrmBgAAQBAJ&pg=PA64&dq=biofiltro+domestico&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjn67eg4pP7AhX0SDABHZNaBi0Q6AF6BAgMEAI#v=onepage&q=biofiltro%20domestico&f=false>

Parrao, L (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. <https://hdl.handle.net/11673/47123>

PGN. (16 de julio de 2022). *PROCURADURÍA PIDE MEDIDAS URGENTES ANTE PROBLEMÁTICA DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS DE IBAGUÉ, TOLIMA*.

Procuraduría General de la Nación : https://www.procuraduria.gov.co/portal/-PROCURADURIA-PIDE-MEDIDAS-URGENTES-ANTE-PROBLEMATICA-DE-ACUEDUCTOS-COMUNITARIOS-DE-IBAGUE_-TOLIMA-.news

Quispe, A. (2018). *Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de carapongo, lurigancho-chosica*.

Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Rodríguez J., et al. 2007. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Ed.1ª Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. España.

Rodríguez, J., Gomez, E., Garavito, L., López, F. . (2009). *Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales*. https://scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2007-24222010000100005&lng=en

Romero, J. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales, teoría y principios del diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.:

https://www.academia.edu/41246680/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_Rojas

Romero, J. A. (1999). *Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

[file:///C:/Users/FM%20TECNOLOG%C3%8DA/Downloads/Tratamiento de Aguas Residuales Romero R%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/FM%20TECNOLOG%C3%8DA/Downloads/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_R%20(1).pdf)

Romero, L. (s. f.). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE BIOFILTROS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS*

UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*. <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>

UNICEF, (2023) *Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en los hogares 2000 – 2022: El género en el punto de mira*. <https://washdata.org/reports/jmp-2023-wash-households>

USEPA. 2000. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters EPA/625/R-99/010*. DIANE Publishing. Estados Unidos.

Valdés. (2015). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.

Vergara, R. (2021). *DISEÑO DE BIOFILTROS PARA MEJORAR EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS*.

[https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28629/Vergara%20Tineo%2c%20](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28629/Vergara%20Tineo%2c%20Rosa%20Magaly.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[Rosa%20Magaly.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28629/Vergara%20Tineo%2c%20Rosa%20Magaly.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Vidal, G; Araya, F. (2014). *Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos*. <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/las-aguas-servidas-y-su-depuracion-en-zonas-rurales-situacion-actual-y-desafios.pdf>

Apéndices

Apéndices A. Encuesta

Nombre del apéndice

ENCUESTA # _____

1. Persona entrevistada Hombre () Mujer ()
 2. Tu rol en la vivienda es: _____
 3. ¿Qué tipo de vivienda es: rural o urbana? _____
 4. Uso: Solo vivienda _____
 5. Vivienda y otra actividad productiva asociada, cual _____
 6. ¿Cuántas personas viven en la casa? _____
 7. ¿La vivienda tiene energía eléctrica? SI___ NO___
 8. ¿La vivienda tiene red de agua potable? SI___ NO___
 9. ¿La vivienda tiene red de alcantarillado público? SI___ NO___
 10. ¿La vivienda tiene pozo séptico, baño seco u otro? SI___ NO___
 11. ¿Cree que es importante hacer uso adecuado del agua? SI ___ NO___
 12. ¿Considera que tiene buenos hábitos de uso adecuado del agua? SI___ NO___
 13. ¿Está dispuesto a implementar mejores hábitos para hacer un uso adecuado del agua? SI___
NO___
 14. ¿Tiene conocimiento de hábitos que sirven para hacer uso adecuado del agua? SI___
NO___
- Nombre algunas: _____
15. ¿La vivienda realiza recolección de agua lluvia? SI___ NO___
 16. Tienes instalado algún sistema de economizador de agua, ¿cuál? _____
 17. ¿Cuántos inodoros tiene la vivienda? _____

18. ¿Cuántos lavamanos tiene la vivienda? _____
19. ¿Cuántas duchas tiene la vivienda? _____
20. ¿Cuántos lavaplatos tiene la vivienda? _____
21. ¿Cómo lavas los platos? A mano con la llave a choro _____
A mano con filtro economizador _____
22. ¿Cuántos lavaderos tiene la vivienda? _____
23. ¿Cuántas lavadoras tiene la vivienda? _____
24. ¿Cómo es tu lavadora? Es un modelo con más de cinco años _____
25. ¿Es un modelo moderno, convencional? _____
¿Es un modelo con economizador de agua? _____
26. ¿Cuántas veces al día se lava los dientes en casa? _____
27. ¿Al lavarse los dientes cierra la llave del agua mientras se cepilla los dientes? SI___ NO___
28. ¿Cuántas veces al día se ducha en casa? _____
29. ¿Cuánto tiempo demora abierta la llave del agua mientras se ducha? _____
30. ¿Al ducharse cierra la llave del agua mientras se enjabona? SI___ NO___
31. ¿Cuántas veces al día se lava la loza en su casa? _____
32. ¿Al lavar la loza cierra la llave mientras enjabona los utensilios de cocina? SI___ NO___
33. ¿Cuál es el consumo de agua de la lavadora? _____
34. ¿Al lavar la ropa en la lavadora utiliza carga completa? SI___ NO___
35. ¿Cuántas veces en la semana lava la ropa? _____
36. ¿Cuántas veces al día descarga el baño de la casa? _____
37. ¿Descarga en el inodoro toallas higiénicas, condones, tampones, algodones, medicamentos vencidos, o diferentes tipos de residuos? SI___ NO___

38. ¿Se lava las manos cada vez que entra al baño? SI____ NO____
39. ¿Cierra la llave del lavamanos cuando se enjabona las manos? SI____ NO____
40. Cuantas veces en la semana realiza limpieza de la vivienda _____
41. Con que frecuencia realiza riego de las plantas de su vivienda _____
42. ¿Hace uso de agua para otro tipo de actividad a parte de las domésticas? SI____ NO____
- Cual _____

Apéndices B. Estado de las aguas residuales de la vivienda



Fuente. Autor

Apéndices C. Vista unidad sanitaria y lavadero de la vivienda



Fuente. Autor

Apéndices D. Vivienda estudio



Fuente. Autor