



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA



**“REVISIÓN DOCUMENTAL: TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN CONTEXTOS COMUNITARIOS”**

Tesis para obtener el título de Licenciada en:

QUÍMICO-FARMACOBIOLOGÍA

PRESENTA:

APRILIS ALONDRA RUIZ RUIZ

ASESORA DE TESIS

DRA. MARÍA GUADALUPE SOTO MOLINA

Morelia, Michoacán. Agosto, 2022

DEDICATORIA

A Dios quien me dio sabiduría, perseverancia, amor y fortaleza para seguir adelante y culminar esta tesis de investigación a pesar de las adversidades.

A mis padres por haberme dado la oportunidad de terminar una Licenciatura y de haber creído en mí.

A mi hermana Celeste por enseñarme y demostrar que la perseverancia, la responsabilidad y la disciplina son hábitos de éxito.

A mi hermano Aldo que me ha enseñado a fortalecerme y seguir siempre adelante a pesar de la adversidad.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por la vida, el estudio y el trabajo que nos ha dado en todo momento. Por haberme brindado la fortaleza para cumplir uno de mis objetivos y por las bendiciones que nos proporciona todos los días.

A mis padres por haberme brindado su apoyo incondicional y palabras de ánimo a pesar de las dificultades en mi trayectoria de vida y académica.

A mi hermana Celeste y mi hermano Aldo, que influyeron en mí y me enseñaron a forjarme en rectitud y actitud para lograr mis metas como profesional, brindando siempre animo a pesar de los momentos difíciles.

A la Dra. María Guadalupe Soto Molina y al maestro Tellitud Hilario Sosa Ruiz, los que me orientaron y apoyaron en esta tesis de investigación, por sus enseñanzas, consejos y el tiempo que dedicaron en revisar la tesis.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	8
Abstract	9
Introducción.....	10
Justificación.....	12
CAPÍTULO 1: PROBLEMA DE ESTUDIO.....	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Pregunta de investigación	16
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo general.....	16
1.4.2 Objetivos específicos	17
1.5 Supuesto	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Descripción de los diferentes procesos de recuperación de suelos y agua. 17	
2.1.1 ¿Qué es la biorremediación?.....	17
2.1.2 La biorremediación se clasifica en 2 tipos de técnicas:.....	18
2.1.2.1 Técnicas de biorremediación in situ.....	18
2.1.2.1.1 Atenuación natural (biorremediación intrínseca).....	18
2.1.2.1.2 Bioestimulación.....	18
2.1.2.1.3 Bioaumentación.	19
2.1.2.1.4 Fitorremediación.	19
2.1.2.2 Técnicas de biorremediación ex situ.....	20
2.1.2.2.1 Biorreactor.	20
2.1.2.2.2 Compostaje.....	20

2.1.2.2.3 Lombricultura.	21
2.1.2.2.4 Biopilas.	21
2.2 Desarrollo de los procesos de biorestauración.....	22
2.2.1 ¿Cuál es el objetivo del tratamiento de las aguas residuales?	22
2.2.2 Procesos de biorestauración de aguas residuales.....	23
2.3 Tecnologías empleadas en los procesos de biorestauración.....	24
2.3.1 Lodos activados.	24
2.3.2 Lagunas de estabilización también llamadas Lagunas de oxidación.	24
2.3.3 Lagunas microalgales de alta tasa.....	25
2.4 Características físicas y geográficas necesarias para la aplicación de la biorestauración.....	26
2.4.1 Características físicas.	26
2.4.1.1 Factores físicos del lugar a estudiar.	26
2.4.1.2 Factores fisicoquímicos del contaminante.	27
2.4.1.3 Factores biológicos.	28
2.4.2 Características geográficas.....	30
CAPÍTULO 3. MÉTODOS	33
3.1 Diseños metodológicos empleados en biorremediación.	33
3.1.1 Sistema Tohá.....	34
3.1.2 Humedales.....	36
3.2 Características de los procesos de biorremediación.....	39
3.2.1 Sistema Tohá.....	39
3.2.2 Humedales.....	42
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	45
4.1 Diferencias encontradas entre métodos.....	45

4.1.1 Sistema Tohá.....	45
4.1.2 Humedales.....	45
4.2 Selección de la mejor propuesta.....	46
4.2.1 ¿Por qué?	46
4.2.2 Impacto social.....	49
4.2.3 Impacto ambiental.....	49
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS	51
Conclusiones	51
Como propuestas se sugiere:	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

Índice de figuras

Figura 3.1. Aspersores de aguas residuales y aireadores del biofiltro.	36
Figura 3.2. Humedal artificial de la Estación de Servicio Biomax Colina.....	38
Figura 3.3. Funcionamiento del sistema Tohá.....	40
Figura 3.4. Procesos de tratamiento del sistema Tohá.	41
Figura 3.5. Plantas acuáticas comunes.....	42
Figura 3.6. a) Humedal de flujo sub-superficial vertical.....	43
Figura 3.7. b) Humedal de flujo sub-superficial horizontal.....	44
Figura 4.1. Lombrifiltro de Mowi Chile.	48
Figura 4.2. Humedales flotantes.....	50

Resumen

En la presente tesis, se realizó una investigación documental sobre las tecnologías más usadas para el tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de establecer las diferencias entre estas y definir cuáles pueden ser las más apropiadas para darle continuidad a las investigaciones prácticas, y posteriormente, implementarlas a nivel industrial y comunitario. Para ello se utilizaron las siguientes bases de datos: Google académico, Scielo y ResearchGate. Encontrándose que, las lagunas de estabilización y los lodos activados son las más empleadas en América Latina, hasta el 2013. No obstante, para realizar cualquier sistema de tratamiento para aguas residuales se requiere analizar las características del sistema y del lugar, como son el tipo de agua a tratar, el caudal, los tiempos de retención hidráulica, los costos de la implementación durante su funcionamiento y sostenimiento, entre otros. De igual forma, la falta de pretratamientos antes de los sistemas biológicos seleccionados originan insuficiencias en la depuración y remoción de contaminantes, al igual que problemas de operación. Por lo que se investigaron otras tecnologías. Encontrándose que desde el 2013 hasta la actualidad, el sistema Tohá y los humedales construidos, son ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales, resultando con altas eficiencias en cuanto a la remoción de contaminantes y los parámetros básicos a evaluar (DBO, DQO, SST, pH). Los cuales son los más factibles para divulgar a nivel institucional, industrial y comunitario para darle seguimiento a investigaciones prácticas, para su posterior implementación y cuidado. Esto debido a las ventajas que ofrecen en comparación con otras opciones. Entre ellas, son sistemas económicos, generan cobertura vegetal contribuyendo a la captación de CO₂, son de bajo costo energético y de fácil operación. En donde el Sistema Tohá resultó ser el más sustentable debido a la producción del humus generado por las lombrices, el cual puede ser usado como subproducto en otras áreas.

Palabras clave: Sistema Tohá, Humedales, Tratamiento de aguas residuales, Calidad del agua, Desarrollo de la comunidad.

Abstract

In this thesis, a documentary research was conducted on the most used technologies for wastewater treatment, with the objective of establishing the differences between them and defining which may be the most appropriate to give continuity to practical research, and subsequently, to implement them at industrial and community level. For this purpose, the following databases were used: Google Scholar, Scielo and ResearchGate. It was found that stabilization ponds and activated sludge are the most used in Latin America, up to 2013. However, in order to implement any wastewater treatment system, it is necessary to analyze the characteristics of the system and the site, such as the type of water to be treated, the flow, hydraulic retention times, implementation costs during operation and maintenance, among others. Likewise, the lack of pretreatment before the selected biological systems causes insufficiencies in the purification and removal of pollutants, as well as operational problems. Therefore, other technologies were investigated. It was found that from 2013 to the present, the Tohá system and constructed wetlands are widely used for wastewater treatment, resulting in high efficiencies in terms of pollutant removal and the basic parameters to be evaluated (BOD, COD, TSS, pH). Which are the most feasible to disseminate at institutional, industrial and community level to follow up on practical research, for its subsequent implementation and care. This is due to the advantages they offer compared to other options. Among them, they are economic systems, they generate vegetation cover contributing to CO₂ capture, they are low energy cost and easy to operate. The Tohá system proved to be the most sustainable due to the production of humus generated by the earthworms, which can be used as a by-product in other areas.

Key words: Tohá system, Wetlands, Wastewater treatment, Water quality, Community development.

Introducción

Los recursos naturales son vitales para la subsistencia de la humanidad. Por lo que, el hecho de cuidarlos se debe de convertir en un hábito cotidiano e intensificarse en el ámbito laboral, científico, educativo y social, así como a nivel comunitario, municipal, estatal y federal.

La contaminación ambiental es un problema social que siempre ha existido, pero se ha incrementado en los últimos 10 años, deteriorando gravemente el aire, el agua y el suelo, debido a las diferentes actividades antrópicas, el crecimiento demográfico, la tala de árboles, derrames petroleros (contaminación por hidrocarburos) y las incontroladas descargas de aguas residuales de origen industrial, domestico, rural y urbano, las cuales pueden generar biosólidos, sustancias tóxicas o contener concentraciones de metales pesados, que a veces son utilizadas para el riego de cultivos poniendo en peligro la salud humana.

Aunque existen tratamientos como la incineración, deshidratación, precipitación química, filtración por membrana, nanofiltración, entre otros, para manejar estos biosólidos y este tipo de aguas contaminadas, en la mayoría de las circunstancias no se cuenta con la tecnología ni los recursos suficientes para llevar a la práctica tales tratamientos. De ahí la importancia de investigar otras alternativas menos costosas para solucionar dicha problemática (Caviedes *et al.* 2015). Esta tesis se propone revisar diferentes alternativas sobre el tratamiento de los desechos líquidos, considerando que la biorremediación, sería una de las mejores alternativas para solucionar tal problemática, ya que sus técnicas y metodologías están basadas en utilizar el metabolismo de la microbiota autóctona o bien, con la adición de microorganismos para mejorar los procesos naturales del lugar de estudio.

La práctica de campo en investigaciones científicas sobre el suelo y el agua son fundamentales en la actualidad, debido a que los estudios se complementan para determinar mayores beneficios y así llevar a una biorremediación de aplicación rápida, eficiente y eficaz, como alternativa para las presentes y futuras generaciones. Para ello, es imprescindible darle continuidad a la primera etapa que

se deriva de una investigación documental para posteriormente, realizar la restauración correspondiente.

Es importante mencionar que para cualquier propuesta de restauración ecológica mediante la biorremediación, son de observancia obligatoria los siguientes pasos, la realización de un análisis previo del lugar de estudio; llevar a cabo una investigación bibliográfica con el objetivo de conocer y saber más acerca de los aspectos sociales, económicos y geográficos; proceder con una investigación de campo para compilar toda la información útil que nos ayudará a determinar el nivel de contaminación, al igual que determinar los factores ecológicos y biológicos que influyen en el medio ambiente del sitio de estudio; determinar mediante estudios microbiológicos de laboratorio las características de los organismos y microorganismos o microbiota autóctona presente en el lugar; seleccionar el sistema de restauración y finalmente, implementar el sistema propuesto. Por último, una vez que se haya seleccionado el diseño más apropiado, se realiza una investigación experimental para averiguar el grado de eficiencia y efectividad que este pudiera tener (Oseguera *et al.* 2016).

Justificación

En la actualidad el cambio climático y las actividades antrópicas, han incrementado el deterioro y la contaminación de los cuerpos de agua, presentando alteraciones respecto a su calidad, como son la pérdida de sus características químicas, físicas y fisicoquímicas, lo que conlleva a un cambio perjudicial en el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas en general, afectando de manera nociva a la biodiversidad por su disminución, daño y extinción de los ecosistemas, y por consecuencia a la humanidad, en cuanto a sus aspectos socioeconómicos, incrementando la incidencia y el desarrollo de enfermedades, por mutaciones ocasionadas en los organismos vivos (Pedraza, 2015).

Es por ello que, se tienen que intensificar las investigaciones sobre tecnologías que contribuyan a tratar las aguas residuales. Así como, el seguimiento de una adecuada restauración es esencial para que el cierre de los ciclos biogeoquímicos y las cadenas tróficas se sigan llevando a cabo espontáneamente en beneficio de todos los ecosistemas. La biorremediación ha resultado ser una mejor alternativa en comparación con las técnicas fisicoquímicas, ya que en lugares de estudio se ha logrado degradar selectivamente algunos contaminantes sin perjudicar el ecosistema, de tal manera que se mejora la sustentabilidad de los recursos naturales.

La eficiente planeación en los sistemas de gestión es vital para lograr un desarrollo sostenible, en donde los objetivos deben estar enfocados en la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para llevar a cabo un equilibrio en el control y manejo de la contaminación ambiental y disminuir el cambio climático (Garzón *et al.* 2017).

CAPÍTULO 1: PROBLEMA DE ESTUDIO

1.1 Antecedentes

La ciencia y la tecnología definida como cualquier trabajo original de investigación o aplicación que tenga algún avance en conocimiento o desarrollo tecnológico se fundamenta en las diferentes materias de estudio, ambas han sido aplicadas como alternativas para prevenir y enfrentar desastres ecológicos provocados por las actividades humanas, las cuales amenazan y afectan a todos los componentes de los ecosistemas, por lo que su restauración es vital para la recuperación de cuerpos de agua y suelos.

La biorremediación ha sido utilizada desde el inicio de la industria petrolera en los Estados Unidos. Apareció a partir del análisis de los trabajadores de las refinerías, dándose cuenta de que los desechos que ponían en las partes superiores del suelo, desaparecían a través del transcurso del tiempo en cuestión de meses, previo a la técnica de Landfarming, es decir, por medio del metabolismo natural de la microbiota autóctona del suelo mediante el arado y el riego, sin comprender los procesos que ocurrían en la degradación de lodos. Más adelante, utilizaron los lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, el cual resultó ser un gran avance en la biotecnología ambiental para evitar el deterioro por contaminación en ecosistemas acuáticos (Garzón *et al.* 2017).

Posteriormente descubrieron que, algunos microorganismos utilizaban su metabolismo para obtener energía a partir de los contaminantes como de los hidrocarburos del petróleo, adicionando luego a las enzimas y el uso de plantas (fitorremediación) para incrementar la eficiencia de la biorremediación. Hoy en día la biorremediación es una de las tecnologías que se están investigando y está resultando como una de las más prometedoras y menos costosas. Clasificándose como técnicas *in situ*, aplicadas en el lugar de estudio, y, *ex situ*, fuera del lugar de estudio. Las técnicas *in situ* son las que se están investigando en mayor grado por

países como Colombia, obteniendo resultados de mayor calidad (Garzón *et al.* 2017).

En México, un estudio realizado en la zona de Morelia-Capula, menciona que hay factores que ponen en peligro la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, entre ellos, el mal tratamiento de aguas residuales en la zona debido a que, se descargan las aguas en canales que carecen de impermeabilización, los lixiviados provenientes del antiguo tiradero y una falla geológica. Por lo que, se deben analizar bien, los lugares antes de hacer pozos de extracción, considerando todos los aspectos que los ponen en riesgo de contaminación. De ahí, la importancia sobre profundizar en la investigación acerca de los avances actuales de la biorremediación como una alternativa para potencializar otras tecnologías, procesos o técnicas, que desde nuestros antepasados han trabajado en ello y darle seguimiento al tratamiento de aguas residuales y lixiviados provenientes de tiraderos, sobre todo cercanos a pozos de extracción, para evitar otras posibles contaminaciones a nivel subterráneo y la sobreexplotación de agua subterránea, ya que se señala que debido a los abatimientos al año, en situaciones extremas llegaban a perforarse hasta a 10 metros de profundidad. Y así, llevar a cabo un mejor control sobre el cuidado y preservación del agua subterránea (Pérez, 2018).

Hablando en cuestiones de cambio climático, estudios predictivos realizados desde el 2008, más del 70 % de la superficie nacional presentaría niveles de vulnerabilidad en grados altos y muy altos en cuanto a la sequía meteorológica. Siendo los siguientes estados de México los más vulnerables, casi en un 90% de su territorio: Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Campeche y Chiapas en el 75% y Quintana Roo en gran parte de su superficie (SEMARNAT, 2008).

Por lo que es de suma importancia considerar la vulnerabilidad como un factor de riesgo dentro de los planes de gestión ambiental, ya que con este parámetro se analiza, tanto cualitativamente como cuantitativamente la resistencia de los sistemas expuestos desde el punto social y económico, ayudándonos a tener un panorama más claro de las fortalezas y debilidades que un municipio, estado o país tendría que enfrentar con la finalidad de desarrollar las mejores capacidades de

adaptación al enfrentar cualquier desastre ecológico, ya que a largo plazo pueden generar otros desastres si no se trabaja en solucionar los que se presentan actualmente (SEMARNAT, 2008).

Desde años atrás se han estado realizando investigaciones sobre planeaciones de gestión ambiental que no ha sido posibles de concretar, debido a situaciones sociales (desinterés por parte de la sociedad, instituciones y empresas) y gubernamentales a nivel federal, estatal y municipal (desinterés, burocracia, corrupción y desconocimiento en temas medioambientales).

El punto clave y más importante actualmente para sanar, restaurar y salvaguardar los recursos naturales del planeta tierra es llevando a cabo sistemas de gestión ambiental que vayan encaminados a la innovación de ecotecnologías sustentables a largo plazo, a la par del desarrollo de programas sociales que involucren a toda la sociedad tanto a nivel institucional, comunitario, municipal, estatal y federal.

1.2 Planteamiento del problema

El agua es un recurso natural que ha sido utilizado como una mercancía hasta ahora, sin embargo, es un derecho que todos los seres vivos tienen y debe ser protegido, por lo que la ciudadanía debe involucrarse en los proyectos de planeación, organización y cuidado para que la humanidad pueda seguir subsistiendo, ya que últimamente los cuerpos de agua se están deteriorando por la contaminación proveniente de industrias, zonas rurales y urbanas lo que conlleva a su rápida desertificación.

De acuerdo con de Anda (2017) y Rodríguez (2021), del 2015 al 2021 se reportó solo un pequeño avance del 52.72 % 13 al 67.2 % de operación en las plantas de tratamiento de aguas residuales en México, en comparación con otros países de América latina como Argentina y Chile, donde su operación es por arriba del 80%.

En el estado de Michoacán, los cuerpos de agua están perdiendo su capacidad para la captación en un 80 %, lo que ha derivado en sequías prolongadas por años, tal es el caso del Lago de Cuitzeo, el cual, si llegase a desaparecer el lugar corre el

riesgo de desertificación de los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén, así como la Laguna de Zacapu, manantiales como la Mintzita, entre otros, ya que sus destinos están ligados en contexto ecológico, consecuencia del completo descuido del ecosistema hídrico (áreas naturales protegidas o no protegidas) en Michoacán, desde el nivel municipal, estatal y federal (Molina, 2021).

Por otro lado, la eutrofización es un problema muy común que se presenta en los lagos, se incrementa por la falta de tratamiento de aguas residuales, y debe ser controlado. Tal es el caso de la Ciénega de Tláhuac en México (De la lanza y Hernández, 2019).

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019), si se llega a un punto en el que cesara el agua potable, incrementarían al doble los problemas sociales (pobreza, enfermedades), debido a que es un recurso vital para realizar nuestras actividades diarias (abastecimiento público en general), para el correcto funcionamiento en el uso agrícola (regadío de cultivos), industrial (elaboración de alimentos y bebidas), hidroeléctricas, termoeléctricas, entre muchos otros.

Estas reflexiones inducen la siguiente pregunta de investigación para este trabajo.

1.3 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las tecnologías que se han empleado hasta ahora para el tratamiento de aguas residuales y cuáles serían las más aptas para contribuir en su divulgación en la sociedad y continuar su implementación a nivel industrial y comunitario?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un estudio documental de las tecnologías que emplean biorremediación y sistemas biológicos aplicadas en el tratamiento de aguas residuales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías más usadas actualmente para el tratamiento de aguas residuales.
- Realizar un análisis de las diferencias entre estas.
- Analizar la tecnología más adecuada para continuar su investigación y divulgación a nivel industrial, social y comunitario.

1.5 Supuesto

Las tecnologías que emplean la biorremediación y los sistemas biológicos son eficientes para el tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de los diferentes procesos de recuperación de suelos y agua.

2.1.1 ¿Qué es la biorremediación?

Como se mencionó anteriormente, la biorremediación, en general es la interacción organismo vivo – medio ambiente de origen, ya que se utiliza el propio metabolismo de plantas, microorganismos y organismos que habitan de forma natural en el lugar de estudio. En donde se llevan a cabo una amplia serie de reacciones químicas involucrando enzimas, las cuales pueden degradar, remover o transformar a los contaminantes en compuestos no dañinos y no tóxicos para el medio ambiente y la humanidad.

A través de los años la biorremediación ha resultado útil para restaurar los tres estados de la materia:

Sólido: Suelos y sedimentos contaminados por hidrocarburos principalmente.

Líquido: Aguas residuales: aguas subterráneas y superficiales (industriales, zonas rurales y urbanas).

Gaseoso: Gases de origen industrial y domestico (malos olores de aguas residuales con materia orgánica) (Garzón *et al.* 2017).

2.1.2 La biorremediación se clasifica en 2 tipos de técnicas:

2.1.2.1 Técnicas de biorremediación in situ.

Las técnicas de biorremediación in situ consisten básicamente en la aplicación, utilización y aprovechamiento de los procesos metabólicos microbianos que suceden naturalmente en los organismos presentes, ya sea en suelos o cuerpos de agua dependiendo del lugar de estudio, en donde estos utilizan a los contaminantes como fuente primaria, secundaria o terciaria para alimentarse y así obtener la energía necesaria para poder llevar a cabo sus funciones vitales con el beneficio de transformar a los contaminantes. Donde las principales son las siguientes:

2.1.2.1.1 Atenuación natural (biorremediación intrínseca).

Es la remoción, disminución de masa o toxicidad del contaminante por la propia microbiota de origen, involucrando procesos tanto aerobios como anaerobios, sin la necesidad de alguna operación humana. La cual tiene que ser monitoreada para su constante funcionamiento (Gómez, 2021).

2.1.2.1.2 Bioestimulación.

Consiste en mejorar las condiciones del medio ambiente o área donde se encuentren los microorganismos autóctonos ya sea por medio de la adición de

nutrientes como el carbono (C), fósforo (P) y nitrógeno (N), que producen energía y potencian mejor la estimulación de enzimas, de las cuales se espera obtener un mayor % de eficiencia para remover y degradar los contaminantes, así como la implementación de otros procesos involucrando la aireación, y la regulación de parámetros fisicoquímicos como el pH, humedad y la temperatura con el objetivo de activar y mejorar el crecimiento de los organismos nativos (tanto flora como fauna) del lugar de estudio (Loya, 2013).

2.1.2.1.3 Bioaumentación.

Es la adición de un conjunto de microorganismos seleccionados específicamente, ya sean modificados genéticamente, nativos o externos, los cuales interactúan entre sí de forma simbiótica o por mutualismo, con la finalidad de aumentar el % de degradación de los contaminantes presentes en el área de estudio (suelo o cuerpo de agua) para mejorar la biorremediación (Loya, 2013).

La atenuación natural puede ser potenciada por la bioaumentación, biestimulación y el bioventeo (Jiménez, 2018).

2.1.2.1.4 Fitorremediación.

La fitorremediación involucra varios procesos a través de las plantas, como son la fitoestimulación, fitodegradación y fitovolatilización participando en la absorción, remoción, retención, transformación o en la eliminación del contaminante, contribuyendo a la biorecuperación de aguas, suelos y sedimentos contaminados. Los resultados, dependerán de las características del lugar de estudio, tipo de estrategia a implementar y si se tiene un control adecuado de parámetros como el pH y la temperatura (Zulma y Huayta, 2018).

El uso de la fitorremediación es una buena alternativa para dar solución a problemas de contaminación in situ, ya que ha sido ampliamente utilizada para remover varios contaminantes entre ellos los metales pesados y la materia orgánica en agua y suelos.

Para llevar a cabo con eficacia y eficiencia cualquier técnica de fitorremediación, primero se deben de adecuar y optimizar a las mejores condiciones, las plantas de origen, el lugar contaminado donde se encuentren ya sea agua o suelo, por medio de la bioestimulación o bioaumentación. Por ejemplo, el uso de algas unicelulares (*Clorella vulgaris*), macrófitas (*Eichornia crassipes*) o rizobacterias, ya que en estas últimas se ha demostrado que son promotoras del crecimiento vegetal (Gómez, 2021).

2.1.2.2 Técnicas de biorremediación ex situ.

Las técnicas ex situ implican la recolección de la muestra en el sitio contaminado (excavación o recolección de suelo, sedimento o agua contaminada) y su consecutivo transporte para realizar su tratamiento en otro lugar. Para estas técnicas se debe de tomar en cuenta la geología, la ubicación geográfica, el tipo de contaminante a tratar, el grado y la profundidad de la contaminación (Gómez, 2021).

2.1.2.2.1 Biorreactor.

Los biorreactores son sistemas, en donde las materias primas son transformadas en productos característicos mediante reacciones biológicas. En donde se deben de controlar parámetros como la concentración de inóculo y sustrato, temperatura, agitación, aireación y pH. Dentro de sus desventajas es que son muy costosos para su mantenimiento. Un ejemplo de este es el reactor biológico de membrana (Gómez, 2021).

2.1.2.2.2 Compostaje.

El compostaje es la descomposición de materia orgánica (estiércol, restos de hojas o cortezas de árboles, residuos orgánicos de vegetales y frutas) por medio de la microbiota del suelo, transformándola en compost (nutrientes benéficos), el cual es utilizado como abono natural para el crecimiento de plantas y mejorar la fertilidad del suelo (Céspedes y Jiménez, 2018).

2.1.2.2.3 Lombricultura.

Es una biotecnología en donde se utilizan lombrices de tierra generalmente *Eisenia foetida* o *Lumbricus terrestris* las cuales actúan reciclando la materia orgánica produciendo abono natural orgánico. En un estudio realizado en la Compañía Minera Chungar, aplicaron la lombricultura para tratar los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, en donde en un tiempo de 8 semanas obtuvieron resultados favorables en la disminución de nitritos, nitrógeno amoniacal y sulfatos los cuales son maléficos para la tierra y las cadenas de varios seres vivos (Agüero, 2019).

2.1.2.2.4 Biopilas.

Consiste en la ampliación o traslado del suelo contaminado (tierra superficial) a otro sitio para activar el metabolismo de los microorganismos mediante la adición de nutrientes, aireación y humedad. Regularmente las pilas se cubren con plástico para controlar lixiviados y volatilización de contaminantes (Gómez, 2021).

2.2 Desarrollo de los procesos de biorestauración.

2.2.1 ¿Cuál es el objetivo del tratamiento de las aguas residuales?

Lo que se ha empleado generalmente para ayudar a la sustentabilidad del recurso natural del agua es la aplicación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

El objetivo fundamental del tratamiento de las aguas residuales es la remoción de la materia contaminante tanto orgánica como inorgánica, la cual puede presentarse en forma de partículas diluidas o en suspensión, con la finalidad de aumentar los niveles de calidad del agua exigidas por las normatividades medioambientales de descarga o por el modelo de reutilización a la que será destinada. El propósito de purificar o depurar algún tipo de agua residual se desarrolla por medio de un conjunto de procesos físicos, biológicos y químicos unitariamente, los cuales son elegidas en función de las particularidades del agua residual a tratar y la calidad que se desea de esta. De acuerdo a la ley de la conservación de la materia, con la aplicación de estos tratamientos se pretende transformar a los residuos que comúnmente son lodos o emisión de gases a una forma menos dañina, no tóxica o benéfica para el medio ambiente en donde la cantidad y calidad de estos dependerá directamente de la configuración del sistema de tratamiento y las características del agua a tratar (Noyola *et al.* 2013).

- 1) Procesos físicos: Son los métodos en donde se aplica una separación física, usualmente de sólidos grandes, estas dependen de las características físicas del contaminante (flotabilidad, viscosidad, tamaño-partícula) como la filtración de sólidos.
- 2) Procesos biológicos: son los métodos que utilizan los organismos y microorganismos vivos naturales de origen del lugar (planta, bacterias, hongos), o bien mediante la adición de estos, por medio sus enzimas metabólicas y múltiples interacciones entre ellos (simbiosis, mutualismo).
- 3) Procesos químicos: son los métodos que dependen de las características químicas del reactivo a incorporar en el agua o específicas del contaminante,

para la eliminación de elementos como el oxígeno y el hierro (neutralización) (IAGUA, 2020).

2.2.2 Procesos de biorestauración de aguas residuales.

Los procesos de biorestauración para tratar aguas residuales se basan en los siguientes niveles de tratamientos a seguir:

- 1) Pretratamiento: consiste en remover y separar toda aquella materia sólida de gran tamaño, como son ramas, basuras de plástico, grasas, aceites y rocas, mediante procesos físicos y mecánicos. Por ejemplo, la trampa de grasas (separar aceites y grasas), cribado y desarenado.
- 2) Tratamiento primario: consiste en remover sólidos finos, como arcilla, grava y arena, por medio de procesos físicos como la sedimentación, decantación y filtración.
- 3) Tratamiento secundario: consiste en la aplicación de procesos biológicos los cuales utilizan el metabolismo de bacterias, hongos y plantas (adicionados o por la microbiota autóctona) para remover los contaminantes. Estos pueden ser anaerobios como el digestor de flujo ascendente (RAFA o UASB) o aerobios como los lodos activados y los humedales.
- 4) Manejo de biosólidos: los lodos restantes generados por las aguas residuales, son tratados generalmente por digestión aeróbica (digestor aeróbico), incineración o deshidratación, para su posterior disposición, confinamiento o reusó.
- 5) Tratamiento terciario: consiste en la eliminación o inactivación de microorganismos patógenos (virus, bacterias) que pudieran estar presentes en el agua mediante procesos físicos (sedimentación, filtración con carbón activado) químicos (desinfección) o biológicos (humedales) (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión: INCYTU, 2019).

2.3 Tecnologías empleadas en los procesos de biorestauración.

En un estudio realizado por la UNAM en el año 2013, investigaron los tipos de tecnologías más usadas para el tratamiento de aguas residuales en América Latina incluyendo a los siguientes países: Brasil, Chile, Colombia, Guatemala, México y República Dominicana, obteniendo como resultado que, en primer lugar, se usan los lodos activados y en segundo, las lagunas de estabilización (Noyola *et al.* 2013).

2.3.1 Lodos activados.

Es la tecnología más aplicada para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, la cual, consiste en la aplicación de un conjunto de reactores, agitación y aireación constante en una mezcla de aguas residuales y lodos, compuestos por una gran variedad de microorganismos los cuales pueden consumir, remover o transformar a los contaminantes presentes (Guzmán *et al.* 2020).

2.3.2 Lagunas de estabilización también llamadas Lagunas de oxidación.

Son sistemas que se pueden hacer mediante la excavación y compactación del suelo, o bien, ser construidos mediante estanques de estabilización recubiertos con concreto o cualquier otro material impermeable. Estos se aplican generalmente en serie, es decir, el agua residual es tratada de una laguna a otra, frecuentemente de 3. La profundidad de estas puede ser de 1 a 2 m (CONAGUA, 2007).

Se clasifican de la siguiente manera:

- Lagunas aerobias: donde la materia orgánica soluble y la transformación de nutrientes es realizada en presencia de oxígeno disuelto, la aireación se puede proporcionar de manera artificial o natural, regularmente miden de 1 a 1.3 metros de profundidad para que la luz solar llegue al fondo de éstas y,

favorezca el crecimiento de algas y microalgas, las cuales proporcionan el oxígeno necesario para las bacterias aerobias.

- Lagunas anaerobias: donde la remoción y depuración de materia orgánica se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos, pueden ser removidos hasta un 85 % en tratamientos secundarios, si se lleva a cabo un correcto pretratamiento.
- Lagunas facultativas: la remoción de materia orgánica puede realizarse en presencia o ausencia de oxígeno. Si se requiere, se puede anexar oxigenación artificial, en algunas partes de esta (CONAGUA, 2007).

2.3.3 Lagunas microalgales de alta tasa.

Las lagunas microalgales de alta tasa también llamadas por sus siglas en inglés HRAP (High Rate Algal Ponds), son sistemas que se caracterizan por remover más rápido la materia orgánica y otros nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, en comparación con las lagunas tradicionales, esto debido a la interacción microalga-bacteria, ya que las microalgas promueven y generan el crecimiento bacteriano, ya que por medio de la fotosíntesis generan el oxígeno requerido por las bacterias aeróbicas, las cuales se alimentan de la materia orgánica y producen dióxido de carbono ayudando al crecimiento microalgal. Al mismo tiempo, las microalgas utilizan la luz solar como fuente de energía convirtiéndola en biomasa, la cual se puede emplear para la producción de biocombustible, fertilizantes, alimento protéico, cosméticos, fármacos, nutraceúticos entre otros (UNAM, 2019).

2.4 Características físicas y geográficas necesarias para la aplicación de la biorestauración.

2.4.1 Características físicas.

2.4.1.1 Factores físicos del lugar a estudiar.

Conocer los factores físicos del lugar de estudio son importantes, ya que influyen en el grado de su contaminación, entre ellos se encuentran los siguientes:

- 1) pH: el pH está relacionado con el grado en el que los iones son adsorbidos por las partículas del suelo, lo que afecta la disponibilidad, solubilidad, formas iónicas y movimiento de los contaminantes y diferentes componentes del suelo. La solubilidad de varios contaminantes inorgánicos depende del pH y comúnmente, cuando hay valores muy altos de pH se disminuye su movilidad (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: INECC, 2007). Generalmente los microorganismos crecen en un intervalo de pH de 6-8 como las bacterias heterótrofas, y para hongos crecen entre 4- 5 de pH (Suarez, 2013).
- 2) Temperatura: es un factor ambiental importante ya que de esta dependen las funciones, procesos metabólicos de los microorganismos para la transformación, remoción o degradación de los contaminantes. Regularmente el crecimiento bacteriano se da en el intervalo de 20 y 30 °C tanto en el agua como en el suelo.
- 3) Humedad: se debe de mantener un buen equilibrio de la humedad, dependiendo de la biorremediación que se elija, ya que algunos microorganismos del suelo toleran concentraciones pequeñas de humedad para realizar sus funciones vitales y tener un óptimo crecimiento. Altos niveles de humedad reducen las concentraciones de oxígeno necesario para la vida de las bacterias, por lo que se inhibe su crecimiento. También puede ocasionar inconvenientes durante el proceso de excavación o transporte y aumentos en los costos de operación.

- 4) Nutrientes: todos los microorganismos necesitan nutrientes para crecer y reproducirse, como son los siguientes elementos: carbono, fósforo y nitrógeno, pero en concentraciones asimilables. Un exceso en las concentraciones de nutrientes pueden generar problemas de eutrofización en los cuerpos de agua, es decir concentraciones muy altas de fósforo y nitrógeno. En caso de remediar suelos con hidrocarburos, aumentaría su velocidad de degradación, pero a una determinada concentración, dependiendo de la tecnología a implementar.
- 5) Oxígeno disuelto: el oxígeno es fundamental para que se lleve a cabo el metabolismo de los microorganismos, ya que en la mayoría de estos es utilizado como el aceptor final de los electrones al igual que está involucrado en algunas reacciones de oxido-reducción. En general los microorganismos oxidan compuestos inorgánicos y orgánicos para obtener energía, realizar sus funciones vitales y crecer (Suarez, 2013).

2.4.1.2 Factores fisicoquímicos del contaminante.

La eficiencia en la aplicación de la biorremediación, depende de varios factores que se involucran de forma compleja, ya que se tiene que analizar y conocer las propiedades y características particulares y específicas del contaminante como son las siguientes:

- 1) Estructura del contaminante: la estructura química del contaminante (presencia o ausencia de grupos funcionales) influye directamente en su mecanismo de transformación, remoción y biodegradación al momento de reaccionar con otros organismos o compuestos. Independientemente la naturaleza del contaminante, su estructura química define su propia solubilidad, volatilidad, capacidad de reacción con otras sustancias y polaridad. Algunos compuestos se resisten y difícilmente reaccionan, mientras que otros reaccionan fácilmente para ser transformados bioquímica o fisicoquímicamente.

2) **Concentración:** saber la el grado de contaminación o la concentración del contaminante nos ayuda elegir si el lugar de estudio puede bioremediarse mediante la aplicación de sistemas biológicos o si se requiere de la implementación de pretratamientos y post-tratamientos (fisicoquímicos o uso de biorreactores). Ya que altas concentraciones de contaminantes pueden ser intolerantes de manejar para la microbiota autóctona disminuyendo la eficiencia del sistema. Y podría resultar en compuestos más tóxicos o en la ineficiencia de remoción.

3) **Toxicidad:** el nivel de toxicidad del contaminante es muy importante en la selección del sistema, ya que regularmente son resistentes a la degradación (actúan retardándola) o bien, pueden reaccionar produciendo compuestos más tóxicos, eliminando o inhibiendo la biota autóctona benéfica, útil para la remoción.

4) **Solubilidad:** se refiere a la cantidad o medida en la que un compuesto puede disolverse en el agua, se define como la disponibilidad potencial de un compuesto en fase líquida. La solubilidad se reduce al incrementar el tamaño de las moléculas, a mayor polaridad mayor solubilidad y a menor polaridad menor solubilidad. Por lo tanto, la biotransformación o biodegradación de un compuesto depende de la solubilidad.

5) **Biodegradabilidad:** es la vulnerabilidad de un compuesto para ser biotransformado por medio de mecanismos biológicos. Generalmente, los compuestos orgánicos no tóxicos y metabolizables se oxidan rápidamente por la biota autóctona del suelo (INECC, 2007).

2.4.1.3 Factores biológicos.

Estos factores involucran a los microorganismos biológicos, los cuales son los encargados de realizar los procesos metabólicos de la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por la acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto específico es regularmente un proceso que se lleva a cabo por medio de varios pasos mediante una amplia gama de microorganismo y enzimas que poco a poco pueden dar como resultado varios efectos positivos hacia el medio

ambiente. Las enzimas se caracterizan principalmente por ser biocatalizadores realmente específicos tanto para los sustratos, sitios de acción o compuestos que atacan, así como para las reacciones que catalizan. Se requiere más de una enzima normalmente para lograr la ruptura de una sustancia orgánica. Generalmente, los organismos que poseen las enzimas para biodegradar son encontrados por su naturaleza en los suelos (Suarez, 2013).

2.4.2 Características geográficas.

Las características geográficas nos darán la pauta para saber más sobre el diseño, las ventajas y desventajas de los alrededores del lugar, entre ellas son las siguientes:

- 1) Topografía: se define como la ciencia que estudia la tierra. Nos sirve para realizar los métodos y procedimientos de una mediación sobre el espacio seleccionado de la superficie terrestre de estudio, previo a una representación geográfica mediante un plano a una determinada escala. Permittiéndonos determinar características físicas, como las nivelaciones geométricas (curvas de nivel, elevaciones) y levantamientos (Alcaldía de Santiago de Cali, 2018).
- 2) Cartografía: es la ciencia que estudia el uso y diseño de los mapas geográficos, de los cuales, podemos obtener información, sobre el clima, mediante los mapas climáticos, la precipitación anual, temperatura máxima y mínima, mapas geológicos. Estos valores pueden ser obtenidos a partir de los mapas de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Hernández *et al.* 2019).

Actualmente se utiliza la cartografía digital, por medio de esta, podemos consultar información geográfica de manera rápida sobre el lugar de estudio. Un ejemplo de ello es la página del MAPAMA (Ministerio de agricultura y pesca, Alimentación y Medio Ambiente) en donde podemos encontrar datos característicos sobre la biodiversidad, agua, calidad y evaluación ambiental, ganadería, agricultura, costas y medio marino, desarrollo rural y ubicación geográfica de estaciones meteorológicas de la AEMet (Agencia Estatal de Meteorología) en el apartado de otros. Esto con el objetivo de mejorar el estudio sobre el impacto ambiental (Geo innova, 2022).

- 3) Tamaño: el tamaño nos permitirá conocer el área en la que puede ser aplicada la tecnología de biorremediación, analizando el ecosistema social que esté cercano al área de estudio.

- 4) Clima: conocer el clima en general durante las diferentes estaciones del año, ya sea, templado, seco o frío, nos permitirá saber, cómo controlar los parámetros básicos como la temperatura (PP = precipitación total anual T.MIN = temperatura mínima; T.MAX = temperatura máxima) y la humedad, para que la biorremediación siga con la misma eficiencia y su posterior mantenimiento (Hernández *et al.* 2019).
- 5) La flora y fauna: tener el conocimiento de estos datos sobre cualquier lugar de estudio, nos permitirá ver un panorama más amplio sobre cómo aplicar la biorremediación, ya que nos permitirá conocer los animales, plantas u hongos que ayuden a la eficiencia o deficiencia, ya que algunas plantas y desechos de animales ayudan a la fertilidad del suelo y saneamiento del agua, hasta cierto punto, por lo que se debe controlar su crecimiento y propagación por cierto tiempo y evitar generar malezas y problemas de eutrofización. En el caso de las malezas se deben cortar para producir biodiesel por ejemplo.
- 6) Hidrología: es la ciencia encarada de estudiar el agua sobre la tierra, la ocurrencia (nieve, granizo, lluvia), su distribución (lagos, ríos), circulación a través de los ciclos biológicos, propiedades físicas y químicas y su interrelación natural con los ecosistemas (Hidro SM, 2018). Por ejemplo, la hidrología de cualquier cuerpo de agua nos permite explicar la variabilidad de su temperatura, calidad de agua, profundidad y la provisión de nutrientes o contaminantes que reciben directamente de otro efluente, río, manantial o lago ya sea de origen municipal, industrial y agrícola, como desechos sólidos de alguna cuenca, la cual puede transportar la carga de 8 municipalidades que por consiguiente aumentan la contaminación del agua y complican su restauración (Lucy *et al.* 2016).
- 7) Geología: la geología es la ciencia que estudia el origen, estructura, composición, historia y la evolución de la tierra, por ejemplo, las rocas y minerales, deslizamientos del suelo, erupciones volcánicas y erosión. Por ejemplo, algunas rocas volcánicas como la piedra pómez, ayudan a la purificación y filtración del agua (Servicio Geológico Mexicano: SGM, 2017).

8) Perturbación o usos del suelo: el análisis de los múltiples usos del suelo, nos permitirá visualizar un panorama más amplio sobre las afectaciones de las actividades humanas, ya sea por parte del área agrícola (los cambios de uso de suelos), industrial y zonas urbanas (actividades locales y comerciales) y rurales (lugares de vivienda y vacaciones). Y así seleccionar la tecnología (biorremediación) más apta y adecuada para tal área, de manera que se involucre más la sociedad y ser más estrictos en las normatividades que las industrias o empresas deben de seguir, ya que también nos daríamos una noción en general, sobre el tipo de agua, es decir, la clase de contaminantes que podrían estar presentes (Hernández, 2020).

CAPÍTULO 3. MÉTODOS

3.1 Diseños metodológicos empleados en biorremediación.

Los métodos de biorremediación que habitualmente se han llevado a cabo a lo largo del tiempo y hasta ahora, se clasifican según el sitio de aplicación, ya sea ex situ o in situ. Ex situ, se refiere a que el contaminante se lleva a un lugar diferente en el que se encuentra para su posterior estudio y tratamiento (reactores, landfarming). In situ se refiere al conjunto de técnicas que se emplean donde se localiza el sitio del problema (biestimulación, bioaumentación).

El recurso natural del agua no es encontrado en su forma pura, ya que, al entrar en contacto con el suelo, aire o actividades humanas (contaminación en general), adopta impurezas dañinas generando un sin número de enfermedades, ya sea, por la presencia de contaminantes químicos, como los metales pesados (plomo y el mercurio), materia orgánica (grasas, carbohidratos, proteínas), compuestos fosforados y nitrogenados, aniones (sulfato, fluoruro) y biológicos, como virus, bacterias, helmintos y hongos. Por lo que se deben de analizar varios de sus parámetros antes de ser reutilizada para el riego de cultivos (Raffo y Ruiz, 2014).

Los principales parámetros que se evalúan en el tratamiento de aguas residuales son los siguientes:

- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): Es una medida en mg/L, sobre la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para biodescomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es una medida en mg/L, sobre la cantidad de oxígeno necesario o consumido por los microorganismos en el proceso de oxidación de la materia orgánica total, biodegradable o no, existente en aguas residuales.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): Todas aquellas concentraciones de partículas retenidas por algún medio filtrante, lo cual, va a depender del

tamaño del sólido y el tipo de proceso por el que este se encuentre (Bravo, 2019).

Actualmente, las lagunas de oxidación y los lodos activados no son eficientes para el tratamiento de aguas residuales sobre todo en México, al contrario, por parte de las lagunas de estabilización, están generando enfermedades debido a la proliferación de huevecillos de helmintos y presencia de metales pesados como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd) así como la generación de gases tóxicos (sulfuro de hidrógeno H₂S y el amoníaco NH₃) por un mal manejo y falta de mantenimiento (World Association of Theoretical and Computational Chemists: WATOC, 2020).

Por otro lado, los lodos activados se han utilizado ampliamente a nivel mundial, pero presentan deficiencias en la remoción de varios contaminantes de origen antropogénico (Ortega, 2019).

3.1.1 Sistema Tohá

El sistema Tohá es una tecnología de tratamiento de aguas residuales, que fue creada y desarrollada por el Dr. José Tohá Castellá en el laboratorio de Biofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y patentada por la Fundación para La Transferencia Tecnológica, UNTEC. En la Universidad Técnica del Norte en el Instituto de posgrado, Ibarra - Ecuador Año 2021, el Ing. Milton Polivio Ramírez Landeta realizó una Maestría en gestión de agroempresas y agronegocios con el nombre:

Viabilidad y factibilidad técnica y económica de una planta procesadora de humus elaborado a partir de efluentes de la industria láctea.

Clasificación metodológica: In situ - Sistema Tohá

Ubicación geográfica: INPROLAC es una industria nacional ubicada en la provincia de Pichincha cantón Cayambe. Ecuador

Objetivo: El objetivo del proyecto fue evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta que genera humus a partir del tratamiento con biofiltro de los efluentes generados por la industria láctea INPROLAC S.A.

Caudal: El caudal promedio diario fue medido mediante la multiplicación de los aspersores que compone el sistema, evaluando también parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, mediante muestreos de las tres piscinas del sistema de tratamiento. Se obtuvo un promedio semanal de aproximadamente 1,064,396.00 litros de agua residual por un consumo de leche aproximado de 264,597.00 litros (4 L de agua residual por 1 L de leche procesado). El consumo de leche es para seis procesos agroindustriales, sin embargo, los que más aguas residuales generan son la de quesos y yogurt.

Humus producido: La producción anual de humus es de 175 toneladas métricas producto del tratamiento de biofiltros a base de los efluentes.

Resultados: El sistema de tratamiento tiene una eficiencia de aproximadamente un 95%, con base a la reducción de los parámetros de DBO 95.7 %, DQO 95,7%, SST 95%; cumpliendo con la norma vigente ambiental del Ecuador y permitiendo reutilizar el agua para el uso agrícola de la zona.

Inversión: La inversión total para la implementación del sistema de tratamiento fue de \$119,000.00, el cual incluye todos los gastos de instalaciones, infraestructura y análisis correspondientes. De esta forma se concluye que la implementación del sistema de tratamiento Tohá es viable en aspectos técnicos y económicos.

En la figura 3.1 se puede observar el lombrifiltro implementado.



Figura 3.1. Aspersores de aguas residuales y aireadores del biofiltro (Ramírez, 2021).

3.1.2 Humedales

En la sabana de Bogotá, los humedales fueron reconocidos por primera vez por la Convención de Ramsar, como ecosistemas acuáticos caracterizados por la presencia de extensiones de pantanos y superficies arenosas con crecimiento de plantas herbáceas cubiertas por agua, estacionales o permanentes de origen natural, en la ciudad de Irán, situada a orillas del mar Caspio, quien firmó un convenio en 1971 para la preservación de flora y fauna especialmente para las aves acuáticas (Santiago, 2012).

En la Universidad El Bosque en la Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Ambiental. Danna Fernanda Fernández Calderón. Año 2019. Realizó una tesis titulada:

Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial y un tratamiento biológico mixto, empleando *Pleurotus ostreatus* y *Trametes versicolor* para mejorar la calidad de las aguas hidrocarburadas de la Estación de Servicio Biomax Colina en Bogotá.

Clasificación metodológica: In situ - Humedales construidos

Ubicación geográfica: Estación de servicio (EDS) Biomax Colina, ubicada en el barrio Colina Campestre, el cual limita al occidente con el barrio Gratamira, al norte con Mazuren, al oriente con Spring y al sur con Ciudad Jardín Norte y Las Villas. Sus principales vías de acceso son la Avenida Boyacá, Avenida Suba, las Calles 134, 138 y la Avenida Las Villas.

Objetivo: La evaluación de la eficiencia de dos tipos de tecnologías, una de ellas, un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical instalado en la estación de servicio (EDS) Biomax Colina en Bogotá y, por otra parte, un tratamiento biológico mixto empleando *Pleurotus ostreatus* y *Trametes versicolor* para tratar el efluente de este establecimiento.

Técnica: El método hipotético-deductivo es el más apto para desarrollar la investigación, en la primera parte se planteó la hipótesis en base a la revisión bibliográfica. Posteriormente, se realizaron deducciones que se sometieron a verificación empírica, por medio de la experimentación en el laboratorio para comprobar la veracidad o no de la hipótesis de partida.

Resultados: En cuanto al humedal, se lograron eficiencias para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 99%, en la demanda química de oxígeno (DQO) 91,6%, en los sólidos suspendidos totales (SST) un 86,1% y un cambio de pH de 6,21 a 7,06, lo que demuestra, en parte, la capacidad de las plantas para disminuir las cargas orgánicas de la muestra. En el tratamiento de hongos se realizaron dos ensayos, uno estéril y otro sin esterilizar con 3 repeticiones cada uno. En este caso, sólo se obtuvo remoción de 83,33% de DBO y 6,77% de DQO para una réplica. Lo que pudo indicar que la concentración del contaminante era demasiado elevada o coexistían otros materiales tóxicos que no permitieron la degradación por parte de estos microorganismos. Por último, se compararon los datos obtenidos con la Resolución 631 de 2015 para verificar si estos sistemas pueden ser empleados como tratamiento de las aguas residuales de la EDS y poder verterlas al alcantarillado, evidenciando que el humedal artificial es el método que cumple con los límites planteados por la normatividad.

Inversión: En cuanto al mantenimiento del humedal son costos fijos que se mantienen para su correcto funcionamiento, teniendo en cuenta el incremento del IPC por año. Se calcula una utilidad promedio de \$2.757.416 para cuatro años.

En la figura 3.2 se puede observar el humedal implementado en la Estación de Servicio Biomax Colina.



Figura 3.2. Humedal artificial de la Estación de Servicio Biomax Colina (Fernández, 2019).

3.2 Características de los procesos de biorremediación.

3.2.1 Sistema Tohá.

Consiste en un biofiltro en el que se involucran 4 lechos filtrantes de diferentes materiales, en el que por medio de estos atraviesa el agua servida o residual, donde finalmente los microorganismos autóctonos, lombrices y microbios asimilan, absorben y remueven la materia orgánica eliminando los residuos.

Características principales

1) Uso de lombrices californianas, en especial de la especie *Esenia foedita* y *Eissenia crappises*: Se debe tener un control estricto, sobre la población de lombrices en número habitando por unidad de área con el fin de saber la capacidad que estas tienen para digerir la materia orgánica, conocer la tasa máxima de riego que puede soportar el lecho y evitar la muerte de las lombrices por falta o disminución de oxígeno, que corresponde a 1m³/m²/día. (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003, como se citó en Salazar, 2005).

2) Ambiente adecuado: Para lograr un crecimiento abundante y eficiente de las lombrices, se deben de mantener los parámetros que influyen en su reproducción dentro del rango de sus límites, como son los siguientes:

Temperatura: 15 -24 °C

Humedad: 70-80 %

pH: 6.0 - 8.0

3) Tubos de ventilación de PVC: Los cuales ayudan a mejorar la ventilación en el sistema, se colocan de manera vertical sobresaliendo 20 [cm] en la parte superior.

4) Uso de diferentes medios filtrantes: Para remover y retener los contaminantes y sólidos presentes en el agua. Lo que constituyen las capas de tierra con lombrices, arena, gravilla y grava, funcionando como biofiltros.

5) Aspersores: Donde el afluente es repartido homogéneamente por aspersión en toda la superficie del biofiltro (Rojas, 2020).

En la Figura 1 y 2 se puede observar como funciona el sistema Tohá.

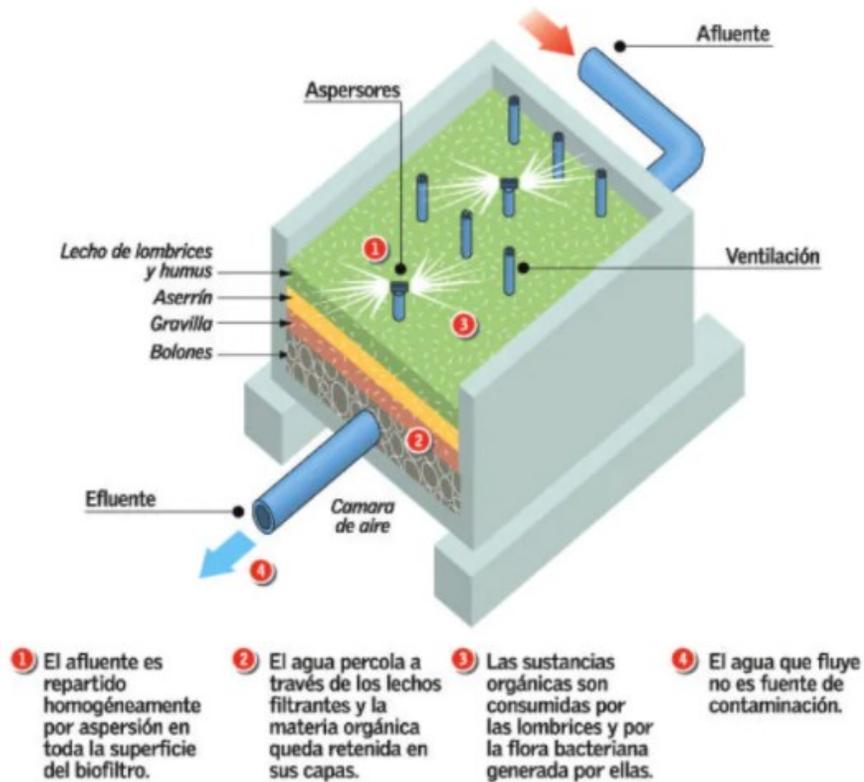


Figura 3.3. Funcionamiento del sistema Tohá (F.T.T; Fundación para la transferencia tecnológica de la Universidad de Chile, como se citó en Guzmán, 2004).

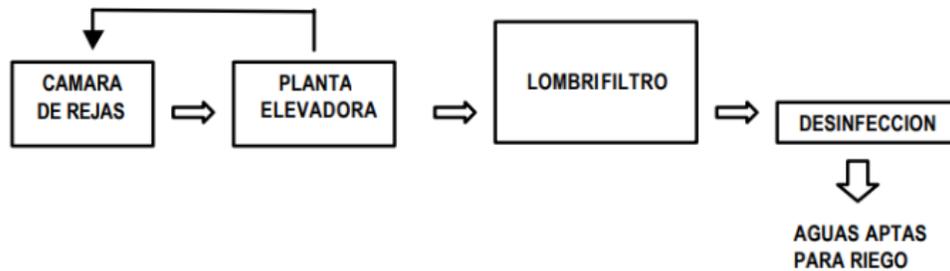


Figura 3.4. Procesos de tratamiento del sistema Tohá (Rojas, 2020).

Pretratamiento: se utiliza una cámara de rejillas para tamizar y evitar la entrada de materiales sólidos de gran tamaño.

Tratamiento primario: se utiliza una planta elevadora; esta eleva el caudal y luego el líquido, se divide en cámara de rejillas y lombrifiltro.

Tratamiento secundario: lombrifiltro.

Tratamiento terciario: desinfección como la cloración o luz ultravioleta (Rojas, 2020).

3.2.2 Humedales.

Son ecosistemas que están formados por un sistema acuático y terrestre en transición, los cuales pueden ser construidos artificialmente, o naturales y son utilizados para tratar el agua que fluye a los mares, ríos y lagos.

Según su clasificación son sistemas de macrófitas, los cuales pueden ser enraizados, donde la planta se encuentra fija al sustrato como los juncos y flotantes, donde no lo está, como los jacintos (Camacho *et al.* 2010).

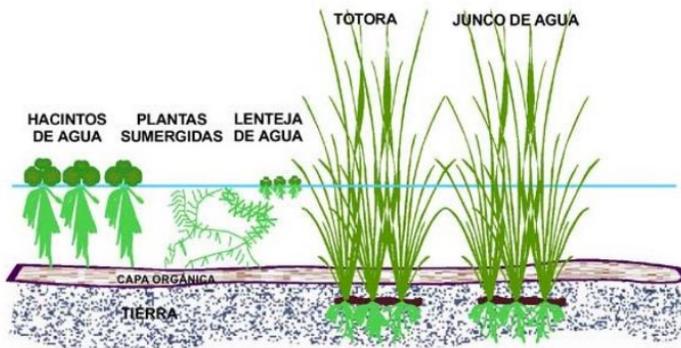


Figura 3.5. Plantas acuáticas comunes (Tomado de Llagas y Guadalupe, 2006, como se citó en Chávez y Mujica, 2015).

Características

Influente: son aguas residuales que entran al humedal, las cuales pueden ser de origen industrial, doméstico, o una mezcla de las diferentes actividades antrópicas.

Sustrato: toda aquella materia o medio filtrante permeable colocado en el lecho del humedal, los cuales funcionan como soporte para el crecimiento de las plantas para el desarrollo y progreso del sistema. Como puede ser suelo arena, grava y composta.

Vegetación:

Son las diferentes especies de plantas o vegetales que realizan algunas de las funciones sobre la depuración del agua a tratar por medio de la fijación, fitoextracción, fitoestabilización, adsorción entre otros procesos.

Microorganismos: Constituyen consorcios formados por una gran variedad de organismos vivos que intervienen en las reacciones químicas y biológicas, degradando así la materia orgánica, participando en la desinfección, eliminación de elementos traza y nutrientes, en los procesos de tratamiento (Banco interamericano de desarrollo: BID, 2020).

Humedales de flujo sub-superficial vertical

Se caracteriza principalmente por:

- 1) Flujo vertical e intermitente, comúnmente se requieren de bombas para su flujo.
- 2) El proceso de nitrificación es favorable: la conversión de amonio (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-).
- 3) Alta transferencia de oxígeno (Hoffmann *et al.* 2011).

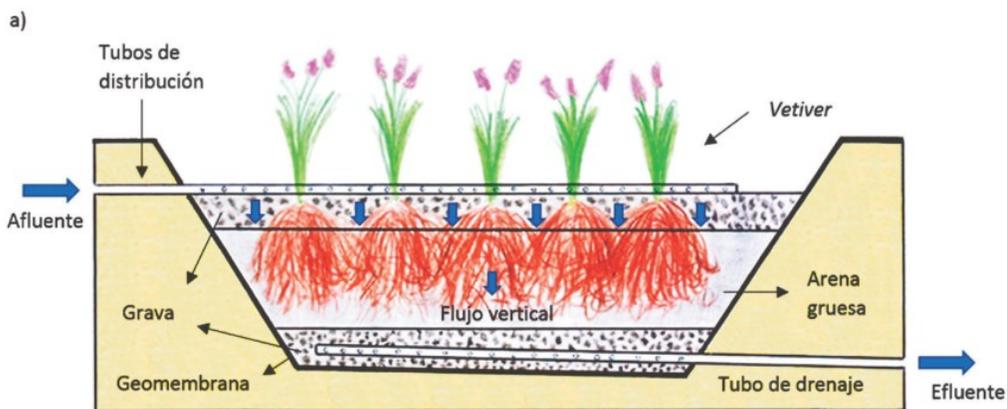


Figura 3.6. a) Humedal de flujo sub-superficial vertical (Pérez *et al.* 2022).

Humedales de flujo sub-superficial horizontal

Se caracteriza principalmente por:

- 1) Flujo horizontal: no requiere de bombas para su alimentación.
- 2) El proceso de nitrificación es limitado. La conversión de amonio (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-).
- 3) Baja transferencia de oxígeno (Hoffmann *et al.* 2011).

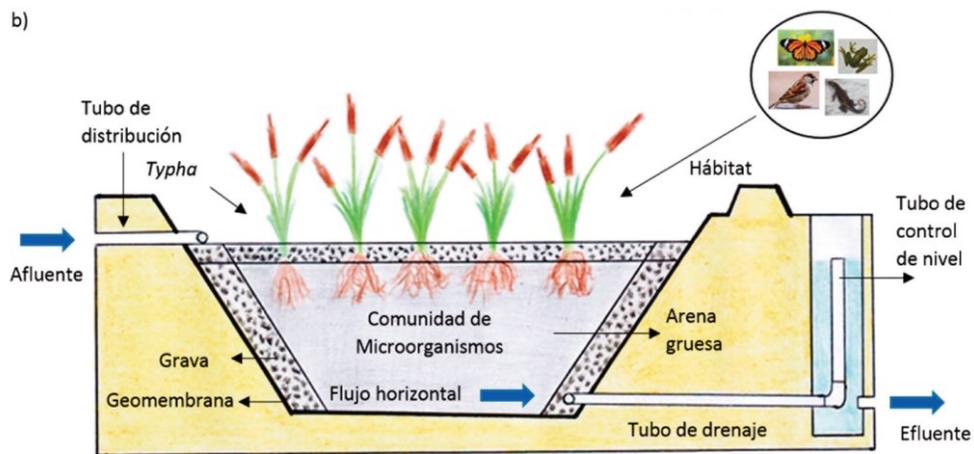


Figura 3.7. b) Humedal de flujo sub-superficial horizontal (Pérez *et al.* 2022).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Diferencias encontradas entre métodos.

4.1.1 Sistema Tohá

Ventajas

- 1) Eficiencia: 90 %
- 2) Sostenibilidad: Alta sostenibilidad debido a la generación de humus que puede ser usado en la agricultura y el agua puede ser utilizada para riego. Para su mantenimiento se pueden utilizar desechos orgánicos para aumentar la producción de lombrices como cáscaras de cacahuate.
- 3) Fácil de operar
- 4) No genera lodos biológicos, ruido ni malos olores.
- 5) Bajo costo: energético y debido a la producción de subproductos.
- 6) No afecta la biodiversidad (aguas superficiales y subterráneas).
- 7) Cumple LMP normativos (DBO, DQO, SST).

Desventajas

- 1) Protección de las condiciones climáticas.
- 2) Extensa superficie de terreno para su instalación.
- 3) Puede presentar problemas para la eliminación de nitrógeno.

(Fernández, 2021)

4.1.2 Humedales

Ventajas

- 1) Eficiencia: 90 % DBO
- 2) Sostenibilidad: Bajo coste de explotación y mantenimiento

- 3) (24.000-30.000 euros/año).
- 4) Bajo costo energético.
- 5) No generan impactos negativos de ruido y olor.
- 6) Fácil operación.
- 7) Baja producción de residuos sólidos/fangos.
- 8) Creación y restauración de zonas húmedas
- 9) Beneficios: Actividades como la agricultura mejoran la calidad del agua residual.

Desventajas

- 1) Contaminación proveniente de actividades turísticas y domésticas.
- 2) Falta de desazolve, rectificación, reapertura y reforzamiento de bordes en canales y zanjas.
- 3) Puede presentar problemas para la eliminación de nitrógeno.

(Fortuño, 2018).

4.2 Selección de la mejor propuesta

4.2.1 ¿Por qué?

- ✓ El sistema Tohá ha sido ampliamente utilizado en varios países como Argentina, Chile y Ecuador, lo anterior se deriva de los resultados que se han obtenido en algunas industrias como es el caso que se mencionó en el apartado de métodos en la industria láctea de INPROLAC, comunidades, en donde se han obtenido buenos resultados de remoción respecto a los parámetros básicos tales como DBO, DQO y SST. El uso de este sistema a nivel internacional avala el éxito de tal tecnología ya que existe una empresa llamada Biofiltro, la cual maneja tal tecnología y es encontrada en Estados Unidos, Perú, España, entre otros (Castro, 2019).

- ✓ En Chile ya se ha aplicado el sistema Tohá en varias áreas como en las industrias alimentarias, balnearios, parques, residencias privadas, mataderos y comunidades rurales (Castro, 2019).
- ✓ En el parque metropolitano de Santiago, Chile, tratan sus aguas residuales mediante el sistema Tohá contando con un sistema de respaldo por fosa por cualquier eventualidad . El agua es reutilizada para el mismo regadío del parque en el sector del jardín japonés, el cual se diseñó para 2000 visitantes y es monitoreado cada 2 días de 3 a 4 horas (PARQUEMET, 2020).
- ✓ El proyecto "Manchay Verde" se construyó en el 2012, situado en la provincia de Lima, distrito de Pachacamac. El cual fue constituido por: Trampa de grasa, Pozo Séptico, Laguna de oxidación y un Humedal subsuperficial de flujo horizontal, tratando el 100% de las aguas residuales del Instituto Trentino Juan Pablo, con el fin de reusarlas en la forestación con extensión de 6 hectáreas. En el 2019 se requirió el tratamiento de sus aguas por colmatación del lecho del humedal. Por lo que implementaron un lombrifiltro Q;1.8414 L/min, THR 4h 30 min, obteniendo 95.46% Demanda Bioquímica de Oxígeno, 90.84% Demanda Química de oxígeno, 99.37% Coliformes Fecales y se obtuvo un promedio total de eficiencia del lombrifiltro del 95.22% (Gallegos, 2019).
- ✓ De acuerdo a la fundación de Chile, 2015, la eficiencia del lombrifiltro o sistema Tohá respecto a DBO es del 95%, SST del 95 % y coliformes totales del 99% (Pérez, Pérez, 2016).
- ✓ En el trabajo de investigación de Baneza Gamarra Silva en el 2021, se evaluó la eficiencia del sistema Tohá en la depuración de contaminantes críticos de las aguas residuales domésticas de la comunidad La Punta Sapallanga a escala piloto, obteniendo una remoción en cuanto a DBO 96,7%, Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 83 % y de Sólidos Suspendidos Totales (SST) 95.6 %.
- ✓ La directora de Ingeniería ambiental de la Universidad Andrés Bello (UNAB), realizó un estudio sobre las tecnologías convencionales y no convencionales, considerando la sustentabilidad, toxicidad humana, cambio climático,

eutrofización y ecotoxicidad de agua dulce, encontrando como resultado, que en comparación con las tecnologías convencionales, como los lodos activados y las lagunas aireadas, las no convencionales son más económicas, como son los vermi-biofiltros (Sistema Tohá) (Ciencia en Chile, 2020).

- ✓ Saboya,2020, realizó un estudio de comparación de *Eisenia foetida* y *Lumbricus terrestris* para el tratamiento de aguas residuales domésticas del Distrito de Chachapoyas, Perú, encontrando como resultado que la lombriz californiana (*Eisenia foetida*), es más eficiente en un 87 % (92% de DBO5, 86% DQO, 78% NT, 84.4% turbidez, 84% en CT) que *Lumbricus terrestris* con un 85 % (91% la DBO5, 84% DQO, 77% NT, 83% turbidez, 80% en CT), en promedio general en la remoción de contaminantes.
- ✓ Los lombrifiltros también son aplicados en la empresa Mowi Chile: Piscicultura Fiordo Aysén (PFA), la cual se dedica a la producción de Salmón Atlántico, donde mencionan que mediante el proceso aerobio que se lleva a cabo en conjunto por las bacterias, hongos y lombrices, no hay generación de malos olores y se obtiene como beneficio el humus de lombriz, el cual puede ser utilizado en otras áreas (Salmonexpert, 2020).



Figura 4.1. Lombrifiltro de Mowi Chile (Salmonexpert, 2020).

4.2.2 Impacto social

El Impacto social que tendría sería benéfico ya que lo que están haciendo algunos países, es educar a la población. Al divulgar el sistema Tohá en la sociedad, la lombricultura y el compostaje se divulgarían de la misma manera, ambos son benéficos para restaurar el suelo. Se controlarían problemas como el desorden territorial, ya que los cerros y los montes son zonas únicas para favorecer la recarga de agua. Por lo tanto, habría mayor conciencia y curiosidad en la población de un país o ciudad, para proteger y cuidar tales cerros y sistemas de tratamiento. Un ejemplo de ello es el cerro del Quinceo en Morelia Michoacán donde paracaidistas lo han invadido realizando quema de árboles y pastizales para instalarse hasta la actualidad, en donde de acuerdo a la coordinación estatal de protección civil Michoacán, tiene condiciones topográficas para el fomento del depósito y acumulación de materia orgánica, por lo que su aplicación y reforestación podría mejorar el crecimiento de árboles y el flujo de la escorrentía superficial (Mendoza, 2022).

4.2.3 Impacto ambiental

En la actualidad existen muchos problemas ambientales: como la erosión y la desertificación del suelo. El arado y las huertas de aguacate están acabando con el suelo. Por lo que el humus producido por el sistema Tohá es una buena opción para tratar estos problemas, al igual que el compostaje y la lombricultura.

A partir del humus de lombriz líquido se puede utilizar como fertilizante orgánico para suelos, o hacer cultivo de algas útiles para emplearse en las lagunas microalgales, las cuales son sistemas biológicos que siguen en investigación. De acuerdo al trabajo de investigación de Huanacuni, 2016, el humus de lombriz resultó como una buena opción para el cultivo de algunas microalgas diatomeas bentónicas

marinas como *Navícula sp*, (viven en el fondo marino). Lo que representa una forma natural y ecológica de estimular su desarrollo. Las cuales tienen varios usos como son biofertilizantes, alimento de consumo y el tratamiento de aguas residuales (Huanacuni, 2016).

El Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) han estado realizando investigaciones en la ciudad de Xalapa desde el 2013, monitoreando la calidad del agua de los Lagos del Dique, donde reportaron una contaminación por presentar altas concentraciones de nitrógeno y fósforo lo que se refleja como grandes tapetes de algas y peces muertos. Al implementar 2 humedales flotantes usando la combinación de hoja de galápago y el papiro en el 2016, después de 4 años (2020) reportaron la ausencia de los tapetes de algas flotantes en la superficie y los peces muertos debido al aumento del oxígeno disuelto y la disminución de los contaminantes, ya que las raíces de estas plantas absorben nutrientes como el fósforo y el nitrógeno.



Figura 4.2. Humedales flotantes (Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), 2021).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

Conclusiones

1. Los lodos activados y las lagunas de oxidación se han implementado a nivel mundial para tratar las aguas residuales, pero generando lodos y malos olores que generalmente ya no se les da un adecuado tratamiento.
2. La aplicación de una sola tecnología no es suficiente para remediar o tratar las aguas residuales, más bien se requiere de la combinación de sistemas y pretratamientos a estos para obtener una mejor calidad y eficiencia de remoción respecto a los parámetros principales del agua a evaluar DBO, DBO Y SST.
3. A pesar de que existen tecnologías avanzadas como el reactor de membrana permeable, entre sus desventajas es que son costosas y se requieren de personal muy capacitado por lo que a largo plazo no son fáciles de proporcionarles mantenimiento. Por lo que la implementación del Sistema Tohá y los humedales construidos deberían divulgarse a nivel industrial, social y comunitario para mejorar la economía propia de las comunidades, ya que con el humus generado por parte del sistema Tohá podrían generar subproductos como fertilizante natural para sus propias huertas o jardines, al igual que continuar con sus investigaciones teóricas y prácticas con el objetivo de aumentar su eficiencia, disminuir costos energéticos y lodos , recuperar productos y así mejorar el impacto ambiental.

Como propuestas se sugiere:

1. Enfocar las investigaciones teóricas en el mantenimiento específico del sistema Tohá en primer lugar, debido a sus ventajas que tendrían en la sociedad y los suelos y en segundo lugar los humedales construidos ya que favorecerían la continua circulación de los ciclos biogeoquímicos y por consecuencia la flora y fauna de un ecosistema.
2. Se deberían realizar planes de guía para la habilitación y operación de lombrifiltros y humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales y comunitarios.
3. Al igual que hacer trenes de tratamiento específicos para tratar el tipo de agua residual que se requiera tratar.
4. Investigar más a fondo el crecimiento de microalgas con humus de lombriz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agüero Cruz A. A. (2019). *Tratamiento de lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con la aplicación de la lombricultura en la Compañía Minera Chungar - 2019* [Tesis, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2045/1/T026_71530948_T.pdf
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). *Protocolo para la elaboración y presentación de planos de levantamiento topográficos*. [Archivo PDF]. https://idesc.cali.gov.co/download/normatividad/protocolo_elaboracion_presentacion_planos_levantamientos_topograficos.pdf
- Banco interamericano de desarrollo BID. (2020). *Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Innovaciones-en-el-desarrollo-e-implementacion-de-humedales-construidos-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas-en-Latinoamerica-y-El-Caribe.pdf>
- Bravo Marinni M. A. (2019). *Diseño y evaluación del uso de lombrifiltro como alternativa al tratamiento de residuos líquidos industriales en el proceso de producción de carragenina*. [Tesis, Universidad del Bío-Bío] http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3456/3/Bravo_Marinni_Marcelo_Andr%C3%A9s.pdf
- Camacho, A., Delgadillo, O., Pérez, L y Andrade, M, (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. [Archivo PDF]. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Castro Castellanos, 2019. *Estudio de viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema Tohá (lombrifiltro) para el tratamiento de las aguas residuales en el municipio de Tinjacá - Boyacá*. [Tesis, Universidad

Distrital San Francisco José de caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22771/CastroCastellanosElizabeth2019.PDF..pdf;jsessionid=77D8719D7595329B9DBD41F671584CE0?sequence=1>

- Caviedes Rubio, D.I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., y Sandoval Rojas, I. J. (2015). *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales*. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1):73-90.
[file:///C:/Users/anton/Downloads/Dialnet-TratamientosParaLaRemocionDeMetalesPesadosComunmen-5432290%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/anton/Downloads/Dialnet-TratamientosParaLaRemocionDeMetalesPesadosComunmen-5432290%20(1).pdf)
- Céspedes Sánchez, Jiménez Farieta. (2018). *Desarrollo de un proceso de compostaje para el aprovechamiento de lodos resultantes de la planta de tratamiento de agua potable Francisco Wiesner EAAB-ESP*. [Proyecto integral de grado de Ingeniero Química, Fundación Universidad de América].
<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6852/1/6132192-2018-2IQ.pdf>
- Ciencia en Chile. (17 de julio del 2020). *Las tecnologías no convencionales, son más eco-eficientes que las tecnologías de tratamiento de aguas residuales convencionales usadas en Chile*.
<https://www.cienciaenchile.cl/las-tecnologias-no-convencionales-son-mas-eco-eficientes-que-las-tecnologias-de-tratamiento-de-aguas-residuales-convencionales-usadas-en-chile/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de lagunas de estabilización*. [Archivo PDF].
<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, Sistema Nacional Ambiental. (09 de octubre de 2019). *Usos del Agua*. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>

- De Anda. (2017). *Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México*. (Archivo PDF). https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/818/1/0000323651_documento.pdf
- De la lanza Espino, G., Hernández Pulido, S. (2019). *Ciencias Biológicas, del Mar y Limnología. Variación de la calidad del agua de La Ciénega de Tláhuac, México*. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 26(3). <https://doi.org/10.30878/ces.v26n3a4>
- Fernández Calderón (2019). *Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial y un tratamiento biológico mixto, empleando Pleurotus ostreatus Y Trametes versicolor para mejorar la calidad de las aguas hidrocarburadas de la Estación de Servicio Biomax Colina en Bogotá*. [Tesis, Universidad El Bosque]. https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2697/Fernandez_Calderon_Danna_Fernanda_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fernández Martos. (2021). *Sistema integrado de lombrifiltros y filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. [Trabajo final de master, Universidad de Alcalá] https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/49872/TFM_Fernandez_Martos_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fortuño Ibáñez. 2018. *Aplicación de los sistemas bioelectroquímicos en humedales construidos para la mejora del tratamiento de aguas residuales domésticas* [Tesis de grado en Ingeniería de Obras Públicas, Escola de Camins UPC] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123894/FortuibaAlberto_SistemasBioelectroquimicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gallegos Valqui, 2019. *Evaluación del lombrifiltro como tratamiento primario del sistema de tratamiento de aguas residuales del proyecto Manchay Verde*. [Tesis, Universidad Tecnológica de Lima Sur].

http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:JPkA-xqVxDQJ:repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/177/1/Gallegos_Diego_Trabajo_Suficiencia_2019.pdf+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx

- Gamarra Silva. (2021). *Eficiencia del sistema de vermifiltro en la depuración de contaminantes críticos de aguas residuales domésticas de la comunidad. La Punta - Sapallanga*. [Tesis, Universidad Continental. Facultad de ingeniería].
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10204/1/IV_FIN_107_TE_Gamarra_Silva_2021.pdf
- Garzón, J.M., Rodríguez-Miranda, J.P. y Hernández-Gómez C. (2017). *Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible*. Rev. Univ. Salud,19(2),309-318. <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>
- Geo innova. (29 de abril del 2022). *Cartografía para los Estudios de Impacto Ambiental*.<https://geoinnova.org/blog-territorio/cartografia-de-impacto-ambiental/>
- Gómez Fernández, S. (2021) Ingeniería genética aplicada en biorremediación [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén].
<https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/14440/1/TFGCA-Gomez%20Fernandez%20Sofia.pdf>
- Guzmán Sepúlveda, M. G. (2004). *Estudio de la aplicación del sistema Tohá en la planta de tratamiento de aguas servidas de Valdivia*. [Tesis, Universidad Austral de Chile]. <https://es.slideshare.net/nktivian/sistema-toha-63919136>
- Guzmán, R., Arboleda, D y Gutiérrez, J. (2020). *Aguas residuales. Conoce las 17 tecnologías para el tratamiento de aguas residuales*. [Diapositivas en ISSUU]
https://issuu.com/ricardo4883/docs/17_tecnologias_para_tratamiento__1__
- Hernández Sánchez, Y. (2020). *Estrategias de manejo para la conservación del Lago Zempoala en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México*.

[Tesis de maestría en manejo de recursos naturales, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]
<http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1474/HESYNR00T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Hernández Zaragoza, P., Valdez Lazalde, J. R., Aldrete A y Martínez Trinidad, T. (2019). *Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales*, 25(2), e2521819.<http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v25n2/2448-7597-mb-25-02-e2521819.pdf>
- Hidro SM. (31 de mayo del 2018). *Hidrología - Conceptos Básicos*. [Archivo de video] https://www.youtube.com/watch?v=5SCm-UbA83g&ab_channel=HidroSM
- Hoffmann, H., Muench, E., Platzler, C y Winker, M. (2011). *Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. [Archivo PDF]. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-T--cnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>
- <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf>
- Huanacuni Pilco, J. I. (2016). *Efecto de medios de cultivo elaborados con fertilizante orgánico e inorgánico en el crecimiento y fijación de diatomeas betónicas marinas con potencial acuícola*. [Tesis, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann] http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/1948/926_2016_huanacuni_pilco_ji_faci_biologia_microbiologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- IAGUA, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. (15 de diciembre del 2020). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes*. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>
- Instituto de Ecología, A.C.(INECOL), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2021). *Innovadores humedales flotantes: plantas y*

bacterias aliados en el mejoramiento de la calidad del agua.
<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/711-innovadores-humedales-flotantes-plantas-y-bacterias-aliados-en-el-mejoramientos-de-la-caliddad-del-agua>

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (15 de noviembre del 2007). *Factores que inciden en la eficiencia de una tecnología de remediación.*
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/factores.html>
- Jiménez Hernández, V. (2018). *Desarrollo de una metodología mediate acoplamiento de bioaumentación, bioestimulación y bioventeo para la remediación de un suelo costero.* [Tesis de grado, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas-CIATEC].
https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1019/100/1/Tesis%20Ver%C3%B3nica%20Jim%C3%A9nez_VERSION%20FINAL.pdf
- Loya Del Angel, D.I. (2013). *Tecnologías para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos.* [tesina de grado especialista en gestión e impacto ambiental, Universidad Veracruzana].
<https://www.uv.mx/pozarica/egia/files/2012/10/Loya-Del-Angel-Daniela-Iltzel.pdf>
- Lucy Mora. P., Roberto Bonifaz y López Martínez, R. (2016). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. *Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México*, 68(3), 377-394.
<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/309-sitio/articulos/cuarta-epoca/6803/1525-6803-1-mora>
- Mendoza P. (28 de enero de 2022). Denuncian instalación de paracaidistas en el cerro del Quinceo. PCM agencia informativa.
<https://pcmnoticias.mx/2022/01/28/denuncian-instalacion-de-paracaidistas-en-el-cerro-del-quinceo/>
- Merino R, Paredes M. (15 y 16 de noviembre del 2019). *Tratamiento del agua. Foro de capacitación ambiental empresarial. Impulsando el desarrollo sustentable a través de procesos limpios y eficientes.* [Discurso principal]

https://sedum.michoacan.gob.mx/download/foro_de_capacitacion_ambienta_l_empresarial/ss3-TRATAMIENTO-DE-AGUAS-RESIDUALES-Reparado.pdf

- Molina A. (mayo 05, 2021). Dejan morir al lago de Cuitzeo. *ABC noticias*. <https://abcnoticias.com.mx/detalles.php?id=1342>
- Mujica Friede, J. P y Chávez Tequia C. A. (2015). *Estudio de humedales flotantes para la mejora de calidad de agua de escorrentía. Caso: Edificio de parqueaderos de la Pontificia Universidad Javeriana*. [Tesis, Pontificia Universidad Javeriana].
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21397/ChavesTequiaCamiloAndres2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Noyola, A., Morgan Sagastume, J. y Guereca, L. 2013. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales* (Archivo PDF). <http://proyectos2.iingen.unam.mx/LACClimateChange/docs/Guia.pdf>
- Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCYTU). (2019). *Tratamiento de aguas residuales*. [Archivo PDF]https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf
- Ortega H. (9 de agosto del 2019). Estudio compila hallazgos de contaminación por fármacos en el agua. *CONECTA-Tecnológico de Monterrey*. <https://conecta.tec.mx/es/noticias/nacional/investigacion/estudio-compila-hallazgos-de-contaminacion-por-farmacos-en-el-agua#:~:text=Estudio%20compila%20hallazgos%20de%20contaminaci%C3%B3n%20por%20f%C3%A1rmacos%20en%20el%20agua,-Por%20Hiram%20Alonso&text=Se%20encontraron%20adem%C3%A1s%20contaminantes%20de,de%20diferentes%20partes%20del%20mundo.>
- Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A. y Meza-Rodríguez, L. D. (2018). *La biorremediación con microalgas (Spirulina máxima, Spirulina platensis y Chlorella vulgaris) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia*. *Rev.investig.desarro.innov*, 9(1), 163-176. <http://www.scielo.org.co/pdf/ridi/v9n1/2389-9417-ridi-9-01-163>

- Oseguera, L., González, I. y Domínguez, C. (28-30 DE SETIEMBRE DE 2016). *"Restauración de ríos empleando humedales flotantes caso Río Grande de Morelia."* (Discurso principal). XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Perú.
<http://investigacionesyproyectoshidraulicos.com/web/Material%20Cientifico/Articulos/Mas%20de%201000%20Articulos/526.pdf>
- Papuico Huayta, Karito Zulma. (2018). *Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (Senecio rudbeckiaefolius) en la rivera de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
<http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/457/1/TESIS%20KARITO.pdf>
- Parque Metropolitano de Santiago-PARQUEMET. (Agosto - Diciembre 2020). *Sistema de tratamiento por lombrifiltro (Tohá) en el jardín japonés.*
<https://www.parquemt.cl/sistema-de-tratamiento-por-lombrifiltro-toha-en-el-jardin-japones/>
- Pedraza Ortiz, L. J. (2015). *La biodepuración del aire con plantas yornamentales, como alternativa ambiental en el siglo XXI.* [Proyecto curricular de ingenieris ambietal,Universidad Distrital Francisco José de caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3767/PedrazaOrtizLadyJohana2016.pdf?sequence=1>
- Pérez Alarcón. Pérez Yahuara. (2016). *Proyecto de instalación de una planta de procesamiento de las aguas residuales domésticas del Distrito de Motupe usando el sistema TOHÁ.* [Tesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]
https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/8606/P%3%A9rez_Alarc%C3%B3n_Mois%C3%A9s_Bladimir_y_P%3%A9rez_Yahuara_Segundo_Ar%C3%ADsteres.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez Villarreal, J. 2018.*Estudio hidrogeológico del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia, Michoacán.* (Tesis de Doctorado, Universidad

Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/3807/INIRENA-D-2018-1241.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Pérez, Y.A., García Cortés, D.A., Jauregui Haza, U.J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas, Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 31(1): 2279. <file:///C:/Users/anton/Downloads/2279-Texto%20del%20art%C3%ADculo-11377-1-10-20220421.pdf>
- Raffo Lecca, E. y Ruiz Lizama, E. (2014). *Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno*, 17(1), 71-80. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Ramírez Landeta. (2021). *Viabilidad y factibilidad técnica y económica de una planta procesadora de humus elaborado a partir de efluentes de la industria láctea* [Tesis de maestría, Universidad Técnica del Norte Instituto de Postgrado].
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11561/2/PG%20895%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Rodríguez, I. (15 de agosto de 2021). Registra México déficit en plantas para tratar agua. *El economista*.
<https://www.economista.com.mx/politica/Registra-Mexico-deficit-en-plantas-para-tratar-agua-20210815-0093.html>
- Rojas, A. (2020) *Estudio de filtros biológicos para aguas grises utilizando lombriz roja californiana* [Tesis, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/49675/3560901068977UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salazar, (2005). *Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales* [Tesis, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmficis161s/doc/bmficis161s.pdf>
- Salmonexpert. (2 de marzo del 2020). *Mowi Chile: Ampliación de piscicultura integra tecnología sustentable*. <https://www.salmonexpert.cl/article/con-nueva-ampliacin-de-piscicultura-mowi-busca-una-produccion-sustentable/>

- Santiago, H. (2012). *Importancia histórica y cultural de los humedales del borde norte de Bogotá (Colombia)* [Archivo PDF]. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v15n1/v15n1a18.pdf>
- SEMARNAT. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático* [Archivo pdf].
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (22 de marzo del 2017). *Geología ambiental*. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Geologia-ambiental.html>
- Suarez Beltrán, R. M. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. [Tesis de postgrado, Universidad Libre]. [file:///C:/Users/anton/Downloads/TRABAJO%20FINAL%20cd%20\(7\).pdf](file:///C:/Users/anton/Downloads/TRABAJO%20FINAL%20cd%20(7).pdf)
- Tecnológico de Monterrey (9 de agosto del 2019). *Estudio compila hallazgos de contaminación por fármacos en el agua*. <https://conecta.tec.mx/es/noticias/nacional/investigacion/estudio-compila-hallazgos-de-contaminacion-por-farmacos-en-el-agua>
- Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM. (29 de mayo del 2019). *Sistemas microalgales en procesos ambientales y generación de bioenergía*. http://www.ii.unam.mx/esmx/Investigacion/Proyecto/Paginas/Sistemas_microalgales_procesos_ambientales_bioenergia-.aspx
- World Association of Theoretical and Computational Chemists (WATOC). (19 de diciembre del 2020). *Lagunas de oxidación (estudio crítico)* [Archivo de video]. <https://www.youtube.com/watch?v=936wmoQr5Z4>