

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Diseño y validación de un biofiltro para el manejo de aguas grises de
restaurantes en el Lago de Yojoa, Honduras

Estudiante

María José Delattibodier Castro

Asesores

Erika Alejandra Tenorio Moncada, M.Sc.

Lourdes Susana Espinal Cabrera, Ing.

Efraín José Duarte Barrera, Mtr.

Honduras, agosto 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a AMUPROLAGO, USAID y el Proyecto SOS YOJOA por proporcionar el apoyo logístico y financiero necesario para llevar a cabo esta investigación. Por otro lado, también le agradezco a la Asociación de Restaurantes del Lago de Yojoa (ARLY) por su apoyo, principalmente al propietario del restaurante que siempre mostró interés y compromiso en la presente investigación.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido.....	4
Índice de Cuadros	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos	14
Área de Estudio.....	14
Evaluación del Desempeño del Sistema Actual de un Restaurante	14
Características de los Biofiltros	15
Diseño del Biofiltro Evaluado	15
Parámetros de Calidad de Agua.....	16
Sólidos Disueltos (SDT).....	17
Aceites y Grasas	17
Turbidez	17
Nitratos (NO ₃)	17
Nitrógeno Total (N)	18
Fosfatos (PO ₄).....	18
Fosforo Total (P).....	18
Evaluación de Desempeño del Biofiltro	18
Aforo de Caudales.....	19
Resultados y Discusión.....	20

	5
Evaluación del Desempeño del Sistema Actual	20
Diseño del Biofiltro	23
Construcción y Adaptación del Biofiltro	25
Evaluación del Desempeño del Biofiltro en Remoción de Contaminantes Priorizados	27
Conclusiones	33
Recomendaciones	34
Referencias.....	Error! Bookmark not defined.
Anexos.....	39

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Materiales utilizados para la construcción del prototipo de biofiltro.....	16
Cuadro 2 Métodos analíticos utilizados para medición de parámetros de calidad de agua	16
Cuadro 3 Parámetros de diseño del biofiltro.....	24

Índice de Figuras

Figura 1 Comparación entrada-salida de fosfatos en la trampa grasa durante el periodo de la evaluación	20
Figura 2 Comparación entrada-salida de nitratos en trampa grasa durante el periodo de evaluación	21
Figura 3 Comparación de entrada-salida de fósforo total en trampa grasa durante el periodo de evaluación	22
Figura 4 Comparación de entrada-salida de Nitrógeno total en trampa grasa durante el periodo de evaluación	23
Figura 5 Composición del Biofiltro	25
Figura 6 Secuencia del sistema	27
Figura 7 Concentraciones de fosfatos en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación ...	28
Figura 8 Concentraciones de nitratos en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación ...	29
Figura 9 Concentraciones de fósforo en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación	30
Figura 10 Concentraciones de Nitrógeno en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación	31
Figura 11 Concentración de aceites y grasas en las etapas del sistema	32

Índice de Anexos

Anexo A Medición de caudal de entrada	39
Anexo B Resultados de pH	40
Anexo C Resultados de conductividad	41
Anexo D Resultados de solidos disueltos.....	42
Anexo E Muestras del día 42.....	43
Anexo F Análisis de fosfatos en muestras de día 42	44
Anexo G Separación de grasas en tanques de retención.....	45
Anexo H Tanques de retención.....	46
Anexo I Cobertura vegetal día 1.....	47
Anexo J Cobertura vegetal día 42	48

Resumen

La conservación de la calidad del agua en los lagos es esencial para mantener los ecosistemas acuáticos saludables y garantizar actividades económicas que dependen de ellos. El Lago de Yojoa es un sitio importante para la economía de Honduras que se encuentra en estado mesotrófico, lo que indica su vulnerabilidad y necesidad de gestionar su exposición a nutrientes. La gestión de aguas residuales del sector restaurantero es crucial para prevenir la contaminación en este lago. Este estudio evalúa un sistema de trampa de grasa y biofiltros para tratar aguas grises de restaurantes en el Lago de Yojoa. Diseñado por su accesibilidad, eficiencia, costo y manejo, el sistema fue validado durante 42 días con 13 muestreos en cuatro etapas del proceso. Los resultados mostraron que el sistema actual es deficiente en la reducción de nutrientes, aceites y grasas, con concentraciones de salida mayores que en la entrada. Sin embargo, el biofiltro diseñado contribuyó significativamente a la remoción de contaminantes, logrando una reducción de hasta 65% de nitrógeno a partir del día 19, 60% de aceites y grasas el día 19, y 65% de nitratos y fósforo en los días 24 y 42 respectivamente. La remoción de fosfatos fue menos eficaz, alcanzando solo un 34%, y en ningún caso las concentraciones se encontraron por debajo de la normativa para descargas de aguas residuales. Estos hallazgos subrayan la necesidad de mejorar los sistemas de tratamientos actuales y adoptar prácticas de producción más limpia para proteger el equilibrio del Lago de Yojoa y sus humedales.

Palabras clave: Aceites, contaminación, efluentes, grasas, nutrientes

Abstract

The conservation of water quality of lakes is essential to maintaining healthy aquatic ecosystems and ensuring economic activities that depend on them. Lake Yojoa is an important site for the economy of Honduras and is currently in a mesotrophic state, indicating its vulnerability and the need to manage its nutrient load. Management of wastewater from the restaurant sector is crucial to prevent contamination of this lake. This study evaluates a grease trap and biofilter system designed to treat greywater from restaurants in Lake Yojoa. The system designed for accessibility, efficiency, cost, and management, was tested over 42 days with 13 samplings taken at four main stages. The results showed that the current system was deficient in reducing nutrients, oils, and fats, with outlet concentrations higher than those at the inlet. However, the designed biofilter contributed significantly to the removal of pollutants, achieving a reduction of up to 65% of nitrogen starting from day 19 of operation, 60% of oils and fats on day 19, and 65% of nitrates and phosphorus on days 24 and 42, respectively. The removal of phosphates was less effective, reaching only 34%, and in no case were the concentrations below the regulatory standards for wastewater discharge. These findings underscore the need to improve the current treatment systems and adopt cleaner production practices to protect the balance of Lake Yojoa and its wetlands. The preservation of this ecosystem is essential to ensure environmental health and the economic activities that depend on the lake.

Keywords: Effluents, fats, nutrients, oils, pollution

Introducción

El agua es un recurso vital para la sobrevivencia de todos los seres vivos y el cual se renueva a través del ciclo hidrológico, sin embargo, la disponibilidad de este se ha visto amenazada por diversas razones. El agua sirve como un componente vital para la adaptación al cambio climático, asegurando el sustento humano y sirviendo de hilo conductor entre la sociedad y su entorno (García Miranda y Miranda Rosales, 2018). La relación vital entre el agua y el equilibrio de los ecosistemas terrestres y acuáticos resalta la función crucial que desempeña en la preservación de la biodiversidad y el mantenimiento de la armonía ambiental (Costa Posada et al., 2005).

En los últimos años, la cantidad de lagos destruidos a causa del exceso de nutrientes ha aumentado considerablemente. Los lagos enfrentan una variedad de factores estresantes como resultado de la intensa actividad humana y el aprovechamiento de sus servicios, dentro de estos se incluyen los factores químicos, físicos, biológicos y la extracción directa de recursos (Jenny et al., 2020). Ejemplo de esto es el lago de Chapala el cual es afectado fuertemente por el impacto de los contaminantes agrícolas e industriales (Llamas, 2009). Por otro lado, el lago Amatitlán enfrenta problemas similares con niveles significativos de contaminación causado por descargas urbanas y actividades agrícolas (Olayo, 2016). Además, se han documentado problemas ambientales relacionados con la minería en el lago Titicaca que perjudican la calidad del agua (Jiménez Chura, 2020). Estos ejemplos demuestran la importancia de abordar la calidad de las múltiples fuentes de contaminación para mantener la salud de los cuerpos de agua en América Latina.

En la actualidad, el rápido crecimiento de la industria y la población ha tenido un impacto ambiental significativo que ha puesto en peligro los ecosistemas y recursos naturales. Pese a existir un marco legislativo destinado a regular y reducir la contaminación de los cuerpos de agua, uno de los resultados más evidentes y alarmantes se ha encontrado en el agua por la alta cantidad de vertidos causados por la actividad humana (Tarco Guilcamaigua y Veintimilla Calvopiña, 2010).

El Lago de Yojoa es un sitio icónico e importante para Honduras ya que su aporte para la economía es elevado, sin embargo, actualmente se encuentra en un estado mesotrófico lo que indica que está en riesgo (Abrego, 2023). Irias Barahona (2023), demostró que el aporte anual de nutrientes por parte del sector de restaurantes es alto, pero es significativamente menor que el de otros afluentes que desembocan en el Lago de Yojoa. Sin embargo, las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el estudio de Irías revelan la necesidad de implementar medidas más efectivas para salvaguardar la calidad del agua de la región.

El manejo de las aguas residuales es esencial para preservar la salud humana y prevenir la contaminación de los recursos naturales (Trang et al., 2010). Las aguas residuales de restaurantes son aquellas que se producen durante operaciones como la limpieza de carne, verduras, platos, utensilios de cocina y sanitización del suelo (Zulaikha et al., 2014). Se ha observado que los residuos orgánicos, grasas, aceites, detergentes y químicos utilizados en las operaciones de limpieza y lavado son las principales fuentes de contaminación de estos efluentes de agua (Puma y Palomino, 2019).

Por otro lado, el uso de detergentes para limpiar utensilios desempeña un papel significativo en la degradación de los ecosistemas acuáticos. Esto se debe a su contenido de nitrógeno y fósforo, que actúan como precursores del fenómeno de eutrofización (Luna Pebello y Aburto Castañeda, 2014). Los detergentes aumentan la alcalinidad del agua, reducen la cantidad de oxígeno presente y causan la acumulación de sedimentos con un alto contenido orgánico (García Jaya, 2016). Estos efectos perjudiciales en la calidad del agua pueden tener graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos, por lo que es necesario que estos efluentes reciban un tratamiento apropiado antes de su retorno a cuerpos de agua.

Considerando que la mayoría de las vertientes de aguas grises no están conectados a una red principal de tratamiento de agua, es necesario buscar diferentes alternativas. Una de las opciones más eficientes y accesibles es el uso de biofiltros para la remoción de nutrientes (Ramirez Amacifuen y Paredes Vásquez, 2019). La biofiltración de agua se basa en hacer pasar el agua contaminada a través

de un material de gran superficie que funciona como hogar de microorganismos que constituyen una biopelícula (Dueck y Pyl'nik, 2009). Los biofiltros son considerados humedales artificiales; existen dos tipos de humedales: superficiales y subsuperficiales, seleccionados según contaminantes, medio filtrante y manejo, siendo los subsuperficiales más eficientes para eliminar materia orgánica, metales, nitrógeno, fósforo y patógenos debido a su flujo entre medios filtrantes con trayectoria horizontal (Rivas Castro, Noviembre, 2019).

Cohen (2001) define los biofiltros como dispositivos que inmovilizan microorganismos en un material o medio filtrante con el fin de aislarlos del agua a tratar. La capacidad de los biofiltros para contener concentraciones considerables de biomasa o biopelícula es un factor importante en su efectividad y sostenibilidad financiera (Show y Tay, 1999). Los materiales utilizados para la retención de esta biomasa, o los medios filtrantes, resultan cruciales en el proceso de los biofiltros. La selección de estos materiales filtrantes tiene un impacto significativo en factores como la efectividad del tratamiento del agua contaminada y los gastos relacionados con la instalación de estos sistemas de biofiltración.

Actualmente el sector de Restaurantes de Lago de Yojoa cuenta con más de 70 establecimientos, cuyas aguas grises son tratadas solamente por un sistema de trampas-grasa instalados en las descargas de las aguas provenientes de las cocinas. Sin embargo, es necesario evaluar con mayor detalle el desempeño de estos sistemas y proporcionar alternativas de tratamiento que reduzcan los contaminantes que llegan al humedal y al espejo de agua. Debido a la importancia de la reducción de aportes de nutrientes hacia el Lago de Yojoa, este estudio tiene como objetivo principal el diseño y validación de un biofiltro piloto *in situ* para el tratamiento de aguas grises generadas por restaurantes en Lago de Yojoa. Para ello, se han planteado los siguientes objetivos específicos: i) Evaluar el desempeño del sistema actual de tratamiento en un restaurante seleccionado, ii) diseñar un biofiltro piloto para el tratamiento de aguas grises en un restaurante seleccionado y iii) evaluar el desempeño del biofiltro diseñado para la remoción de contaminantes priorizados.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

El estudio se realizó durante el mes de abril y mayo en sector sureste del Lago de Yojoa, el cual se encuentra entre los departamentos de Cortes, Comayagua y Santa Barbara en la región centro-occidental del país. Este sitio se encuentra entre los puntos 4°45'00" y 14°57'00" de latitud norte, así como entre los 87°53'00" y 88°07'00" de longitud oeste. Parte de esta investigación se realizó en uno de los restaurantes de mayor afluencia de turistas en el sector. Los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua del departamento de Ambiente y Desarrollo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

El estudio inició con una visita exploratoria al Lago Yojoa en enero de 2024, cuando también se realizó una reunión con la Asociación de Municipios para la Protección del Lago de Yojoa y su Área de Influencia (AMUPROLAGO) y la Asociación de Restaurantes del Lago de Yojoa (ARLY) para definir los objetivos y alcance del estudio. Se visitaron algunos de los establecimientos para conocer de cerca sus operaciones diarias de limpieza y preparación de alimentos, así como su gestión de aguas residuales. Y se escogió un establecimiento que contaba con las facilidades y condiciones adecuadas para llevar a cabo la investigación.

Evaluación del Desempeño del Sistema Actual de un Restaurante

El restaurante cuenta actualmente con un sistema de tratamiento de aguas grises que consta de una trampa grasa. El sistema tiene como función principal eliminar grasa, aceites, y residuos orgánicos provenientes de desperdicios de comida antes de descartarlos en el humedal cercano. Para lograr evaluar el desempeño de este sistema se realizaron 13 muestreos en un intervalo de 42 días. Estos muestreos fueron realizados con el apoyo del personal de AMUPROLAGO y consistieron en recolectar 2 L de muestra puntual de dos puntos principales:

Punto 1: Entrada a trampa grasa

Punto 2: Salida de trampa grasa

Las muestras fueron congeladas y transportadas en hieleras al laboratorio, donde se llevaron a cabo los análisis de fosfatos, nitratos, fósforo total y nitrógeno total. Esto permitió obtener resultados, comparar datos y generar gráficas de desempeño en la reducción de nutrientes.

Características de los Biofiltros

Los biofiltros son sistemas que depuran el agua imitando a los humedales naturales, incluso se conocen como humedales artificiales. Estos sistemas son poco profundos, llenos de materiales porosos y se usan para sostener plantas fijas o flotantes que promueven la descomposición de los contaminantes. Funcionan mediante la actividad biológica de los microorganismos, el suministro de oxígeno a través de plantas y el soporte de los materiales porosos (Delgadillo et al., 2010). Estos sistemas biológicos eliminan los contaminantes de las aguas grises antes de que lleguen a fuentes naturales, lo que limita la introducción de patógenos, nutrientes y toxinas fomentando un ecosistema más saludable (Otálora Rodríguez, 2011). En esta investigación se diseñó y construyó un biofiltro de tipo subsuperficial utilizando 5 materiales porosos.

Diseño del Biofiltro Evaluado

Con base en el conocimiento preliminar de las características del efluente, se diseñó un biofiltro utilizando el método de *Design Thinking*, la cual es una técnica que se resume en cuatro pasos los cuales son idear, construir, probar y redefinir soluciones (Galindo, 2019). Este proceso inicia observando la situación para conocer el problema que se debe solucionar y a partir de esto iniciar con lluvia de ideas para el diseño, posteriormente se construye el prototipo para iniciar la etapa de prueba. Esta técnica favorece la implementación de este tipo de proyectos de innovación, ya que permite realizar ajustes que sean necesarios durante el proceso.

Para el diseño de este sistema de biofiltros se priorizó el uso de materiales locales de bajo costo y de fácil acceso para favorecer su adopción. En el Cuadro 1 se detalla cada uno los materiales y su función principal por la cual fueron seleccionados.

Cuadro 1

Materiales utilizados para la construcción del prototipo de biofiltro

Material	Descripción	Función
Tubería de 2 pulg	Conexiones	Permitir flujo de agua entre etapas del sistema
Barril 120 L	Tanques de retención	Mantener caudal constante y homogenización
1/2 barril de 55 gal	Biofiltro	Sostener los sustratos filtrantes
Fibra de coco	Sustrato filtrante	Retención de materia orgánica
Grava	Sustrato filtrante	Retención de materia orgánica
Arena	Sustrato filtrante	Retención de materia orgánica
Aserrín	Sustrato filtrante	Retención de materia orgánica
Compost	Sustrato filtrante	Sostén para <i>Heliconia psittacorum</i>
<i>Heliconia psittacorum</i>	Material vegetal	Absorción de nitrógeno y fósforo

Parámetros de Calidad de Agua

En el Cuadro 2 se enumera los parámetros de calidad del agua mediante los cuales se evaluó tanto el desempeño del sistema actual, como el del biofiltro diseñado en este estudio. Aunque se podrían incluir otras variables, se optó por priorizar estas debido a su mayor impacto en el proceso de eutrofización en los cuerpos de agua y a las características del agua a tratar. Posteriormente se encuentra una breve descripción de cada uno de los parámetros.

Cuadro 2

Métodos analíticos utilizados para medición de parámetros de calidad de agua

Parámetro	Método	Unidad
Sólidos Disueltos	Multiparámetro Mettler-Toledo <i>SevenExcellence™</i>	ppm
Aceites y grasas	ME 5520-D Método de extracción <i>Soxhlet</i>	ppm
Turbidez	2130 B. Método nefelométrico	NTU
Nitratos	4500 NO3 D. Método del electrodo de nitrato	ppm
Nitrógeno total	4500-N C- Método de persulfato	ppm
Fosfatos	Azul de fósforo molibdeno	ppm
Fósforo total	4500-P J-Método de persulfato	ppm

Nota. Baird y Eaton (2017)

Sólidos Disueltos (SDT)

Los sólidos disueltos en el agua pueden degradar su calidad de diversas formas. La presencia de estos sólidos es un desafío importante en el control de los procesos biológicos y físicos de tratamiento de aguas residuales. Los análisis de sólidos son esenciales para verificar el cumplimiento de las normas de descarga de aguas residuales. Por lo tanto, monitorear y regular los sedimentos en el agua es fundamental para garantizar su calidad y seguridad (Chacón Chaquea, 2017).

Aceites y Grasas

Los aceites y grasas en el agua tienen un impacto ambiental significativo. Forman películas en la superficie que restringen el flujo de oxígeno entre el agua y el aire, afectando la flora y fauna en los ecosistemas. Además, estos contaminantes se solidifican y se adhieren a las tuberías, obstruyendo el sistema de alcantarillado público. Los aceites y grasas, debido a su baja densidad, se esparcen por la superficie del agua formando barreras que alteran los procesos biológicos acuáticos. Esto degrada la calidad del agua y afecta la vida acuática, poniendo en peligro los ecosistemas (Jiménez, 2012).

Turbidez

La turbidez del agua es causada por partículas en suspensión como el contenido de grasas, aceites, residuos de comida y jabones disueltos que causan la reducción de la transparencia del agua. Este parámetro se puede considerar decisivo para establecer la calidad y productividad de los ecosistemas. Además, puede llegar a ser un factor que limite el uso del agua ya que afecta gravemente la estética de esta (Palmer y Corpus, 2018).

Nitratos (NO_3)

Los nitratos son iones altamente solubles y estables en el agua y se pueden eliminar eficazmente mediante procesos de adsorción, intercambio iónico y tratamientos biológico (Nujic et al., 2017). Es importante la remoción de este compuesto de aguas residuales debido a que la descarga de estas con contenido de nitratos provoca un crecimiento excesivo de algas que consumen la mayor

parte del oxígeno disponible en cuerpos de agua causando así la muerte de peces y otras especies de importancia.

Nitrógeno Total (N)

El nitrógeno es un nutriente que puede llegar a causar severos efectos en el ecosistema en donde se vierte. Afecta la concentración de oxígeno en las aguas receptoras, es tóxico para la vida acuática y genera desafíos para el tratamiento y reutilización del agua (Almonacid, 2017). La principal fuente de nitrógeno dentro de las aguas grises es el contenido de materia orgánica proveniente de residuos alimenticios.

Fosfatos (PO₄)

El PO₄ es el estado del fósforo más fácil de absorber por las plantas, debido a esto la gran concentración de este nutriente provoca la abundancia y robusticidad de plantas cercanas a una fuente que provee fosfatos. Los fosfatos que comúnmente son encontrados dentro de aguas residuales provienen de detergentes y productos de limpieza (Pütz, 2009) y es un compuesto de importancia en el estudio de procesos de eutrofización, pues es el nutriente limitante para el crecimiento de algas.

Fosforo Total (P)

Este nutriente es esencial para el desarrollo de microorganismos que favorecen la depuración de las aguas. El contenido de fósforo en el agua se debe principalmente a los vertidos urbanos cargados de detergentes. Además de esto, este nutriente es determinante en el proceso de eutrofización (Soto y Quezada, 2016).

Evaluación de Desempeño del Biofiltro

La construcción del biofiltro se completó el día 13 de abril de 2024 y se inició a tomar muestras de los tres puntos desde el primer día, esto con el fin de realizar una curva de desempeño. A partir de ese día se tomó muestras durante 3 días a la semana siendo estos: lunes, miércoles y viernes durante cuatro semanas. Al terminar las cuatro semanas se consideró un muestreo más, el cual se realizó el

24 de mayo, justo 15 días después de la última toma con el objetivo de observar el comportamiento del sistema con más tiempo de funcionamiento. Se muestrearon cuatro puntos en el sistema descritos de esta manera:

Punto 1: Salida de trampa grasa (luego de la trampa grasa que el restaurante ya tiene instalada)

Punto 2: Salida de barriles de retención (barriles agregados como parte del diseño propuesto)

Punto 3: Salida de biofiltro

De cada uno de estos puntos se tomaron 2 L de muestra que fueron congelados y trasladados al laboratorio en hieleras para luego ser utilizados para medir los parámetros de calidad de agua antes mencionados.

Aforo de Caudales

Para lograr la cuantificación de caudales, se llevó a cabo un procedimiento básico que consiste en medir el volumen de agua descargado en un tiempo determinado. Para ello, se utilizó un recipiente graduado y un cronómetro. Estos datos se emplearon para calcular el caudal de entrada, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo (litros/segundo), a través de la Ecuación 1.

$$Q = L/s \quad [1]$$

Donde:

Q = Caudal

L = Litros

S = Segundos

Con estos resultados se logró realizar una gráfica de caudales, los cuales sirven como reporte de cuanto es el promedio de caudal de entrada al sistema.

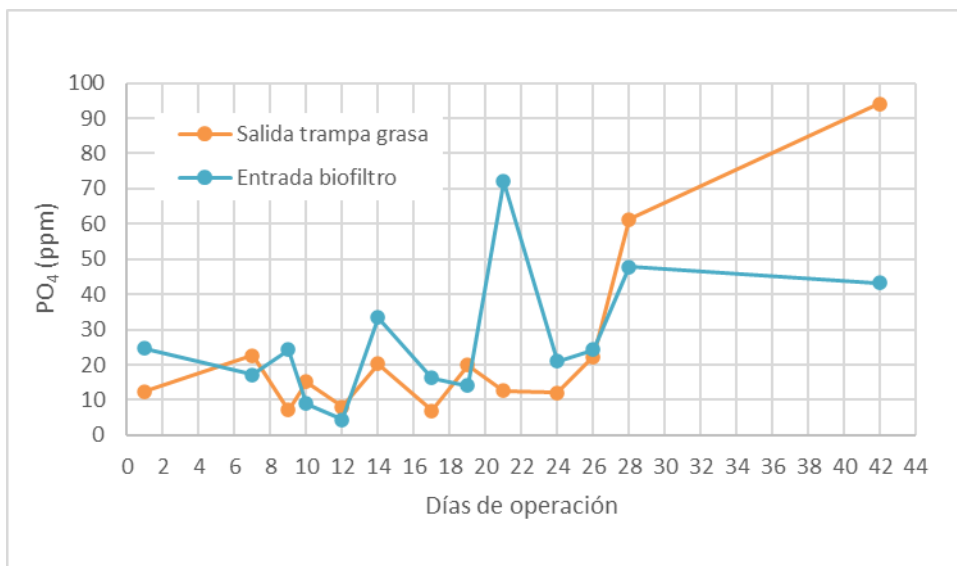
Resultados y Discusión

Evaluación del Desempeño del Sistema Actual

Una trampa grasa tiene como objetivo la separación de grasas, aceites y sólidos de las aguas residuales, mediante este proceso se puede lograr la reducción de nutrientes. En la actualidad, la única tecnología que los restaurantes están utilizando para el tratamiento de sus aguas grises son la trampa grasa. Estos sistemas realizan esta tarea de manera óptima siempre y cuando hayan sido construidos apropiadamente, estén bien diseñados y tengan un mantenimiento adecuado (Arellano y Sánchez, 2017). La Figura 1 ilustra el comportamiento de entrada y salida de la trampa de grasa respecto al parámetro de fosfatos. Se observa que, en cada uno de los muestreos, la concentración de fosfatos es mayor en la salida en comparación con la entrada, mostrando distintos rangos de diferencia. Esto indica que el sistema no está realizando su función de retención de fosfato de manera efectiva, lo que podría deberse a problemas con el diseño, la construcción o el mantenimiento de la trampa de grasa.

Figura 1

Comparación entrada-salida de fosfatos en la trampa grasa durante el periodo de la evaluación

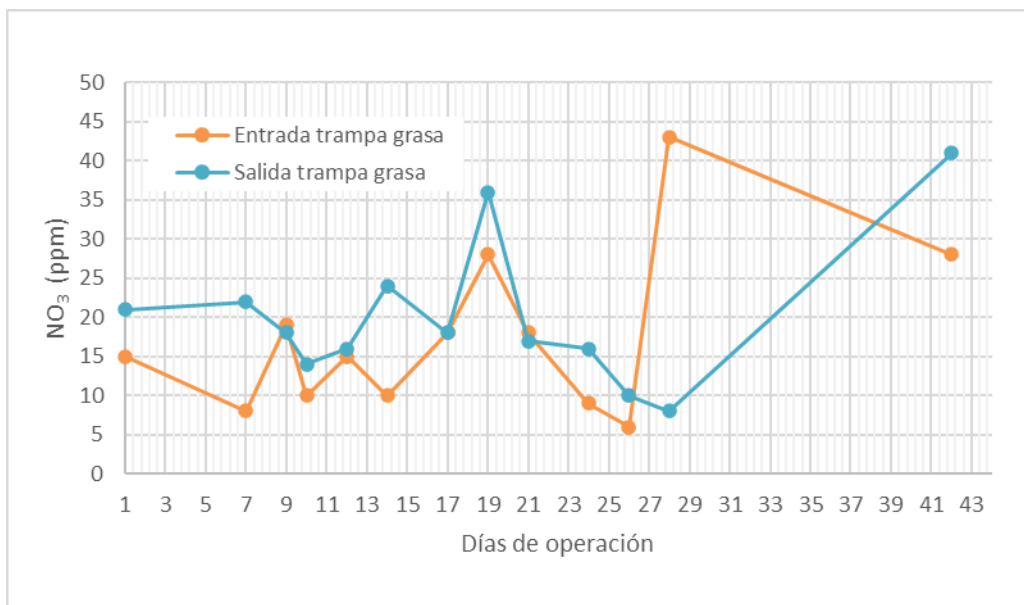


En la Figura 2 se aprecia los resultados de análisis de nitratos, el cual demuestra que igual que en el caso de los fosfatos, se evidencia que no existe remoción del nutriente mediante este

tratamiento. Esto puede ser a causa de que son compuestos altamente solubles y para ser removidos necesitan tener una superficie a la que adherirse y las condiciones de las trampas grasa no favorecen procesos de degradación. Por otra parte, el tiempo de retención (TRH) de este sistema es muy corto, lo cual limita su tratamiento.

Figura 2

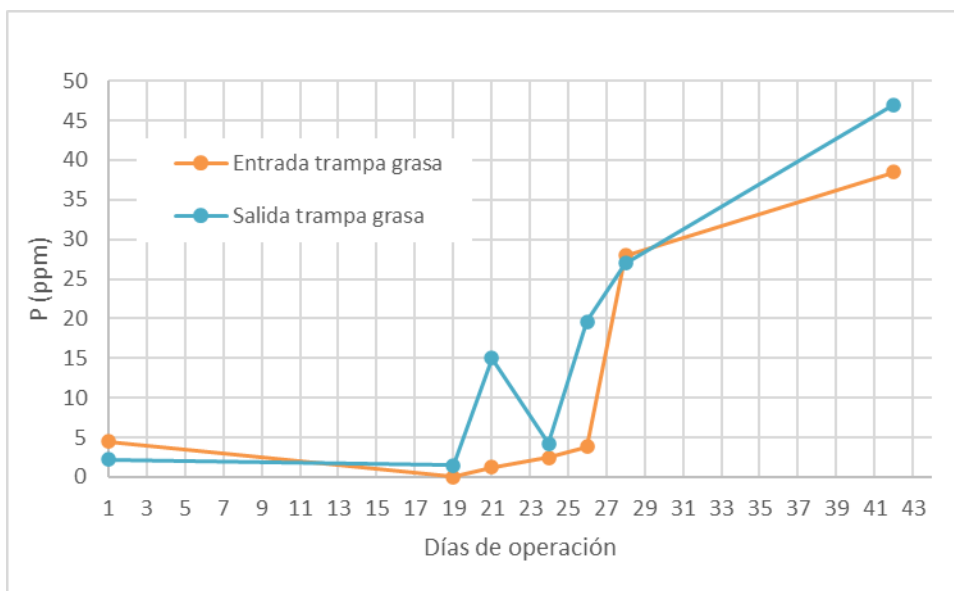
Comparación entrada-salida de nitratos en trampa grasa durante el periodo de evaluación



Por otro lado, la Figura 3 muestra los rangos de fósforo total igualmente en la entrada y salida de la trampa grasa. Nuevamente se puede observar que el sistema no remueve este nutriente. Sin embargo, esto es muy común ya que en la mayoría de este tipo de sistemas la remoción de fósforo no es muy efectiva debido a las características y mecanismos de este tipo de tratamientos (Hernandez y Lopez, 2011). Esto demuestra la necesidad de agregar una etapa de tratamiento más para lograr reducir la concentración de fósforo del efluente.

Figura 3

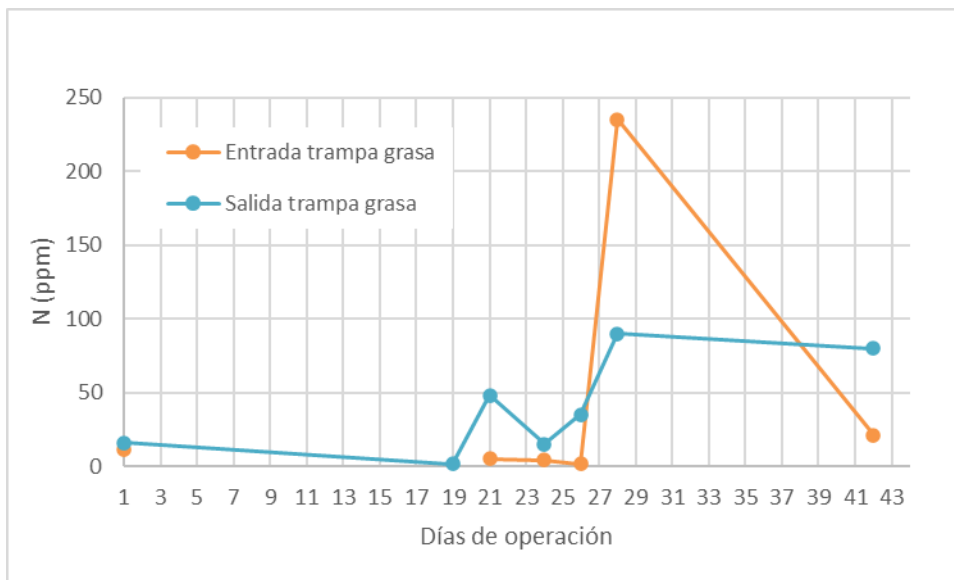
Comparación de entrada-salida de fósforo total en trampa grasa durante el periodo de evaluación



Para culminar con los resultados de la evaluación del desempeño de la trampa grasa, se muestra en la Figura 4 la diferencia de entrada y salida respecto al nitrógeno total en las aguas grises. En este caso, además de observarse el limitado desempeño del sistema, también se logra ver el alto contenido de nitrógeno que estas aguas grises pueden llegar a contener. La concentración máxima obtenida de 235 ppm de P muestra la necesidad de realizar un cambio de proceso dentro de la cocina para lograr reducir el aporte de nutrientes hacia el agua residual. Esto concuerda con la investigación de Irias Barahona (2023) en el cual se concluyó que el sistema de trampa grasa en estos restaurantes no funciona adecuadamente. Estos sistemas actualmente operan reteniendo sólidos gruesos, sedimentables y materiales suspendidos de mayor tamaño y erróneamente se consideran un método de tratamiento de contaminantes disueltos.

Figura 4

Comparación de entrada-salida de Nitrógeno total en trampa grasa durante el periodo de evaluación



Diseño del Biofiltro

En el diseño final del biofiltro se priorizó el uso de materiales locales que, en otras industrias son considerados residuos. Para el uso de fibra de coco y aserrín como principales medios filtrantes, se utilizó como referencia la investigación de (Reyes, 2016) el cual hace una comparación entre estos dos sustratos obteniendo un resultado de 53.53% de remoción de contaminantes para el aserrín y un 82.37% de remoción para la fibra de coco. En esta investigación se optó por utilizarlos juntos. Además de estos dos medios filtrantes, se utilizó grava y arena los cuales son elementos típicos de biofiltros y favorece en la retención de sólidos dentro del sistema.

El biofiltro se diseñó para tratar un volumen aproximado de 0.10 L/s. Este volumen es bajo ya que solo se consideró el 25% del volumen total utilizado por el restaurante. Debido a la fluctuación de caudales observada y que en algunos casos es elevada, se utilizaron tres unidades operativas en secuencia con el objetivo de dividir el caudal en tres y que sea mejor el desempeño del sistema. Como se muestra en el Cuadro 3, el tiempo de retención hidráulica (TRH) del sistema corresponde a 1 hora

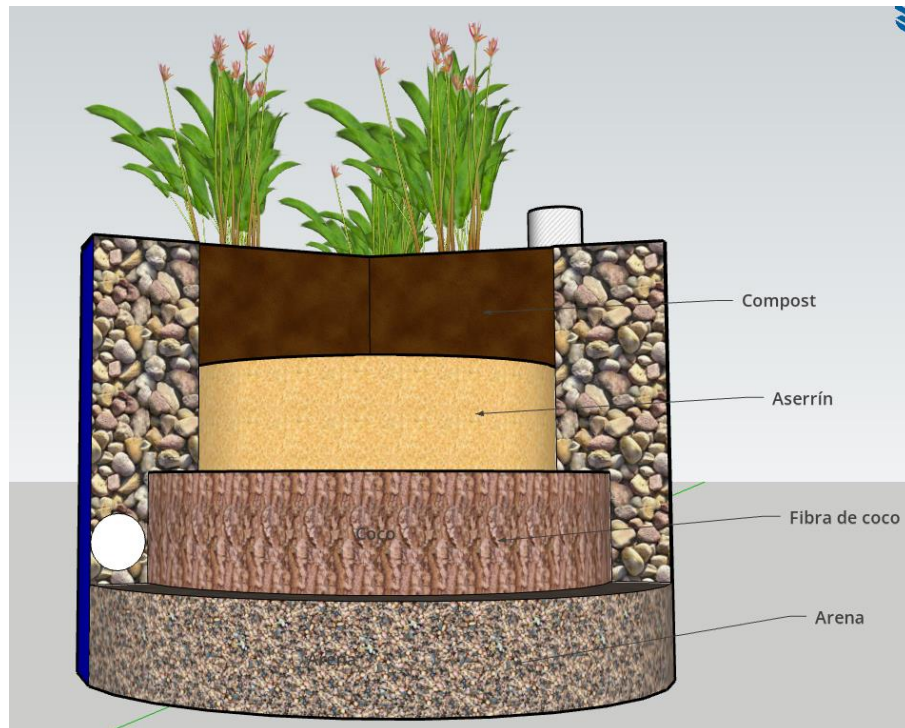
con 35 minutos. Este dato toma en cuenta no solo los biofiltros, sino que también los tanques de retención que aportan en la separación de grasas y sólidos.

Cuadro 3

Parámetros de diseño del biofiltro

Parámetro	Descripción
TRH	1 hr 35 min
Concentraciones iniciales	P: 40 ppm
	N: 250 ppm
	NO ₃ :50 ppm
	PO ₄ : 80 ppm
Medios filtrantes	Grava: 10 cm
	Arena: 10 cm
	Aserrín: 10 cm
	Fibra de coco: 10 cm
Densidad de siembra	Compost: 10 cm
	44 plántulas/m ² de <i>Heliconia psittacorum</i>

En la Figura 5 se muestra el relleno que se diseñó para el biofiltro. Cabe destacar que el grosor de cada capa se mantuvo equitativo de esta manera, en el fondo arena, continuando con fibra de coco, luego arena y terminando con una capa de compost que fue el sostén principal de las *Heliconia psittacorum* las cuales fueron plantadas con una densidad de siembra de 44 plántulas/m². En otras investigaciones se seleccionó esta especie de plantas por su aporte en remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, donde se obtuvieron porcentajes de remoción de entre 60% y 70% para fósforo y el 80% para nitrógeno (Rivas Castro, Noviembre, 2019).

Figura 5*Composición del Biofiltro***Construcción y Adaptación del Biofiltro**

Como soporte para los sustratos se utilizaron barriles de 55 gal cortados por la mitad desde su base. Se colocaron tres en secuencia para dividir el caudal debido al alto consumo de agua del restaurante. Se seleccionó este tipo de contenedor por su fácil acceso y bajo costo.

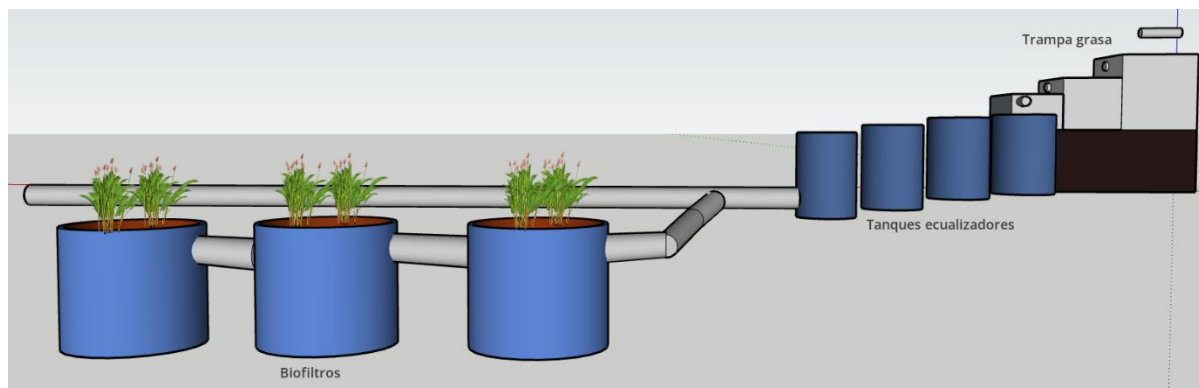
Se inició la instalación creando una pendiente para lograr el flujo de agua. Para medir la pendiente de un terreno se pueden utilizar varias técnicas. La técnica más común es el nivel de la manguera, un método sencillo pero eficiente. Demin (2014) establece que este proceso consiste en colocar una manguera llena de agua entre dos puntos del terreno. La altura entre el menisco de agua y el suelo en cada extremo de la manguera se midió cuando se levantaron ambos extremos. La diferencia de altura observada en los dos extremos de la manguera mostró la pendiente del terreno. En este caso, la pendiente deseada era del 1% ya que este rango es suficiente para que el agua tuviera

un flujo adecuado. Para lograr una base firme de la pendiente se arregló el terreno y luego se colocaron dos tablas para crear una plataforma estable para el sistema.

Después de instalar los barriles, se procedió a la conexión de las tuberías, utilizando para ello tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 2 pulg. Además, se le colocó un tubo perforado en forma vertical a cada uno de los biofiltros para lograr una mejor aireación dentro del sistema. Posteriormente, se llenaron los barriles con los medios filtrantes de la siguiente manera: se colocaron 10 cm de grava en el fondo del barril, después se puso una capa de 10 cm de arena, seguidos de 10 cm de fibra de coco, luego 10 cm de aserrín y, finalmente, se completó con una capa de 10 cm de compost. Para finalizar la instalación se sembraron plantas de *Heliconia psittacorum* cada 15 cm.

La construcción del sistema se llevó a cabo el 21 de marzo, sin embargo, debido a la falta de conocimiento por parte del personal del restaurante y la naturaleza de las aguas a tratar, el sistema colapso, y se tuvo que hacer una adaptación adicional al sistema. En un inicio el sistema constaba solamente de los tres biofiltros diseñados, sin embargo, el mal desempeño de la trampa grasa como tratamiento primario, produjo una saturación de grasas en los biofiltros poco tiempo después de iniciar su funcionamiento. Como solución a este problema, se instalaron tres tanques de retención que también favorecieron la separación de grasas en el efluente previamente a su ingreso al biofiltro.

En la Figura 6 se puede observar la composición final del sistema instalado durante esta investigación. Luego de pasar por la trampa grasa, el efluente sigue su recorrido hacia tres barriles en secuencia de 120 L cada uno que aportan al proceso de separación de grasas y aceites como tratamiento primario previo a su ingreso a los biofiltros. El proceso de tratamiento del efluente culmina con su paso por el sistema de biofiltros que son los encargados de retener y absorber los principales nutrientes contaminantes. Todo este proceso tiene un TRH de 1 hr con 35 min y logra una remoción promedio del 56% de los nutrientes dentro del efluente.

Figura 6*Secuencia del sistema*

La composición y orden de las estructuras se mantuvo tal y como se muestra en el diseño de la Figura 6. Dentro de cada biofiltro, los medios filtrantes se colocaron con 10 cm de alto por sustrato a excepción del compost que se colocó con 16 cm de grosor con el objetivo de favorecer el crecimiento radicular de la *Heliconia psittacorum* desde etapas iniciales y así incrementar la absorción de nutrientes.

Evaluación del Desempeño del Biofiltro en Remoción de Contaminantes Priorizados

A través del análisis de 39 muestras, se evaluó la remoción de cuatro nutrientes, priorizando aquellos más perjudiciales para los cuerpos de agua, como nitratos, nitrógeno total, fosfatos y fósforo total. En la Figura 7 se presentan los resultados de los análisis de fosfatos. Aunque la eficiencia de remoción varió significativamente a lo largo del ciclo de muestreo, se observó que durante los primeros días de operación la remoción del contaminante fue de apenas un 3%. El porcentaje más alto de remoción de fosfatos se produjo en el último día de muestreo, lo que sugiere que este sistema requiere tiempo para estabilizarse y comenzar a remover nutrientes de manera eficiente.

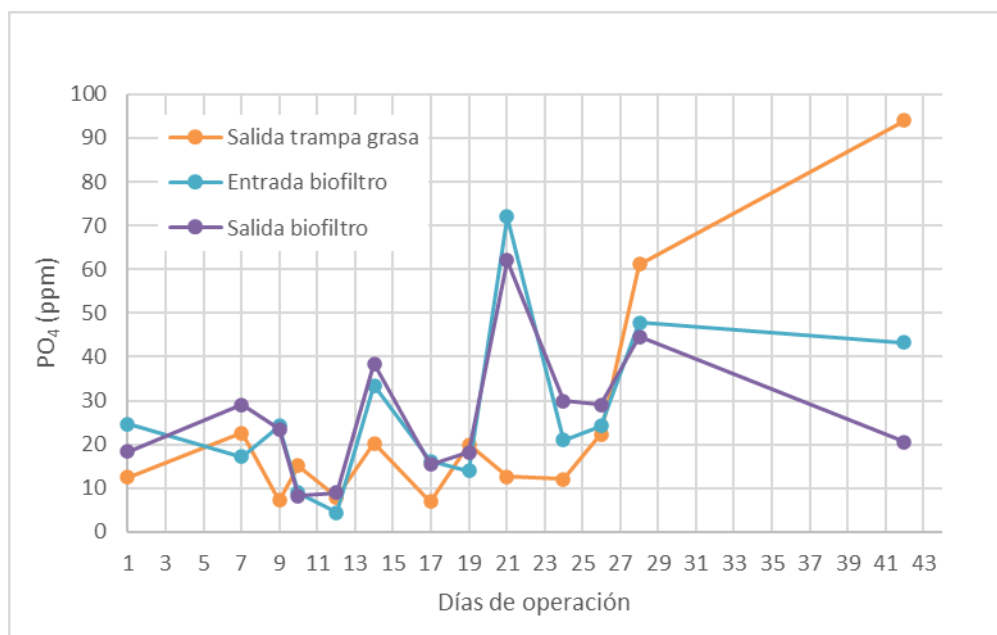
Los fosfatos son sustancias requeridos por las plantas para su crecimiento y cuando se encuentra en cantidades excesivas dentro del agua, promueven el crecimiento excesivo de algas, induciendo a la contaminación y eutrofización dentro de cuerpos de agua (Lavie et al., 2010). Por esta

razón, la reducción de fosfatos en las aguas grises estudiadas dentro de esta investigación es crucial para disminuir la probabilidad de proliferación de algas dentro del Lago de Yojoa.

Entre la salida de la trampa de grasa y la entrada del biofiltro, el efluente pasa a través de tanques de eculización, que sirven como una extensión del sistema de trampa de grasa. Estos tanques juegan un papel importante de mantener un caudal constante y la homogeneización del efluente, lo que permite la separación de grasa y sólidos que no se eliminaron por completo en la trampa de grasa. Al aumentar el tiempo de retención hidráulica (TRH) en estos tanques, se logra una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, ya que permite que los sólidos sedimentables se depositen en el fondo y que las grasas floten a la superficie, mejorando así la calidad. del efluente antes de su tratamiento en el biofiltro. Este proceso de pretratamiento es esencial, ya que reduce la carga de contaminantes que ingresan al biofiltro, optimizando su funcionamiento y favoreciendo la efectividad en la remoción de nutrientes y otros contaminantes presentes en las aguas grises.

Figura 7

Concentraciones de fosfatos en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación

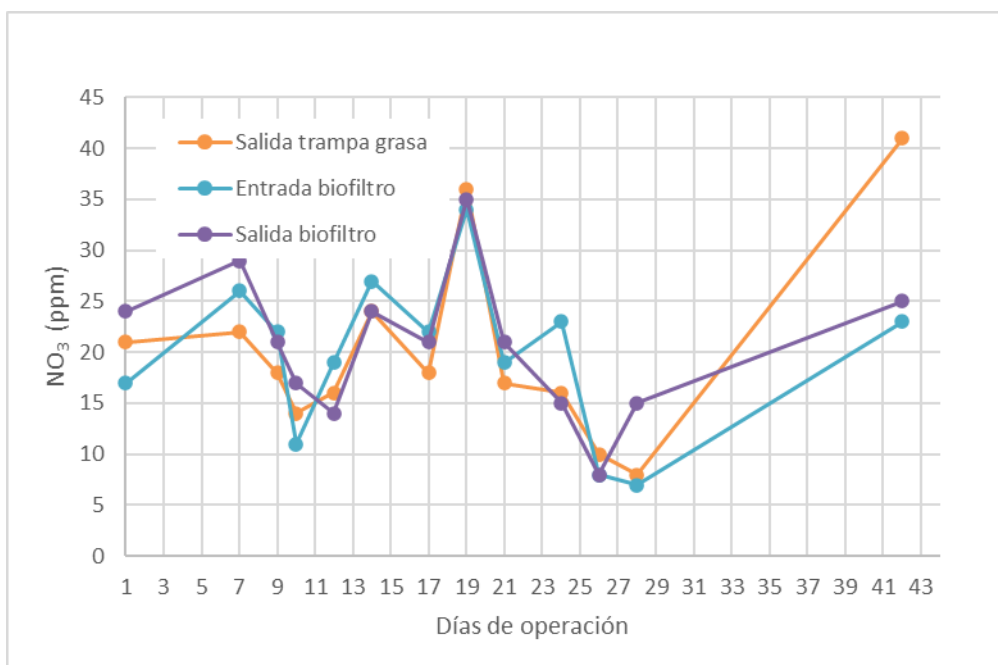


Los resultados de laboratorio sobre la remoción de nitratos se presentan en la Figura 8. En cada muestreo, los resultados son consistentes, mostrando un porcentaje de remoción que se repite

en un 4%, esto representa una absorción mínima del nutriente. El día 24 se destaca por tener el porcentaje de remoción más elevado de toda la investigación, alcanzando un 34% de eficiencia, lo que indica que el sistema está comenzando su fase de estabilización. La eliminación de nitrógeno en estos sistemas está ligada a la eliminación de sólidos suspendidos durante su paso por medio poroso mediante sedimentación y filtración. El nitrógeno se absorbe y se transforma en nitrato, que luego las plantas utilizan para su proceso de crecimiento (Quintero García et al., 2021).

Figura 8

Concentraciones de nitratos en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación

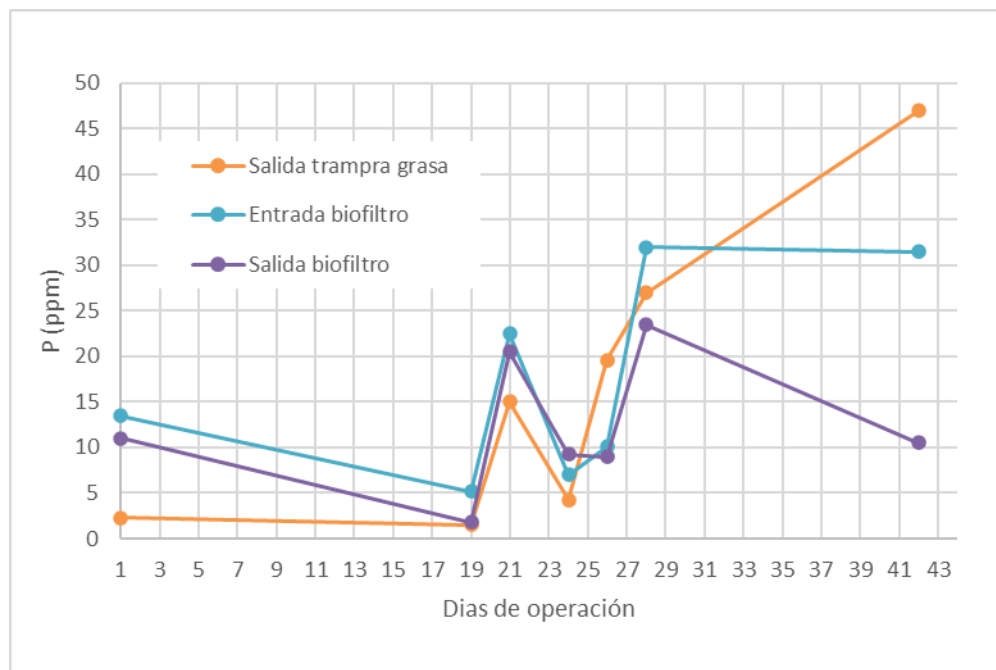


En la Figura 9 se pueden observar los datos correspondientes a fósforo (P) los cuales son favorables respecto a la eficiencia del sistema. En dos ocasiones se observa una remoción del 65% del nutriente, haciendo una comparación entre la concentración de entrada con la de la salida del biofiltro, mientras que la remoción mínima es del 8%. Según la *Norma Técnica de las Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y Alcantarillado Sanitario* en Honduras, el valor de concentración máximo permisible para el nutriente fósforo es de 5 mg/L. Aunque el biofiltro logró

reducir gran porcentaje de la concentración de fósforo dentro del efluente, solo el 30% de los muestreos estuvo bajo el rango permitido por parte de la normativa hondureña.

Figura 9

Concentraciones de fósforo en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación

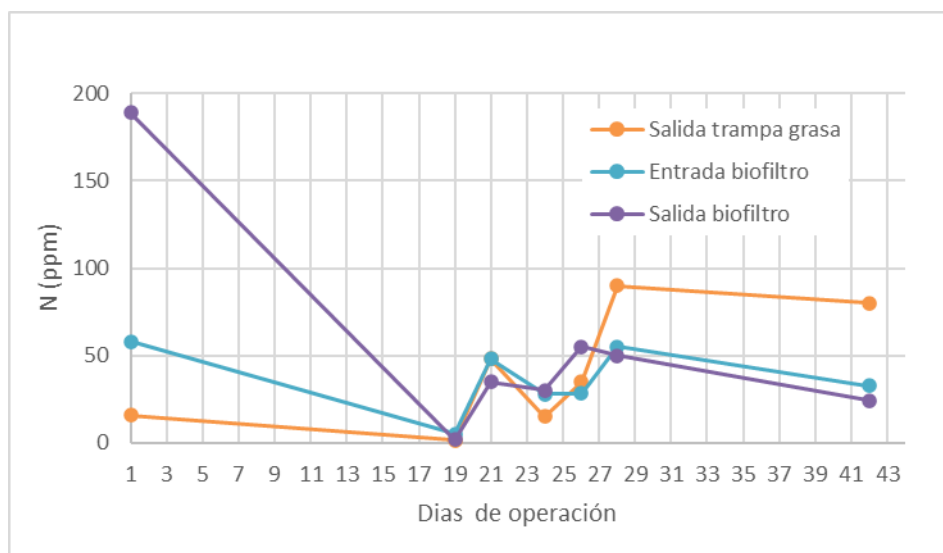


En la Figura 10 se observan los resultados de nitrógeno (N). En el primer muestreo, se observó una alta concentración de nitrógeno en la salida del biofiltro, lo cual se atribuye al lavado de materiales con alto contenido de nitrógeno y a la potencial liberación de compuestos nitrogenados del compost del biofiltro. Sin embargo, a medida que transcurren los días y el sistema se adapta, se evidencia una mejora en su desempeño. La mayor remoción de nitrógeno se registró el día 19 de operación, alcanzando un 65%. La remoción de nitrógeno se le atribuye principalmente a la *Heliconia psittacorum* ya que este es un nutriente que favorece su crecimiento y apoya a su proceso de fotosíntesis (Gutiérrez et al., 2010). Aunque el uso de compost inicialmente incrementó el contenido de nitrógeno en la salida del biofiltro, este material era esencial para el trasplante de la *Heliconia psittacorum*. El

compost proporciona un sustrato adecuado que minimiza el estrés de las plantas y promueve su óptimo desarrollo (Pilco Quispe, 2023).

Figura 10

Concentraciones de Nitrógeno en las etapas del sistema durante el periodo de evaluación

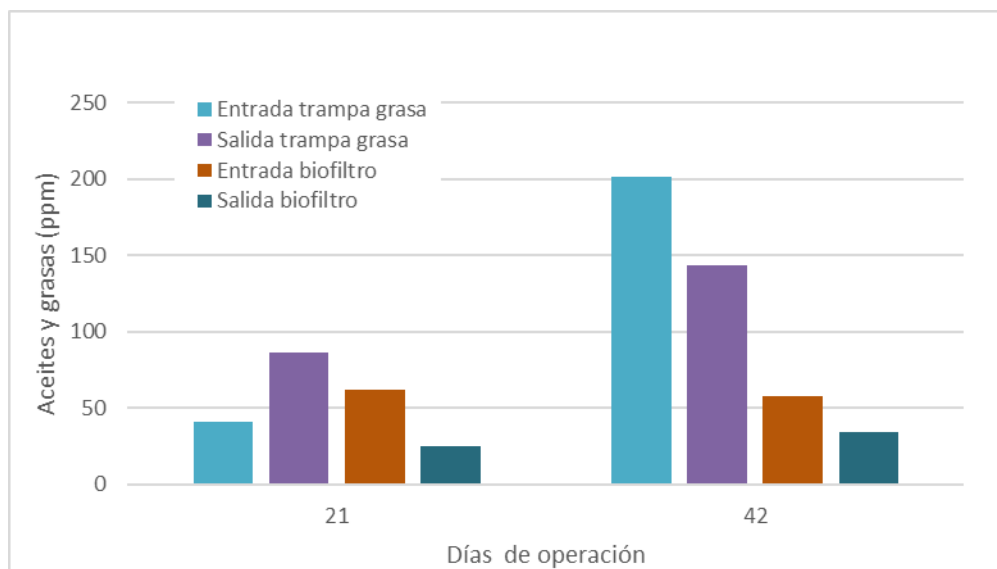


Por la naturaleza de los restaurantes de este sector y el tipo de producto que ofrecen (varios alimentos fritos), fue relevante la cuantificación de la concentración de aceites y grasas. En la Figura 11 se presentan los resultados de las concentraciones medidas de aceites y grasas. Para este resultado solo se realizaron los análisis de dos muestreos que se consideraron representativos para observar el comportamiento de estos contaminantes. Se obtuvieron resultados significativos logrando el 60% de remoción por parte del sistema en el día 42 de operación del nuevo sistema.

En el caso de este parámetro la normativa hondureña permite un valor máximo de concentración de 10 mg/L en las descargas a cuerpos receptores. Como en los demás parámetros, en este tampoco se logra el cumplimiento de la normativa en el efluente final a pesar del gran porcentaje de remoción que muestra el biofiltro. Esto demuestra que el sistema aún necesita mejoras para lograr el cumplimiento de la normativa.

Figura 11

Concentración de aceites y grasas en las etapas del sistema



El subdimensionamiento de las trampas grasas actuales se presenta como un problema crítico en el tratamiento de aguas grises en el sector restaurantero. Estas trampas, al no estar adecuadamente dimensionadas para el volumen y la carga contaminante de los efluentes generados, resultan ineficientes en la remoción de grasas, aceites y sólidos suspendidos. Este déficit de capacidad se traduce en un tiempo de retención hidráulica (TRH) insuficiente, lo que limita la efectividad del proceso de separación y tratamiento. Sin embargo, al incrementar el TRH mediante la implementación de tanques equalizadores, se observa una mejora notable en la eficiencia de remoción de los contaminantes de interés, lo que sugiere que una adecuada gestión del tiempo de retención podría mitigar significativamente el problema del subdimensionamiento.

A pesar de estas mejoras, es importante destacar que, debido a la carga de contaminantes que reciben, los biofiltros diseñados no funcionarán de manera óptima y, por ende, no se alcanzarán los requisitos normativos establecidos para el tratamiento de aguas residuales. Esto resalta la necesidad de considerar tratamientos adicionales para las aguas grises en los restaurantes, asegurando así la protección del medio ambiente y el cumplimiento de las normativas vigentes.

Conclusiones

El sistema actual de trampas de grasa en el restaurante evaluado es ineficiente para eliminar nutrientes, aceites y grasas. En la mayoría de las ocasiones las concentraciones en la salida del sistema actual son incluso mayores a las que ingresan y los parámetros evaluados se encuentran en incumplimiento de la normativa técnica nacional de aguas residuales. Al ser este el único sistema adoptado por todos los restaurantes, el presente estudio indica la necesidad de buscar alternativas eficientes para el tratamiento de las aguas grises de este sector.

El prototipo de biofiltro diseñado propuso procesos de filtración física y absorción de nutrientes por vegetación de fácil adaptabilidad a las condiciones del agua residual y de la zona. Los materiales de construcción seleccionados fueron de bajo costo y disponibilidad local con el fin de reducir los contaminantes evaluados y favorecer la posibilidad de adopción a futuro por parte del sector restaurantero. La puesta en marcha del sistema requirió de pruebas y redefiniciones continuas a lo largo del estudio para mejorar la operación y eficiencia. Sin embargo, retos adicionales se identificaron para la adopción debido a la percepción favorable de la eficiencia del sistema actual y a la capacidad técnica local para la operación del sistema.

El prototipo de biofiltro tiene un funcionamiento efectivo para la remoción de nutrientes, particularmente nitrógeno (65%), fósforo (65%), nitratos (34%) y aceites y grasas (60%) luego de 42 días de operación. Sin embargo, la reducción de estos parámetros no fue consistente y continua durante el ensayo de evaluación, y la secuencia de tratamientos propuesta no logro reducir los parámetros estudiados a valores por debajo de la normativa vigente para aguas residuales.

Recomendaciones

Realizar esta investigación durante un periodo más prolongado. Un mayor tiempo de operación permitirá que se observen porcentajes mayores de remoción debido al mejor establecimiento y desarrollo de las plantas.

Diseñar el biofiltro basándose en la medición precisa del caudal correspondiente al restaurante en donde se instalará permitiendo una mayor efectividad del sistema ya que estará operando con el caudal de diseño previsto favoreciendo su rendimiento.

Implementar mejoras en los sistemas actuales de trampa grasa para aumentar su eficiencia. Esto incluye una revisión y actualización de los componentes con el fin de asegurar el funcionamiento óptimo del sistema.

Capacitar a los propietarios y empleados sobre las prácticas adecuadas de manejo y mantenimiento del sistema. Esto incluye técnicas preventivas para evitar obstrucciones de tuberías como el procedimiento correcto de limpieza.

Implementar prácticas de producción más limpia en cocina, buscando la limpieza en seco de los aceites y grasas, reduciendo el uso de jabones con altas concentraciones de fosfatos y mejorando la separación de aceites usados.

Referencias

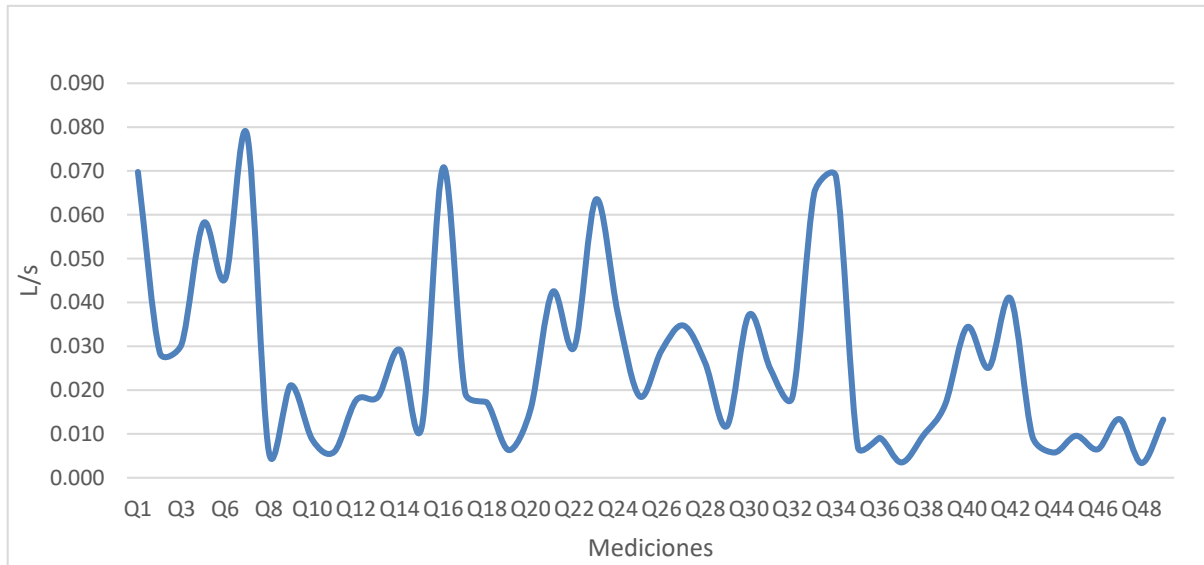
- Abrego, M. (2023). *Caracterización del fitoplancton y estado trófico del Lago de Yojoa* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/58c891ee-d915-4a07-9e96-53e077eba6f1/content>
- Almonacid, M. (2017). *Implementación de un sistema de oxidación química para la remoción de nitrógeno amoniacal de aguas residuales* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú. https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/1109/1/T088A_74740049_T.pdf
- Arellano, A. y Sánchez, E. (2017). *Propuesta de mejora de diseño de una trampa de grasa para restaurantes* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, México]. RIS. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14522/Propuesta%20de%20mejora%20de%20dise%C3%B1o%20de%20una%20trampa%20de%20grasa%20para%20restaurantes.pdf?sequence=1>
- Baird, R. B. y Eaton, A. D. (Eds.). (2017). *Standard methods for examination of water and wastewater* (Twenty third edition). American Public Health Association.
- Chacón Chaquea, M. Y. (2017). *Análisis físico y químico de la calidad del agua* (1ª ed.). Ediciones USTA.
- Cohen, Y. (2001). Biofiltration--the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: A review. *Bioresource Technology*, 77(3), 257–274. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00074-2)
- Costa Posada, C., Domínguez Calle, E., Gonzalo Rivera, H. y Vanegas Sarmiento, R. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*(22), 104–111. <https://doi.org/10.16924/reving.22.12>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera.
- Demin, P. E. (2014). *Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego* (1ª ed.). INTA Ediciones. INTA Ediciones. <https://repositorio.inta.gov.ar/handle/20.500.12123/16654>
- Dueck, I. G. y Pyl'nik, S. V. (2009). Theoretical and experimental study of the processes of water purification in a biofilter. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 82(2), 267–276. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0197-6>
- Galindo, G. (2019). El Design Thinking: una técnica que conquista nuevos mercados. *Revista De Estudios En Comunicación*. http://dspace.uces.edu.ar:8180/xmlui/bitstream/handle/123456789/4817/Galindo_El_Design_Thinking.pdf?sequence=1
- García Jaya, F. G. (2016). *Influencia de las aguas residuales en la alcalinidad de las aguas del estero el macho en el sector dos bocas* [, Unidad Tecnica de Machala, Ecuador]. repositorio.utmachala.edu.ec. <https://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/7706>
- García Miranda, F. G. y Miranda Rosales, V. (2018). *Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. Impacto socio-ambiental, territorios sostenibles y desarrollo regional desde el turismo: Vol. 2.*

Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores. <http://ru.iiec.unam.mx/4269/>

- Gutiérrez, H., Peña, M. y Aponte, A. (2010). Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales ... *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, Artículo 56. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-62302010000600009&script=sci_arttext
- Hernandez, M. y Lopez, R. (2011). *Evaluación de impacto ambiental y alternativa de tratamiento de aguas jabonosas en el centro ecoturístico Cahuaré en el municipio de Chiapa de Corzo* [Tesis]. Universidad Autónoma de Chiapas, Chiapas, Mexico. <https://www.cecodes.net/files/EVALUACI%C3%93N%20DE%20IMPACTO%20AMBIENTAL%20Y%20ALTERNATIVA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20JABONOSAS%20EN%20EL%20CENTRO%20ECOTUR%3%8DSTICO%20CAHUAR%C3%89%20EN%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20CHIAPA%20DE%20CORZO.pdf>
- Irias Barahona, C. I. (2023). *Diagnóstico de la gestión de residuos líquidos en el sector de restaurantes del lago de Yojoa* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Jenny, J.-P., Anneville, O., Arnaud, F., Baulaz, Y., Bouffard, D., Domaizon, I., Bocaniov, S. A., Chèvre, N., Dittrich, M., Dorioz, J.-M., Dunlop, E. S., Dur, G., Guillard, J., Guinaldo, T., Jacquet, S., Jamoneau, A., Jawed, Z., Jeppesen, E., Krantzberg, G., . . . Weyhenmeyer, G. A. (2020). Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 46(4), 686–702. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.006>
- Jiménez, S. (2012). *Estudio teórico para el control de la contaminación por grasas y aceites generada por la actividad industrial, doméstica y de servicios* [Tesis de Pregrado, Instituto Politécnico Nacional, México]. RIS. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18479/1/25-1-16898.pdf>
- Jiménez Chura, O. A. (2020). *Identificar las causas de los impactos ambientales producidos por la actividad minera sobre los recursos hídricos que desembocan al lago Titicaca - Puno* [Tesis de Posgrado, Universidad Paulo Freire; NI, Lima, Perú]. renati.sunedu.gob.pe. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3083162>
- Lavie, E., Morábito, J. A., Salatino, S. E., Bermejillo, A. y Filippini, M. F. (2010). Redalyc.Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias*, 42(1), 169–184. <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382837646012.pdf>
- Llamas, A. (2009). *Investigadores del CUCEI estudian el Lago de Chapala a fondo | Coordinación General de Comunicación Social*. Universidad de Guadalajara. <https://comsoc.udg.mx/noticia/investigadores-del-cucei-estudian-el-lago-de-chapala-fondo>
- Luna Pebello, V. M. y Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 17, 32–55. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revespciequibio/cqb-2014/cqb141c.pdf>
- Nujic, M., Milinkovic, D. y Habuda-Stanic, M. (2017). Nitrate removal from water by ion exchange. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 9(2), 182–186. <https://doi.org/10.17508/CJFST.2017.9.2.15>

- Olayo, L. F. (2016). Aguas residuales y contaminación del lago de Amatitlán: Villa Canales y Villa Nueva (2005-2014). *Ciencia, Tecnología Y Salud*, 3(2), 189. <https://doi.org/10.36829/63cts.v3i2.271>
- Otálora Rodríguez, A. P. (2011). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia]. [repositorio.unal.edu.co. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8425](https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8425)
- Palmer, S. y Corpus, W. (2018). Diseño e implementación de un filtro para tratamiento de aguas grises en la aplicación de un sistema de riego para una huerta casera en San Andrés Islas ... *Revista Loginn*, 2(1). <https://revistas.sena.edu.co/index.php/log/article/download/1662/1783>
- Pilco Quispe, J. D. (2023). *Evaluación de diferentes sustratos en la adaptación al trasplante de plantas de mora de castilla (Rubus glaucus Benth) obtenidas por semilla* [Proyecto de Investigación]. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/39756/1/061%20Agronom%3%ada%20-%20Pilco%20Quispe%20Jonathan%20David.pdf>
- Puma, E. K. y Palomino, K. A. (2019). Caracterización de *Pseudomonas sp.* En aguas residuales de cuatro restaurantes de la ciudad del Cusco, Perú. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(4), 15–21. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7464977>
- Pütz, P. (2009). Eliminación y determinación de fosfato. *Interempresas. Industria química*(31), 48–49. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2966977>
- Quintero García, K. L., Rodríguez Zúñiga, D. P., González Duque, M. E. y Arroyave Rojas, J. A. (2021). Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. *Ingeniería y Región*, 25, 82–94. <https://doi.org/10.25054/22161325.2921>
- Ramirez Amacifuen, K. P. y Paredes Vásquez, M. E. (2019). *Evaluación de dos especies macrófitas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en la remoción de contaminantes microbiológicos y químicos a través de un sistema de biofiltro en aguas residuales domésticas, Tarapoto – 2018* [Tesis, Universidad César Vallejo, Perú]. [repositorio.ucv.edu.pe. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39476](https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39476)
- Reyes, J. (2016). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en Biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *Enfoque UTE*, 7(3), 41–56. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.104>
- Rivas Castro, A. B. (Noviembre, 2019). *Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/67b581c2-1a93-4285-ac16-e95b40548146/content>
- Show, K.-Y. y Tay, J.-H. (1999). Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters. *Water Research*, 33(6), 1471–1481. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00352-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00352-2)

- Soto, V. y Quezada, J. C. (2016). *Propuesta para el Tratamiento y Uso Sostenible de las Aguas Residuales del Hotel Resort CoopMarena* [Tesis de Posgrado]. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, Republica Dominicana. <https://repositorio.unphu.edu.do/bitstream/handle/123456789/5286/Propuesta%20para%20el%20Tratamiento%20y%20Uso%20Sostenible%20de%20las%20Aguas%20Residuales%20del%20Hotel%20Resort%20CoopMarena.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tarco Guilcamaigua, F. R. y Veintimilla Calvopiña, K. (2010). *La contaminación del agua. Análisis jurídico sobre la protección del Rio Cutuchi y su saneamiento en la ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi.* LATACUNGA / UTC / 2010. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1164>
- Trang, N. T. D., Konnerup, D., Schierup, H.-H., Chiem, N. H., Le Tuan, A. y Brix, H. (2010). Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. *Ecological Engineering*, 36(4), 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.11.022>
- Zulaikha, S., Lau, W. J., Ismail, A. F. y Jaafar, J. (2014). Treatment of restaurant wastewater using ultrafiltration and nanofiltration membranes. *Journal of Water Process Engineering*, 2, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.05.001>

Anexos**Anexo A***Medición de caudal de entrada*

Anexo B*Resultados de pH*

Punto	1	2	3	4
Dia 1	5.7	6.8	7.5	6.6
Dia 7	6.2	2.2	5.9	5.6
Dia 9	6.4	7.3	6.7	5.8
Dia 10	6.2	5.3	5.6	5.5
Dia 12	6.7	6.6	6.3	5.9
Dia 14	6.8	6.0	6.2	5.7
Dia 17	5.3	6.2	6.2	6.2
Dia 19	6.4	6.3	6.0	5.9
Dia 21	7.2	6.7	5.7	5.4
Dia 24	7.1	6.4	5.3	5.2
Dia 26	6.2	6.6	6.1	6.2
Dia 28	5.2	6.6	6.3	6.0
Dia42	4.7	4.7	5.3	5.8

Anexo C*Resultados de conductividad*

Punto	1	2	3	4
Dia 1	293.1	585	896.9	744.7
Dia 7	84.9	1,227.3	1,511.4	1,743.3
Dia 9	294.4	466.5	760	1,003.2
Dia 10	69.1	532.6	146.4	436.7
Dia 12	222.9	422.4	267.2	193.5
Dia 14	342.4	902.9	1,124.3	988.7
Dia 17	808.1	238.1	443.4	373
Dia 19	601.1	778.5	902.6	930.8
Dia 21	342.8	926.3	1,602.3	1,858.4
Dia 24	142.1	1090	1,783.2	1,848.6
Dia 26	165	693.8	636.3	643.7
Dia 28	7,164.70	470.9	448.8	488.8
Dia42	256.3	3,625.6	1,391.8	680.1

Anexo D*Resultados de solidos disueltos*

Punto	1	2	3	4
Dia 1	117.6	231.7	339.3	299.4
Dia 7	34	489.3	606	704
Dia 9	118.3	187.8	299.4	401.7
Dia 10	27.6	212.4	58.3	174.7
Dia 12	89.2	169.7	105.5	77.5
Dia 14	136.6	362.1	446.8	395.6
Dia 17	310.9	95.4	180.2	149.4
Dia 19	238.9	312.5	359.3	372.9
Dia 21	132	371.4	638	745.8
Dia 24	55.4	436.4	719.6	739.7
Dia 26	63.8	267.8	256.1	257.8
Dia 28	287.3	184	181	192.9
Dia42	102.9	1,448.3	561.3	267.5

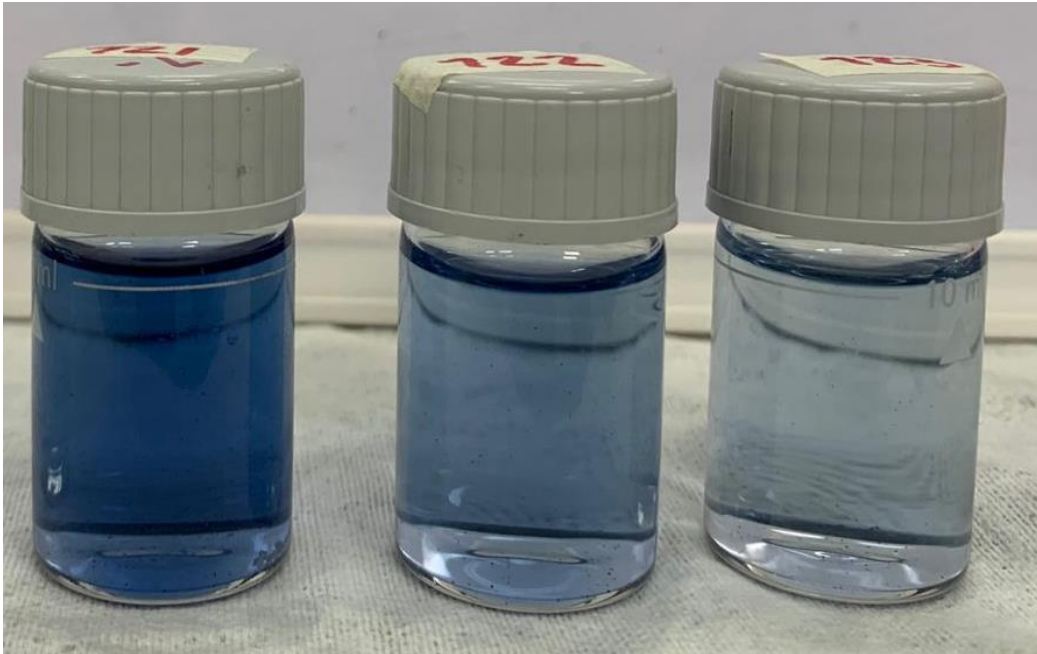
Anexo E

Muestras del día 42



Anexo F

Análisis de fosfatos en muestras de día 42



Anexo G*Separación de grasas en tanques de retención*

Anexo H*Tanques de retención*

Anexo I

Cobertura vegetal día 1



Anexo J

Cobertura vegetal día 42

