



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

INGENIERÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE HUMEDALES
CONSTRUIDOS EN EL TRATAMIENTO DE
LIXIVIADOS PROCEDENTES DEL TIRADERO
A CIELO ABIERTO EN MISANTLA, VER.”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

P R E S E N T A

GERARDO NOEL HERNÁNDEZ VILLEDA

DIRECTOR:

Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo

CO-DIRECTOR:

M. Sc. Elizabeth Salazar Hernández



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

FECHA: 23 DE FEBRERO DE 2023.

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS PROFESIONAL.**

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente hago constar que el (la) C:

GERARDO NOEL HERNÁNDEZ VILLEDA

pasante de la carrera de INGENIERÍA AMBIENTAL con No. de Control 162T0445 ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Manual de Procedimientos para la Obtención del Título Profesional de Licenciatura** bajo la opción **Titulación Integral (Tesis Profesional)**

Por tal motivo se **Autoriza** la impresión del **Tema** titulado:

**“EVALUACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN EL TRATAMIENTO DE
LIXIVIADOS PROCEDENTES DEL TIRADERO AL CIELO ABIERTO EN
MISANTLA, VER”**

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del Acto de Recepción para la obtención del Título Profesional.

ATENTAMENTE

MII. GRACIELA GUADALUPE AGUILERA ÁLVAREZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



Archivo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Amalia y Fermín quienes desde el inicio de mi vida me motivaron creer en mí mismo, a ser mejor ser humano y a lograr todo lo que me propusiera usando el conocimiento y todo el recurso que tuviese a la mano para lograrlo y aunque ha habido diferencias, siempre han estado ahí.

A la Academia de Ingeniería Ambiental del ITSM, Neira, Elizabeth, Heidi, Corelly, Yovani, Cristina y Alan por su entrega a motivar y compartir el conocimiento que, a pesar de ser una carrera joven, nunca los vi flaquear, siempre con el ánimo y la actitud de ser mejores y progresar, motivar a las nuevas generaciones. Consciente también soy que la humanidad necesita la Ingeniería Ambiental para no solo progresar sino también subsistir sustentablemente utilizando tecnologías ambientales.

A mis compañeros de la carrera, quienes en el momento que sufrí un accidente que me dejó internado y en silla de ruedas, realizaron un esfuerzo por reunir recursos para que continuara con mi meta de ser Ingeniero Ambiental, realizaron trabajos invirtiendo su tiempo y esfuerzo para reunir un recurso económico para ayudarme, realmente los llevo en el corazón y nunca en la vida lo olvidaré, eso me motiva a ser un Ingeniero Ambiental ético y de calidad.

A todos los seres hermosos que la vida a puesto en mi camino para aprender y compartir experiencias y que se han vuelto amistades casi familia, realmente estoy infinitamente agradecido por todo el amor que me han dado y ellos son testigos de lo mucho que he trabajado y esforzado y que soy feliz por ello.

Al universo, Dios o como concibas la fuerza más allá de uno, por iluminarme el camino, porque esa fuerza sabe por qué estudie esta carrera de ingeniería, porque sabe que vine como ser humano para hacer un cambio positivo en la humanidad y por medio de

tecnologías sustentables es una forma de hacerlo, porque todos somos uno y quiero vivir feliz y autosuficiente, por lo tanto, quiero un futuro mejor para todos.

A mí mismo, por creer en mí, por llegar a lograrlo por mí mismo, porque a pesar de estar solo, jamás dudé, por las noches de desvelo, por las fiestas y las chicas que rechacé para no fallar en mi meta, porque hubo momentos en los que estuve a nada y decidí no rendirme, porque para lograrlo tuve que aprender y hacer cosas que jamás hubiese imaginado, porque este proceso me forjó como un ser humano excepcional, porque de alguna forma todo obstáculo me motiva a ser mejor persona, porque aunque duela, mi cuerpo sabe que habrá una mejor recompensa al final y ese es mi piloto automático, vamos a hacer grandes cosas, gracias, gracias, gracias! .

DEDICATORIA

A toda la población que se esfuerza y aporta su grano de arena para cuidar nuestro hogar, el planeta tierra.

Al Doctor Luis Carlos, quien al igual que su servidor, llevó a cabo una cuesta para concluir sus estudios académicos, por lo que conlleva una determinación y fortaleza inquebrantables para lograr lo imposible.

A Joaquín, excompañero de primaria el cual la vida ha llevado por caminos distintos y ahora convergemos, sin embargo con el mismo fuego y determinación que en aquellos ayer.

A toda la gente consciente que lucha por un mundo mejor y que sabe que con hacer un cambio en uno mismo, lo hace en todo el universo, gracias.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	5
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	8
ABREVIATURAS	9
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Planteamiento del problema.....	12
1.3 Justificación.....	13
1.4 Objetivos.....	15
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Residuos sólidos urbanos.....	16
2.2 Relleno sanitario.....	16
2.3 Vertedero a cielo abierto	16
2.4 Agua residual	17
2.4.1 Tipos de aguas residuales	17
2.4.2 Aguas residuales domésticas	18
2.4.3 Lixiviados.....	19
2.4.3.1 Contaminantes de los lixiviados	20
2.4.3.2 Tipos de tratamiento de lixiviados	21
2.5 Humedales naturales.....	22
2.6 Humedales construidos (HC)	22
2.6.1 Tipos de Humedales Construidos (HC)	23
2.6.1.1 Humedales Construidos de Flujo Superficial (HC-FS).....	24
2.6.1.2 Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (HC-FSS).....	25
2.6.1.3 Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo Vertical (HC-FSSV).....	25
2.6.1.4 Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo Horizontal (HC-FSSV).....	26

2.7 Componentes de los Humedales Construidos (HC)	27
2.7.2 Microorganismos.....	28
2.7.3.2 Plantas ornamentales en Humedales Construidos	29
2.9 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	31
2.10 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	32
2.11 Nitrificación y desnitrificación.....	33
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	35
3.1 Revisión bibliográfica.....	36
3.2 Implementación del sistema de humedales	36
3.2.1 Área de estudio	36
3.2.2 Descripción del sistema	37
3.2.3 Alimentación del sistema	39
3.3 Monitoreo del sistema	40
3.3.1 Parámetros ambientales.....	40
3.3.2 Desarrollo de la vegetación.....	41
3.3.3 Análisis fisicoquímicos.	41
3.4 Obtención e interpretación de resultados	42
CAPITULO IV. RESULTADOS	43
4.1 Análisis inicial de los lixiviados	43
4.2 Desarrollo y supervivencia de la vegetación	45
4.2.1 Vegetación en el periodo de adaptación.....	45
4.2.1 Vegetación en el periodo de experimentación.....	46
4.3.1 DQO	47
4.3.2 DBO ₅	49
4.3.3 Nitrógeno Total.....	51
4.3.4 Amonio.....	53
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lixiviados en el vertedero a cielo abierto en Misantla, Veracruz	19
Figura 2. Clasificación de los Humedales Construidos (HC)	23
Figura 3. Componentes principales de los Humedales Construidos (HC).	27
Figura 4. Diagrama de la metodología experimental	35
Figura 5. Ubicación geográfica de Misantla, Veracruz.	36
Figura 6. Sistema de Humedales Construidos de Flujo Vertical (HC-FSSV) para el tratamiento de lixiviados de vertedero.	37
Figura 7. <i>Typha Latifolia</i>	38
Figura 8. <i>Heliconia Psittacorum</i>	38
Figura 9. Tezontle o roca volcánica roja.	39
Figura 10. Vertedero a cielo abierto en el municipio de Misantla, Veracruz.	40
Figura 11. Espectrofotómetro Hanna Instruments HI801 iris. Fuente: Manual de usuario Hanna Instruments	41
Figura 12. Medidor inteligente Hach LBOD101	42
Figura 13. Crecimiento de la planta durante los 8 meses de experimentación	47
Figura 14. Variación de la DQO durante la experimentación	48
Figura 15. Comparación de la remoción de DQO entre monocultivos y policultivos	48
Figura 16. Variación de la DBO5 durante la experimentación	50
Figura 17. Comparación de la remoción de DBO entre monocultivos y policultivos	50
Figura 18. Variación del NT durante la experimentación	51
Figura 19. Comparación de la remoción de DBO entre monocultivos y policultivos	52
Figura 20. Variación del NH ₃ durante la experimentación	53
Figura 21. Comparación de la remoción de NH ₃ entre monocultivos y policultivos	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especies de vegetación más comunes en humedales construidos.	30
Tabla 2 Escala de clasificación de calidad del agua según DQO	32
Tabla 3. Escala de clasificación de calidad del agua DBO5	33
Tabla 4. Caracterización inicial de los lixiviados de vertedero diluidos con agua residual doméstica	43

ABREVIATURAS

AS: Aguas Servidas

COT: Carbono Orgánico Total

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

HC: Humedales Construidos

HC-FS: Humedales Construidos de Flujo Superficial

HC-FSS: Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial

HC-FSSH: Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal

HC-FSSV: Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical

LGPGIR: Ley de Gestión y Prevención de Gestión Integral de residuos

LGEEPA: Ley General De Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

OD: Oxígeno Disuelto

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

RME: Residuos de Manejo Especial

RP: Residuos Peligrosos

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SDT: Sólidos Disueltos Totales

SST: Sólidos Suspendidos Totales

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

1.1 Introducción

Con el aumento de la población en los últimos años, la globalización y el consumismo, la generación de residuos se ha incrementado considerablemente. La desmedida sobreproducción de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) ha conllevado a que los sitios de disposición final sean ineficientes; siendo los tiraderos a cielo abierto los sitios más utilizados como destino final de los residuos en los últimos años (INEGI, 2019).

Los tiraderos a cielo abierto generan lixiviados, los cuales son un líquido generado por el proceso de descomposición de los RSU (SEMARNAT, 2015) y puede causar graves amenazas a la salud y al medio ambiente especialmente por el gran impacto en suelos y manto freáticos, esto, debido a la variabilidad de su composición, cantidad de floculantes, concentraciones de contaminantes y concentraciones de DQO, es por ellos que estos lixiviados requieren de un tratamiento adecuado antes de su liberación (Wojciechowska et al, 2010). Su disposición y manejo inadecuado resulta un grave problema para la salud pública y del ecosistema, siendo así, que una gota de lixiviado puede llegar a contaminar 100 litros de agua (Sandoval et al, 2018).

Las tecnologías y métodos utilizados comúnmente para el tratamiento de los lixiviados exigen altos costos en cuanto a construcción, operación y mantenimiento. Sin embargo, los humedales construidos presentan facilidad y bajos costos tanto de operación como de mantenimiento, además de bajo consumo de energía eléctrica,

adaptables a diferentes niveles de tratamiento, lo que la hace una alternativa sustentable y respetuosa con el medio ambiente (Bakhshoodeh et al, 2020). La remoción de contaminantes en los humedales construidos presenta una eficiencia dependiendo de variables como las condiciones climáticas, el tipo de humedal o humedales y su respectiva configuración sistemática.

Los humedales de flujo vertical subsuperficial son sistemas en los que el agua residual fluye a través del sustrato, en general gravilla, entrando en contacto con los microorganismos que colonizan la superficie tanto de las raíces de las plantas como del propio sustrato. En este tipo de humedales, la lámina de agua se encuentra en profundidad, además, el medio no se encuentra permanentemente saturado, ya que el agua se aplica normalmente en intervalos regulares y percola a través del medio. Estas ecotecnias ofrecen una excelente solución para el tratamiento de aguas residuales con flujos intermitentes o discontinuos, como es el caso de escuelas, viviendas e incluso sistemas de drenaje sanitario (Rodriguez et al, 2013;Orozco et al, 2006).

Por tal, en el presente trabajo se evalúa la eficiencia de los Humedales Construidos en el tratamiento de los lixiviados procedentes del tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz. De esta manera abre la posibilidad a mitigar la contaminación de cuerpos de agua con una tecnología sustentable, además de económica en comparación con otros métodos.

1.2 Planteamiento del problema

El municipio de Misantla, Veracruz, ubicado en la sierra montañosa, dispone sus RSU en un tiradero a cielo abierto, el cual no cuenta con protección impermeable para evitar que los lixiviados y demás derivados contaminen el suelo, agua y aire.

Los lixiviados generados por los RSU representan un problema al cual debe darse un tratamiento, disposición o en última instancia una minimización ya que es un poderoso contaminante muy peligroso para la vida en el planeta. Los lixiviados se vuelven un foco de contaminación constante en sitios como los rellenos sanitarios. El problema se agrava cuando el sitio está cerca de un sitio de agua, como lo son lagunas, lagos, ríos o un manto freático (Montes, 2011).

Otra problemática es que la parte trasera de dicho tiradero se encuentra en una pendiente, la cual, desciende a un arroyo interurbano, que por escorrentía recibe todos los lixiviados derivados de los residuos dispuestos en este sitio sin ningún procesamiento ni manejo. El efluente por lo tanto llega hasta el río Chapa Chapa el cual suministra de agua para consumo humano y agricultura a múltiples comunidades de la zona baja de la región misanteca, poniendo en riesgo la salud y la vida de los ecosistemas y de los mismos seres humanos. Dado a los peligrosos contaminantes que contiene el lixiviado que incluyen metales pesados, puede causar grandes estragos a los ecosistemas, tan solo una gota de lixiviado es capaz de contaminar cien litros de agua. En este sentido se requieren alternativas económicas y ecológicas para manejar o tratar el lixiviado de forma adecuada evitando que su vertimiento a cuerpos de agua superficiales cause daños al ecosistema y la salud humana.

1.3 Justificación

Los sitios de disposición final de RSU deben contar con instalaciones adecuadas tanto para el manejo de los residuos como los lixiviados generados, sin embargo, en países en vías desarrollo se cuenta con pocos rellenos sanitarios generando contaminación a aire, agua y suelo. Tan solo en México el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto, siendo sólo 13% rellenos sanitarios, únicamente el 14.80% cuenta con geomembrana para aislar los RSU del suelo (SEMARNAT, 2020).

Es prioritario darle solución a la problemática de la liberación de lixiviados en el vertedero de Misantla. El presente trabajo evalúa los requerimientos necesarios para tratar dichos lixiviados utilizando sistemas de humedales para optar así por el mejor tratamiento en términos costo-beneficio.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales presentan un costo relativamente elevado en comparación con las tecnologías de biorremediación como lo son los Humedales Construidos (HC). Algunas de las ventajas que presentan los HC son el bajo costo, fácil mantenimiento, altos efectos de purificación y beneficios ambientales de esta tecnología de tratamiento de aguas residuales, adecuada para aguas subterráneas y superficiales, no requiere personal especializado para su funcionamiento, no genera malos olores, además, el costo de operación y mantenimiento es de 1 a 3 pesos por cada metro cúbico de agua residual tratada (cuando en una planta tradicional es de 7 a 10 pesos por metro cúbico) (Perez et al, 2022).

Con el presente trabajo, no solo se fomentará el cuidado de los factores bióticos y abióticos representativos de la región, sino que también fomentará la participación ciudadana y académica en el cuidado de los mismos. Los humedales construidos toman los contaminantes como recurso natural y sustento para la vegetación que se plantará en ellos, de esa manera no solo se evitará la contaminación, sino que también se le aprovechará como ingreso a la economía local a los operadores de los HC.

Más que un sitio de confinamiento para los lixiviados que representan una amenaza contaminante, se utiliza como recurso para alimentar distintos tipos de plantas por medio de los humedales construidos. Si bien se puede obtener cosecha de las plantas del humedal, también puede ser un atractivo turístico para la ciudad de Misantla, la cual tiene abierta la posibilidad de un diseño representativo como atractivo turístico desde una vista aérea.

Los HC han demostrado ser una tecnología económica y ecológica que ha dado buenos resultados en el tratamiento de aguas domésticas e industriales, los parámetros del agua resultante son aptas y cumplen con la normatividad para incorporarse a un cuerpo de agua natural (Luna & Aburto, 2015). Estudios recientes indican que han sido utilizados con éxito en el tratamiento de lixiviados (Fonseca, 2010; Morales K. P., 2018).

Las temperaturas cálidas a templadas favorecen los procesos bioquímicos en humedales, obteniendo mejores resultados. Por lo antes mencionado resulta pertinente que se evalúen el uso de humedales construidos en el tratamiento de

lixiviados del tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz, el cual por escurrimiento contamina arroyos interurbanos, ríos y suelo.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Evaluar la eficiencia de eliminación de lixiviados generados en el tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz, mediante Humedales Construidos de Flujo Vertical bajo condiciones de clima tropical.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Analizar los lixiviados generados en el tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz.
- Evaluar el proceso de adaptación y supervivencia de diversos tipos de vegetación (*Typha Latifolia* y *Heliconia Psittacorum*), en mono y policultivos en Humedales Construidos de Flujo Vertical alimentados con lixiviados procedentes del tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz.
- Evaluar la eficiencia de Humedales Construidos de Flujo Vertical en el tratamiento de lixiviados generados en el tiradero a cielo abierto de Misantla, Veracruz.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos sólidos urbanos

Son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la LGPGIR como residuos de otra índole (LGPGIR, 2003).

2.2 Relleno sanitario

Es una técnica de disposición final de RSU mediante la cual se les confina a un área lo más reducida posible, donde se distribuye la basura en capas, se la compacta y se le cubre con tierra cada cierto tiempo. Esta técnica busca minimizar los daños al medioambiente controlando los efectos potenciales de contaminación mediante el tratamiento de los efluentes líquidos (lixiviados) y gaseosos de efecto invernadero que producen los RSU al descomponerse (Gutierrez, 2014).

2.3 Vertedero a cielo abierto

Sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en la norma 083-SEMARNAT-2003 (especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial). (Galina et al, 2019).

2.4 Agua residual

Con el paso del tiempo, el ser humano ha utilizado el agua como vehículo de desecho, de ahí su definición de aguas residuales. Estas suelen acarrear una mezcla compleja de contaminantes orgánicos e inorgánicos, por lo tanto, una de las distintas clasificaciones más usadas es por su procedencia (Muñoz, 2008):

La clasificación de las aguas residuales puede hacerse de diferente forma. Se pueden catalogar según su cantidad y tipo de sustancias químicas, según sus características microbiológicas, según su porcentaje de materia en suspensión o, lo que es más común, según su procedencia.

2.4.1 Tipos de aguas residuales

- Drenaje
- Escorrentía
- Domésticas
 - Fecales
 - Limpieza
- Industriales
 - Comerciales
 - Industriales
- Agrarias
 - Agrícolas
 - Ganaderas

La depuración de este tipo de aguas residuales se basa en procesos físicos, químicos y biológicos. Las aguas residuales de origen urbano o doméstico se forman de aguas fecales, aguas de lavado, sustancias sólidas y restos de naturaleza tanto inorgánica como orgánica. Las aguas industriales, debido a su diversa composición regularmente requieren de un tratamiento previo antes de ser vertidas. Las aguas de lluvia no están exentas de contaminación, pues en su caída se mezclan con materiales en suspensión presentes en la atmósfera, como CO₂ y polvo, y las aguas agrícolas, en su mayoría se componen de fertilizantes, herbicidas, entre otros.

Uno de los derechos fundamentales es el disfrute del grado máximo de salud posible, así como el acceso oportuno, aceptable y asequible a servicios de calidad suficiente establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022). Por tal motivo, en la actualidad es una necesidad prioritaria remediar la contaminación del agua a corto, mediano y largo plazo; siendo los lixiviados de las aguas más contaminadas que existen pues abarcan varios tipos de aguas residuales.

2.4.2 Aguas residuales domésticas

Son las provenientes de actividades domésticas, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias o de cualquier otra actividad que, por el uso de que han sido objeto, contienen materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original.

Los constituyentes convencionales presentes en aguas residuales domésticas son: sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO,

respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniacal, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus (Silva et al, 2008)

2.4.3 Lixiviados

Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (LGEEPA, 2022). Los lixiviados se pueden considerar como un tipo muy específico de agua residual los cuales están compuestos por una alta carga orgánica, compuestos orgánicos solubles y constituyentes inorgánicos (Montes, 2011).



Figura 1. Lixiviados en el vertedero a cielo abierto en Misantla, Veracruz
Fuente: Autoría propia

2.4.3.1 Contaminantes de los lixiviados

La presencia de vertederos conlleva a la ineludible generación de lixiviados, esto debido a que la descomposición de los residuos almacenados es llevada a cabo a través de una secuencia de procesos biológicos y físico-químicos. Mientras ocurre el proceso de descomposición, el agua de lluvia se percola a través del lecho de los residuos, dando lugar así a un efluente líquido que disuelve la variedad de componentes de los que están constituidos los residuos sólidos depositados, por medio de drenes y pendientes almacenados en lagunas estabilizadoras. Así es como se da lugar a un residuo acuoso, mejor conocido como lixiviado contaminado, con una alta carga de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales inorgánicas, adquiriendo un desagradable olor, intenso color negro/rojo y toxicidad elevada. En los últimos años, los requisitos cada vez más estrictos de descarga de aguas residuales han planteado dudas sobre la eficacia del tratamiento de lixiviados en PTAR (Brennan et al, 2017).

La composición del lixiviado tiende a ser muy variable y compleja, principalmente se componen de las siguientes categorías de contaminantes: materia orgánica disuelta (expresada en forma de parámetros generales como DQO o COT), componentes inorgánicos (Cl^- , SO_4^{2-} , N-NH_3 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), metales pesados (Fe, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) y compuestos xenobióticos (PAHs, AOX o fenoles) (MARTÍNEZ, 2008).

2.4.3.2 Tipos de tratamiento de lixiviados

Generalmente, los lixiviados originados en los vertederos no son procesados por ningún tipo de tratamiento, llegando así a alcanzar masas de agua como ríos, lagos o mantos freáticos. Actualmente, los vertederos son diseñados como depósitos que aíslan los residuos acumulados en ellos del terreno sobre el que se sitúan, mediante capas de drenaje y capas aislantes, para evitar la filtración de las escorrentías generadas en el mismo (Martinez et al, 2014).

Uno de los métodos que se han utilizado para reutilizar las aguas residuales crudas sin tratar, son en sistemas agroindustriales para el riego de cultivos, esto debido a los problemas de déficit hídricos que se han estado suscitando, sin embargo, esto representa otra problemática, debido al alto contenido de agentes patógenos que conlleva, siendo perjudicial tanto como para la salud del cultivo, como para la del ser humano (Cisneros, 2018).

En los países desarrollados suelen utilizar para ello tecnologías de tratamiento como la Ósmosis Inversa, Ósmosis Directa, Procesos Avanzados de Oxidación, Filtración por Membranas, Ultrafiltración, Nano filtración, Lodos Activados, entre otros (Costa et al, 2018). No obstante, el costo de instalación y operación efectiva es demasiado elevado, por lo tanto, en países en vías de desarrollo como es el caso de México se construyen vías de captación para el lixiviado resultante y se procede a la recirculación para la descomposición de los residuos en donde la única reducción de lixiviados es la evaporación por horas en el sol.

2.5 Humedales naturales

De acuerdo con la definición mundialmente aceptada de la convención Ramsar (CONANP, 2021) define a los humedales como “ecosistemas tanto naturales como artificiales que se caracterizan por estar permanente o temporalmente inundados, ya sea por aguas dulces o salinas, las cuales pueden estar estancadas o corrientes e incluyen las regiones ribereñas, costeras y marinas que no excedan los 6 metros de profundidad con respecto al nivel medio de las mareas bajas”.

2.6 Humedales construidos (HC)

También conocidos como humedales de tratamiento o artificiales son sistemas de tratamiento de aguas residuales, diseñados específicamente para separar los contaminantes del agua residual y llevar a cabo el manejo y disposición de residuos de forma apropiada. Algunos autores básicamente los definen como una celda de poca profundidad rellena de algún tipo de material (medio filtrante), generalmente arena o grava, la cual es plantada con vegetación resistente a condiciones de saturación. Las aguas residuales se introducen en la celda y fluyen sobre la superficie o a través del medio filtrante y son vertidas fuera de ésta a través de una estructura que controla la profundidad de dichas aguas en el interior del humedal (ONU-HABITHAT, 2008).

Los objetivos de los HC son las de funciones de tratamiento básicas y avanzadas de aguas residuales, en combinación con mejoras del hábitat de la vida silvestre.

2.6.1 Tipos de Humedales Construidos (HC)

Los humedales pueden clasificarse en humedales superficiales y subsuperficiales, los últimos a su vez se clasifican de acuerdo a la dirección del flujo, en humedales de flujo vertical, y humedales de flujo horizontal (figura 2).

De acuerdo a diferentes estudios, los humedales construidos de flujo vertical han demostrado tener mayor eficiencia en procesos aerobios, debido a la mezcla de oxígeno con el agua; en el caso de los humedales construidos de flujo horizontal, suelen tener prominencia con los procesos anaerobios, por lo tanto, para optimizar los resultados, se suelen combinar los sistemas dando lugar a los llamados “humedales híbridos” (Quezada de la Cruz, 2016).

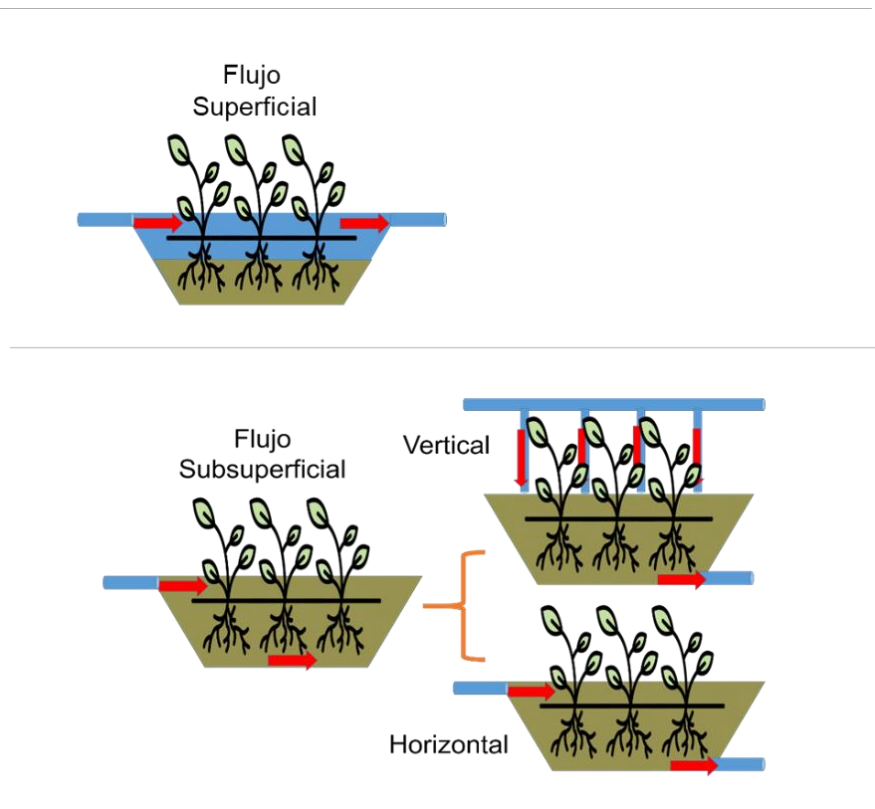


Figura 2. Clasificación de los Humedales Construidos (HC)
Fuente: Autoría propia.

2.6.1.1 Humedales Construidos de Flujo Superficial (HC-FS)

Los HC-FS o también llamados de flujo libre, imitan los sistemas de lagunas donde el agua fluye libremente y se encuentra expuesta a la atmósfera, las profundidades están en un rango de 30 a 60 cm y consta de plantas emergentes. Las zonas pantanosas o praderas inundadas son humedales de este tipo, en los que se observó una mejora en la calidad del agua y por lo tanto el ser humano se dio a la tarea de imitar el sistema.

Estos humedales están conformados por uno o más canales de poca profundidad con un recubrimiento en el fondo para evitar la percolación del agua, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación (Fonseca, 2010). Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales remueven la materia orgánica, oxidando el amonio, reduciendo nitratos y removiendo el fósforo. Los mecanismos son complejos, involucran varios procesos como la oxidación por medio de bacterias, filtración, sedimentación, precipitación química, acción de las plantas, absorción y volatilización. Su eficiencia llega a remplazar un tratamiento secundario bajo ciertas condiciones.

Presentan la ventaja de una mayor vida útil, debida que la no saturación del sustrato, sin embargo, tienen como desventajas la proliferación de mosquitos, requieren extensiones grandes de terreno y algunos estudios han demostrado baja eliminación de nutrientes (Quezada de la Cruz, 2016).

2.6.1.2 Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (HC-FSS)

En los Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial (HC-FSS) el agua circula a través de un sustrato que a la vez desempeña el papel de medio de soporte y sostiene a las plantas. La vegetación juega un papel importante al aportar oxígeno a los microorganismos a través de su rizosfera al estabilizar e incrementar la conductividad hidráulica del suelo (Fonseca, 2010).

La materia orgánica se descompone por medio de los procesos biológicos que se desarrollan en este medio, el nitrógeno puede ser desnitrificado y el fósforo es fijado en el soporte junto con los metales pesados. A una profundidad que normalmente oscila en el rango de 60 a 80 cm es donde se recoge el agua tratada por medio de tuberías, por último, para mantener las condiciones hidráulicas con flujo laminar, es necesaria una pendiente de mínimo el 2% (Rivera, 2022).

Los humedales de flujo subsuperficial son los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales, pues es más efectiva la remoción de contaminantes al circular el agua a través del soporte filtrante en lugar de la realizada en la superficie, además, tiene la ventaja de prevención de olores, insectos y no existe el riesgo de contacto de personas con el agua, ya que esta pasa por debajo del medio.

2.6.1.3 Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo Vertical (HC-FSSV)

Se han realizado numerosas pruebas evaluando los distintos tipos de humedales construidos y su desempeño en la remoción de nitrógeno, y uno de los tipos de HC que ha dado como resultado más eficacia son los sistemas de flujo

subsuperficial vertical, y más aún cuando el medio filtrante presenta afinidad con el tipo de contaminante.

En este tipo de humedales, el agua entra de manera vertical a través del sustrato de manera intermitente por medio de un sistema de tuberías, permitiendo una mejor oxigenación y de esa manera permite la depuración de cargas elevadas de contaminantes orgánicos.

El agua de drenaje es recogida en el fondo del humedal por una red de drenaje. Presentan la ventaja de que soportan mayor carga que los horizontales, sin embargo, son más susceptibles a la colmatación. Tienen la ventaja de que nitrifican, es decir, pasan el nitrógeno amoniacal a nitritos y nitratos y en algunos países este paso es requisito obligado en el tratamiento de aguas (Morales K. P., 2018). A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo (Delgadillo, 2010).

2.6.1.4 Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo Horizontal (HC-FSSV)

De igual manera en este caso, el agua se infiltra por un medio granular que es el sustrato, de esta manera va pasando por las raíces de la vegetación implantada, al ser de flujo horizontal, fluye de un extremo a otro y es recogida por un tubo de drenaje que está ubicado en la parte opuesta inferior, favoreciendo las condiciones anaerobias, al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que

existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño (Delgadillo, 2010).

2.7 Componentes de los Humedales Construidos (HC)

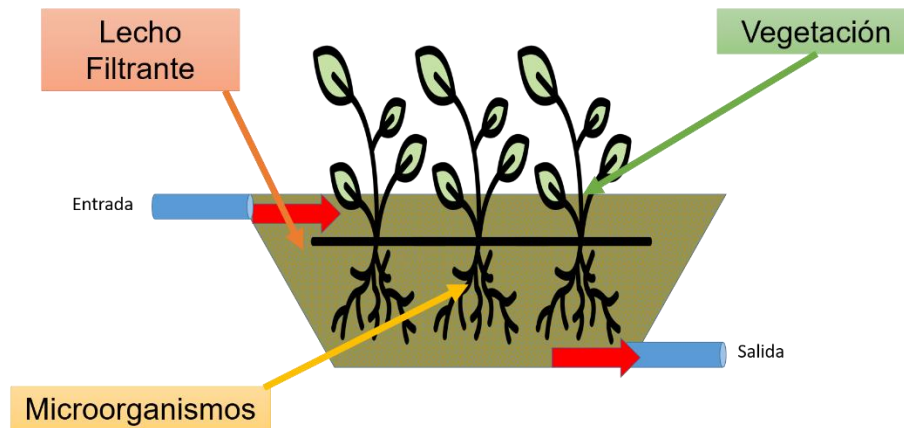


Figura 3. Componentes principales de los Humedales Construidos (HC).
Fuente: Autoría propia.

2.7.1 Medio filtrante

El medio filtrante desempeña es el soporte para la vegetación y los microorganismos responsables de los diferentes procesos biológicos que ocurren en el interior de los HC. La granulometría del medio filtrante cumple con la función dependiendo de los requerimientos, una porosidad amplia permite un mayor flujo hidráulico, sin embargo, un tamaño granular menor como las arcillas y limos permite una mejor adsorción y filtración (Delgadillo et al, 2010). Algunos de los medios filtrantes más comunes y eficientes son: arena, grava, arcilla, zeolita, vermiculita, dolomita, calcita, compost, carbón, activado, por mencionar algunos. Diversos estudios proporcionan información de medios filtrantes para optimizar la eliminación

de materia orgánica, nitrógeno, etc., por lo tanto, éste debe ser elegido según los requerimientos.

2.7.2 Microorganismos

Los microorganismos también representan un componente fundamental pues el rol que desempeñan es el de llevar a cabo los procesos biológicos. La depuración en este tipo de sistemas se debe por lo regular a la presencia de poblaciones microbianas adheridas a la superficie de las plantas y al medio de soporte. Ellos captan y almacenan nutrientes a corto plazo, así como también algunos contaminantes. Los microorganismos de los HC remueven compuestos orgánicos a través de la degradación de la materia orgánica. El metabolismo microbiano produce también la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio en HC, en otras palabras, se encargan de la degradación de los compuestos nitrogenados dejando los nutrientes que la vegetación necesita para desarrollarse.

Existen microorganismos aerobios (que viven en presencia de oxígeno) y anaerobios (que viven en ausencia de oxígeno). Los microorganismos aerobios se desarrollan en el medio filtrante donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el proveniente de la atmósfera. En el resto del medio filtrante predominan los microorganismos anaerobios. Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los HC son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios.

2.7.3 Vegetación

Las plantas son una pieza clave en los humedales. Desempeñan varias funciones y una de ellas es que tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de tallos y hojas hasta donde se encuentran las raíces, el cual en el humedal es el sustrato en donde habitan los microorganismos aerobios que producen las reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Delgadillo et al, 2010). Las contribuciones de las plantas al humedal son las siguientes:

- Incorporan a los tejidos de la planta el carbono, los nutrientes y elementos traza.
- La raíz proporciona lugar para fijación de microorganismos.
- Estabiliza el sustrato y da lugar a velocidades bajas.
- Transfiere gases entre los sedimentos y la atmósfera.
- Proveer condiciones para el desarrollo de la vida silvestre.
- Mejoran la estética del paisaje.

Existe una variedad de plantas que habitan en este tipo de ecosistemas. Se deberá de optar según los distintos factores como son: climáticos, de profundidad, eficiencia, tipo de humedal, características del agua y objetivos. Diversos autores recomiendan utilizar especies nativas de los humedales de la región o una de las más utilizadas y adaptadas.

2.7.3.2 Plantas ornamentales en Humedales Construidos

Se recomienda la utilización de plantas ornamentales en los HC, pues además de aportar soporte a la estructura, proporcionan también un realce estético

y beneficios económicos que se pueden obtener por la comercialización de flores, De esta manera se permite recuperar parte del dinero invertido en el sistema (Morales et al., 2013).

Especies	Tipo de HC	Tipo de efluente	Profundidad (cm)	Fuente
<i>Canna hybrids</i>	Subsuperficial	Aguas residuales domésticas y ganaderas	60-100	(Mateo et al., 2019)
<i>Heliconia Psittacorum</i>	Subsuperficial	Aguas residuales domésticas	30-75	(Paredes, 2014)
<i>Typha Latifolia</i>	Superficial	Aguas residuales domésticas y ganaderas	20-100	(Alvarez & Becares, 2018)
<i>Scirpus</i>	Superficial y subsuperficial	Aguas residuales domésticas	5-5000	(Fonseca, 2010)
<i>Phragmites</i>	Superficial	Aguas residuales domésticas	40-100	(Morales et al., 2013)

Tabla 1 Especies de vegetación más comunes en humedales construidos.
Fuente: Elaboración propia

2.8 Materia orgánica

La materia orgánica se compone por aquella materia capaz de ser biodegradada por los seres vivos o descompuesta a sus formas más simples por agentes químicos. La materia orgánica en el agua está compuesta por miles de

componentes: partículas macroscópicas, coloides o macromoléculas disueltas, dicha materia puede estar dividida en particulada y disuelta.

En los HC la eliminación de la materia orgánica particulada, se lleva a cabo por filtración. Mientras que, la materia orgánica disuelta, es degradada por vías aeróbicas y anaeróbicas. La degradación aeróbica es llevada a cabo por bacterias heterótrofas aeróbicas y se produce cerca de las raíces de las plantas, debido a la disponibilidad de oxígeno allí existente (Delgadillo et al, 2010).

Existen diversas maneras de caracterizar la MO en las AS, dependiendo de la población que la genera y el uso que tendrán las aguas. Las más comunes son Carbono Orgánico Total (COT), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅), Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Luna & Aburto, 2014;Orduña, 2018).

2.9 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO permite medir en un cuerpo de agua el oxígeno consumido como resultado de la acción bacteriana (Robinson, 2016). Es un indicador de la MO presente en el agua, pues la prueba se realiza oxidando la materia orgánica presente, con Dicromato de Potasio, por lo que es equivalente a la MO y se expresa en miligramos/Litro, es decir, entre más elevado sea el DQO, más contaminada está el agua (NMX-AA-030, 2011).

DQO (mg/L)	Calidad
<10	Excelente No contaminada.
10<DQO<20	Buena Calidad

	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
20<DQO<40	Aceptable Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
<40 DQO <200	Contaminada Aguas superficiales con descargas de aguas residuales, crudas, principalmente de origen municipal.
DQO >200	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 2 Escala de clasificación de calidad del agua según DQO
Fuente: (CONAGUA, 2010)

2.10 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

El oxígeno disuelto (OD) es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. Su presencia es necesaria para la existencia de la vida acuática y la calidad estética de los ríos y lagos, mientras que su ausencia crea condiciones sépticas y de mal sabor y olor propios de la putrefacción que afectan los ecosistemas e impiden el uso de los recursos hídricos sin tratamiento previo. Las descargas de materia orgánica domésticas e industriales en los cuerpos de agua reducen, por la acción microbiana, la concentración del oxígeno disuelto (SEMARNAT, 2005).

La DBO Es la cantidad de oxígeno consumido (durante x días en oscuridad y a una temperatura de 20 °C), para oxidar la materia orgánica presente en el agua por medio de procesos aerobios (biodegradación). La DBO₅ de la muestra es la diferencia entre la concentración de oxígeno disuelto al inicio de la prueba y la concentración una vez finalizada la misma, dividido entre el volumen de muestra

usada, se expresa en miligramos/Litro (Delgadillo et al, 2010). El procedimiento más utilizado es a 5 días (DBO₅) y sirve también para medir la eficiencia de degradación de materia orgánica.

DBO (mg/L)	Calidad
<3	Excelente No contaminada.
3 < DBO < 6	Buena Calidad Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
6 < DBO < 30	Aceptable Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
<30 DBO < 120	Contaminada Aguas superficiales con descargas de aguas residuales, crudas, principalmente de origen municipal.
DBO > 120	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 3. Escala de clasificación de calidad del agua DBO₅
Fuente: (CONAGUA, 2010)

2.11 Nitrificación y desnitrificación

Los procesos biológicos de remoción en HC son quizá los más importantes para la remoción de contaminantes. Algunos de los contaminantes son nutrientes para las plantas, como los iones de nitrato, amonio y fosfato, los cuales son absorbidos por la vegetación.

La nitrificación y la desnitrificación son procesos biológicos que forman parte del llamado ciclo del nitrógeno, que consta de varias etapas. El proceso se inicia cuando la descomposición de la materia orgánica hace que elementos complejos como los aminoácidos y las proteínas se degraden a partir de la acción de hongos y bacterias.

La eliminación del nitrógeno en los HC inicia con la transformación del nitrógeno orgánico (N_{org}) a nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$) por amonificación. El $N-NH_4^+$ puede ser asimilado por las raíces de las plantas o los microorganismos, volatilizarse si el sistema presenta un pH superior a 9 o bien oxidarse a nitrato (NO_3^-) por acción de las bacterias amonio-oxidantes y nitrito-oxidantes (nitrificación). El último paso es la reducción del NO_3^- a nitrógeno molecular (N_2) bajo condiciones anóxicas/anaerobias (desnitrificación). Las transformaciones que sufra el nitrógeno en los humedales dependen de su estructura, es decir, si son de flujo horizontal o vertical (Torres-Bojorges et al., 2017; Alarcon et al, 2018).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama se muestra la metodología seguida durante el desarrollo de este proyecto.

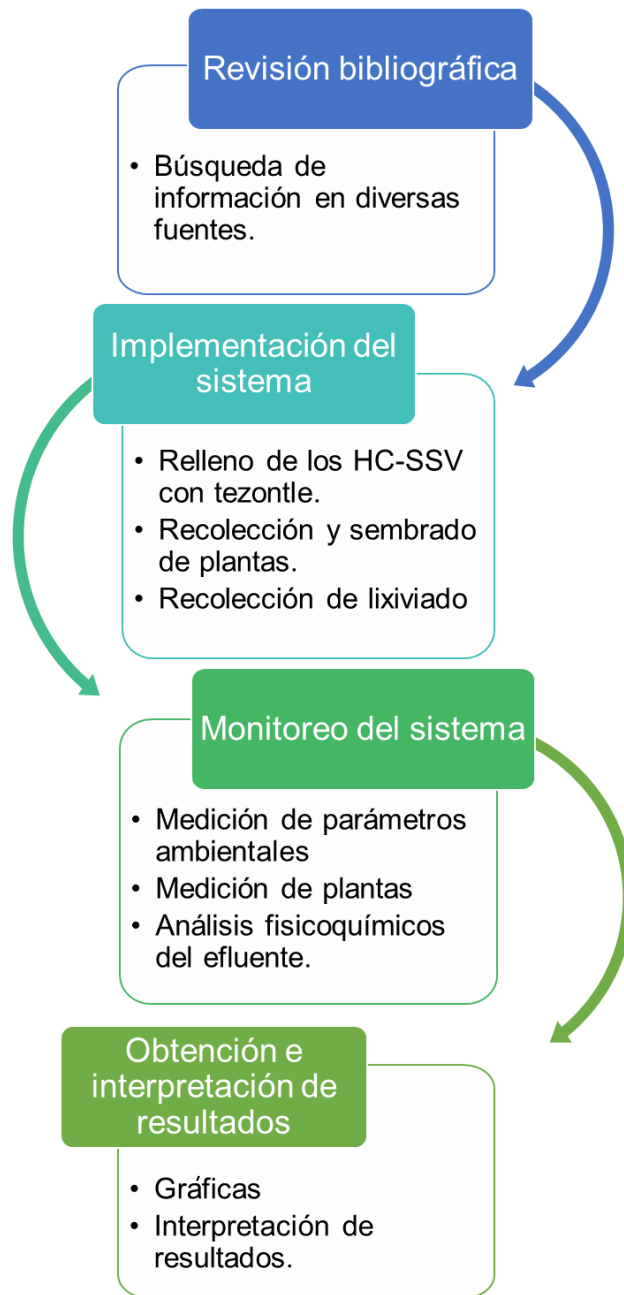


Figura 4. Diagrama de la metodología experimental
Fuente: Elaboración propia

3.1 Revisión bibliográfica.

Se realizó una revisión de la bibliografía en materia de tratamiento de diferentes aguas residuales mediante humedales construidos, incluyendo lixiviados. La búsqueda se realizó en libros, tesis de licenciatura y posgrado, fuentes de internet y revistas científicas de alto impacto, esto con la finalidad de realizar una base de datos que permita la extracción de datos sobre tratamiento de lixiviados en regiones de clima tropical como en Misantla, Veracruz.

3.2 Implementación del sistema de humedales

3.2.1 Área de estudio

La experimentación tuvo una duración de ocho meses y se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, en el estado de Veracruz, México.

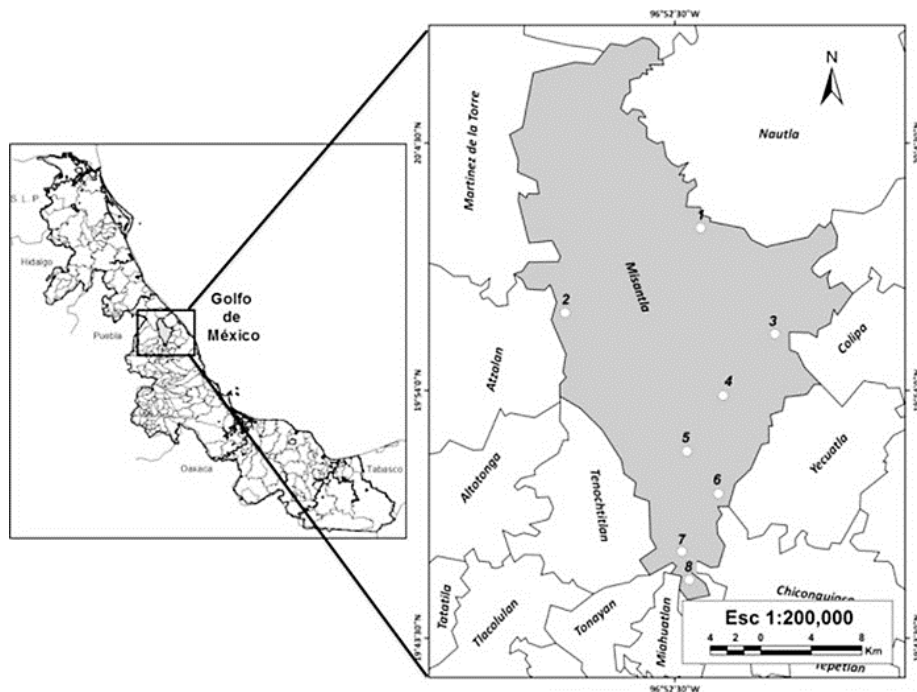


Figura 5. Ubicación geográfica de Misantla, Veracruz.
Fuente: Rodríguez-Macedo et al. (2013)

El vertedero de la ciudad de Misantla, Veracruz, no cuenta con la infraestructura adecuada para la gestión de sus RSU y para el tratamiento de los lixiviados que se generan por la descomposición de los mismos.

Misantla se encuentra ubicada en la región montañosa de la zona centro del estado, sus coordenadas son 19°55'51.86"N 96°51'6.09"O y está considerada una zona de clima tropical.

3.2.2 Descripción del sistema

El sistema a escala piloto constó de seis Humedales Construidos de Flujo Vertical (HC-FSSV) construidos con mampostería de forma cilíndrica con capacidad volumétrica de 125 L. Todo el sistema fue cubierto con una malla de sombra al 50%.

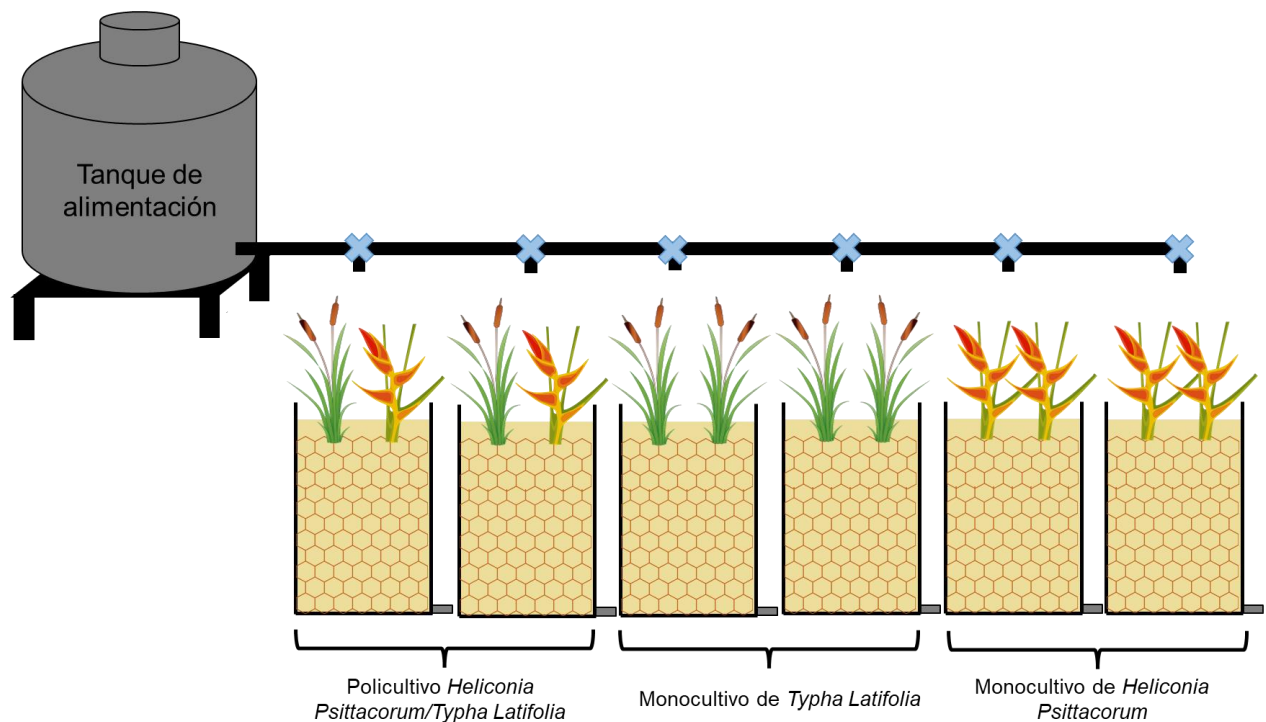


Figura 6. Sistema de Humedales Construidos de Flujo Vertical (HC-FSSV) para el tratamiento de lixiviados de vertedero.

Fuente: Elaboración propia

Las especies de plantas que se utilizaron fueron *Heliconia Psittacorum* y *Typha Latifolia*, las cuales son típicas de la región, ambas fueron recolectadas en su entorno natural y se podaron todas con un tamaño uniforme de 15 cm de altura. El sembrado se realizó de la siguiente manera (figura 6), dos HC-FSSV con monocultivo de *Heliconia Psittacorum*, dos con monocultivo de *Typha Latifolia* y dos con policultivo de *Heliconia Psittacorum* y *Typha Latifolia*.



Figura 7. *Typha Latifolia*

Fuente: Desconocida



Figura 8. *Heliconia Psittacorum*

Fuente: Desconocida

El medio filtrante que se empleó para rellenar los HC-FSSV fue el tezontle (figura 9) debido a sus buenas características fisicoquímicas, disponibilidad en esta región, y costos accesibles. Los humedales se llenaron con una capa de 10 cm de tezontle grueso en la salida para evitar obstrucciones, y los 80 cm restantes con tezontle fino.



Figura 9. Tezontle o roca volcánica roja.
Fuente: Desconocida

3.2.3 Alimentación del sistema

Las plantas tuvieron un periodo de aclimatación antes de que el sistema se alimentara con lixiviados. Durante 15 días se alimentó con mezcla de agua de pozo y agua residual, a partir del día 16 se alimentó solo con agua residual y al día 46 se comenzó a alimentar con mezcla de agua residual doméstica y lixiviados de vertedero.

Los lixiviados utilizados para este experimento fueron tomados del vertedero a cielo abierto del municipio de Misantla (figura 10), con una bomba de agua, luego fueron transportados al lugar del experimento y almacenados en un tanque de almacenamiento de 1100 litros adaptado como sedimentador, mismo que alimenta el sistema. La alimentación fue de forma intermitente con una carga de 4 litros cada 2 has.



Figura 10. Vertedero a cielo abierto en el municipio de Misantla, Veracruz.
Fuente: Elaboración propia.

3.3 Monitoreo del sistema

3.3.1 Parámetros ambientales

Se midieron los siguientes parámetros ambientales dos veces por día, en horario matutino (entre 7:00 y 8:00 am) y en horario vespertino (entre 5:00 y 6:00 pm); Temperatura ambiente, Intensidad de luz, y precipitación. Para medir la intensidad de luz se utilizó un luxómetro marca Smart Sensor modelo AS803, la temperatura ambiente y la precipitación fueron obtenidas de la estación meteorológica modelo wh65B.

3.3.2 Desarrollo de la vegetación

Para conocer el desarrollo de ambas especies, se establecieron los siguientes parámetros de medida en cada planta: número de brotes, número de hojas, número de flores, largo y ancho de las hojas, grosor del tallo y altura de planta. Estos parámetros fueron medidos cada 30 días, con cinta métrica y vernier.

3.3.3 Análisis fisicoquímicos.

Se realizaron análisis fisicoquímicos semanalmente para determinar la eliminación de los contaminantes principales contenidos en el lixiviado; Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) Nitrógeno total (NT), Nitrógeno Amoniacal (NH_4). Para la toma de muestras se tomaron 500 ml a la entrada del sistema y 500 ml a la salida de cada HC-FV, posteriormente se transportaron a una temperatura de 4°C para analizarlos.

Los análisis se realizaron en el laboratorio de humedales del Instituto Tecnológico Superior de Misantla. El equipo utilizado para realizar determinar los parámetros anteriores fue un Espectrofotómetro HI801 Iris marca Hanna Instruments (figura 11).



Figura 11. Espectrofotómetro Hanna Instruments HI801 iris.
Fuente: Manual de usuario Hanna Instruments

Para la medición de DQO se utilizó un sensor digital LBOD101 marca Hach (figura 12), que a su vez también sirvió para monitorear los parámetros de la caracterización inicial; pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.



Figura 12. Medidor inteligente Hach LBOD101

Fuente: Manual de usuario Hach

3.4 Obtención e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos de los parámetros evaluados (datos ambientales, datos de la vegetación y datos de los análisis físico químicos) fueron almacenados en una base de datos, posteriormente se realizó una prueba de ANNOVA y las gráficas correspondientes para analizar las diferencias entre los tres tratamientos; monocultivo de *Heliconia Psittacorum*, dos con monocultivo de *Typha Latifolia* y dos con policultivo de *Heliconia Psittacorum* y *Typha Latifolia*.

CAPITULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos durante los ocho meses de experimentación, posteriores a la revisión bibliográfica y la implementación del sistema.

4.1 Análisis inicial de los lixiviados

Previo a la experimentación se realizó una caracterización del lixiviado diluido con el que se alimentó el sistema de humedales, esto con la finalidad de tener un parámetro inicial antes de medir la remoción de los contaminantes mediante los análisis fisicoquímicos programados semanalmente y poder analizar como influyen el pH, TDS, T y CE. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.

Parámetros iniciales	Resultados
Potencial de Hidrógeno (pH)	8.15
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	1836.33 ppm
Conductividad Eléctrica (CE)	3665.66 μ S/cm
Temperatura (T)	22.3 °C
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1510 mg O ₂ /L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	810 mg O ₂ /L
Nitrógeno Total (NT)	7.55 mg N/L
Amonio (NH ₃)	0.71 mg NH ₃ /L

Tabla 4. Caracterización inicial de los lixiviados de vertedero diluidos con agua residual doméstica

Fuente: Elaboración propia

Uno de los parámetros de monitoreo más importantes es el pH ya que éste ya sea ácido o alcalino influye en varios de los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el interior de los humedales. En la tabla 4 se observa que el pH se encuentra en un rango entre 6.5 a 8.5, los cuales ciertamente son adecuados para el proceso de amonificación. Esto en respuesta al aumento de alcalinidad por los procesos de eliminación de Nitrógeno (Casierra, Charris, Caselles, & Parody, 2017) presentes en los HC-FSSV.

Con respecto a la temperatura del agua en los HC, esta influye en el OD que a su vez está relacionado con los procesos de nitrificación y desnitrificación, así como la oxigenación para las raíces de las plantas y los microorganismos que viven en ellas. Para un mejor desarrollo de las funciones bioquímicas en HC las temperaturas óptimas oscilan entre 16 y 35°C (Akratos & Tsihrintzis, 2007). La temperatura se mantuvo óptima durante todo el proceso experimental en un rango de 17°C la mínima y 35°C la máxima.

Los contaminantes más comunes contenidos en los lixiviados que están reportados en bibliografía según diferentes autores son materia orgánica y compuestos nitrogenados entre ellos el amonio. Por lo que se determinaron los parámetros anteriores como DQO, DBO, NT y NH₃ (Teng et al., 2021; Chávez, 2011; Bakhshoodeh et al., 2020; Mosquera y Lara, 2012).

La DBO y DQO son unos de los parámetros más importantes en la caracterización ya que ambas miden el grado de contaminación de las aguas residuales, en este caso de los lixiviados que ingresan al sistema de los HC-FV, esto mediante la medición de oxígeno contenido en la materia orgánica.

Como se puede apreciar el lixiviado inicial muestra un alto grado de contaminación por su elevada DQO, esto de acuerdo a la CONAGUA que clasifica una DQO>200 mg/L como fuertemente contaminada. Lo mismo sucede con los resultados de la DBO iniciales ya que cuando se encuentra en un rango de 500 a 3000 mg/L indica también un alto grado de contaminación.

En cuanto al Nitrógeno Total también se obtuvo un valor elevado, lo cual es común en este tipo de agua residual, según lo reportado en estudios previos.

4.2 Desarrollo y supervivencia de la vegetación

La especie *Typha Latifolia* la cual es típica en zonas de humedales naturales y *Heliconia Psittacorum* que es una planta ornamental típica de la región de Misantla Veracruz, mostraron un excelente desarrollo en el medio acuoso contaminando tanto en el periodo de adaptación como en el de experimentación.

4.2.1 Vegetación en el periodo de adaptación

Durante los 45 días de aclimatación de las plantas, las plantas alcanzaron una altura promedio de 48 cm, sin embargo, la *Typha Latifolia* fue la que mostró un mayor crecimiento alcanzando una altura máxima de 53 cm. Por otro lado, de la altura máxima en la *Heliconia Psittacorum* fue de 51 cm.

Se observó también en ambas especies un aumento en el grosor del tallo, fortalecimiento en las raíces, reproducción del número de hojas, una coloración verde en las hojas. No se observaron nuevos brotes, y tampoco hubo floración.

Durante este periodo se logró observar una aceleración de crecimiento cuando se comenzó a alimentar el sistema con agua residual doméstica, lo cual

puede deberse a que este tipo de aguas contiene nutrientes que son absorbidos por las plantas, como es el caso del nitrógeno y el fósforo (Alarcón et al., 2018).

4.2.1 Vegetación en el periodo de experimentación

A partir del día 46, el sistema fue alimentado con lixiviados, en esta etapa se pudo apreciar que algunas plantas cambiaron su coloración en las hojas de un tono verde a amarillo, tres de las plantas murieron, de las cuales dos de ellas eran de la especie *Heliconia Psittacorum* y una *Typha Latifolia*, las tres plantas fueron sustituidas por plantas nuevas.

Después de 30 días de que el sistema fuera alimentado con lixiviados, se observó en todas las plantas un desarrollo favorable, hubo aceleración de crecimiento en ambas especies, el color de las hojas se intensificó en un tono verde fuerte, hubo engrosamiento del tallo, y comenzaron a salir nuevos brotes tanto en los HC-FV con monocultivos como en los policultivos.

Una vez estabilizado el sistema, en el día 126 se observó la primera floración en el monocultivo de *Heliconia Psittacorum*, posteriormente también se observó en los otros humedales con policultivo.

Durante los ocho meses de experimentación la *Typha Latifolia* alcanzó una altura máxima de 1.98 m y la *Heliconia Psittacorum* 1.79. Estos resultados son similares a los reportados por Konnerup et al., 2019 quienes utilizaron también *Heliconia Psittacorum* para tratar aguas residuales domésticas en clima tropical. A pesar de que el crecimiento de la *Heliconia Psittacorum* fue ligeramente menor que la *Typha Latifolia* como se observa en la figura 13, la especie tuvo resistencia a los

lixiviados y pudo desarrollarse vigorosamente, mayormente en los humedales con monocultivo.

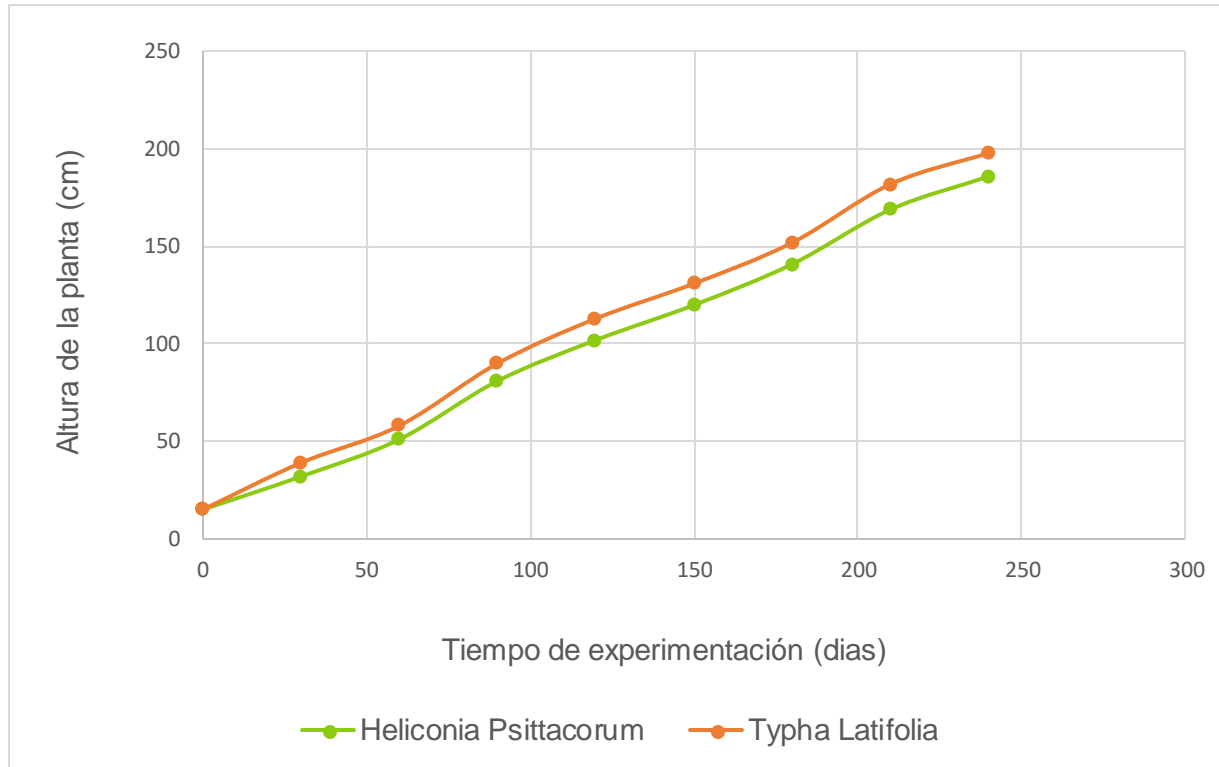


Figura 13. Crecimiento de la planta durante los 8 meses de experimentación

Fuente: Elaboración propia

4.3.1 DQO

En la figura 14 se puede apreciar que en el primer mes de experimentación se ingresó la mayor carga de contaminantes al sistema, los resultados de los análisis de laboratorio indicaron que la DQO fue de $1,566.25 \pm 207.77$ mg O₂/L. Por otro lado, el mes con menor carga de DQO se registra en el mes 7 con $1,138.75 \pm 154.31$ O₂/L. La variación máxima en el efluente se registró en el mes 6.

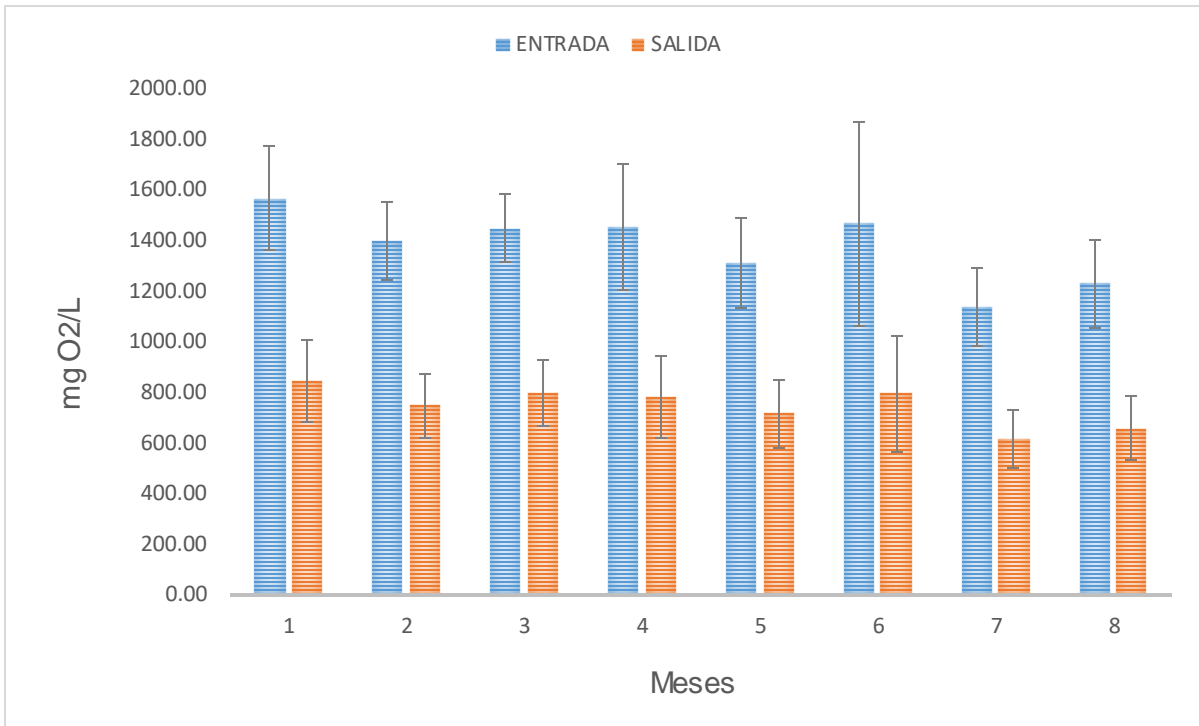


Figura 14. Variación de la DQO durante la experimentación

Fuente: Elaboración propia

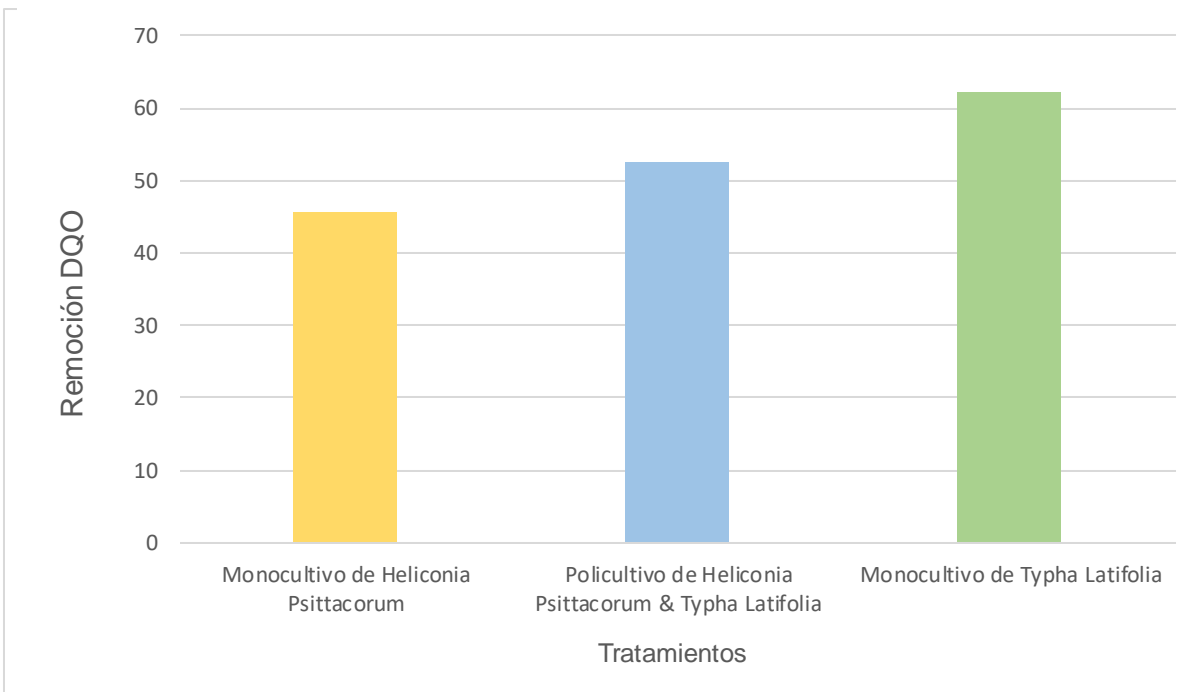


Figura 15. Comparación de la remoción de DQO entre monocultivos y policultivos

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la remoción de materia orgánica, se observa en la figura 15 que de los tres tipos de tratamiento en los HC-FSSV, el monocultivo de *Typha Latifolia* fue el que tuvo mayor remoción de DQO (mayor a 60%), esto puede deberse a que es una planta típica de humedales naturales y zonas pantanosas, además de que fue la planta que tuvo un mayor desarrollo y adaptación. Las menores remociones de DQO se observaron en los monocultivos de *Heliconia Psittacorum*, sin embargo, esta planta ornamental alcanzó a remover más del 40% de DQO que es en promedio lo que otros autores reportan en plantas típicas de humedales.

Estos resultados demuestran la capacidad de ambas especies en mejorar la disminución de materia orgánica presente en los HC, debido a la liberación de exudados y enzimas que estimulan el desarrollo de microorganismo y actividad bioquímica en la zona de la rizófora (Sandoval et al., 2018)

4.3.2 DBO₅

En la figura 16 se observa que el mes uno tuvo una mayor carga de DBO 746.25 ± 57.06 mg O₂/L y en el mes 3 se registra una menor DBO₅ de 573.75 ± 68.65 mg O₂/L La variación máxima en el efluente se registró en el mes 1 con 313.46 ± 57.06 mg O₂/L. En palabras generales se observó una alta eficiencia en la reducción de DBO₅, lo cual se traduce en una alta degradación de materia orgánica, esto en comparación a lo reportado en bibliografía (Martínez, et al 2018). Con respecto a la comparación de remoción entre los monocultivos y policultivos, se observó (figura 17) que los HC-FSSV con monocultivo de *Heliconia Psittacorum* tuvieron un mayor desempeño en la remoción de DBO₅.

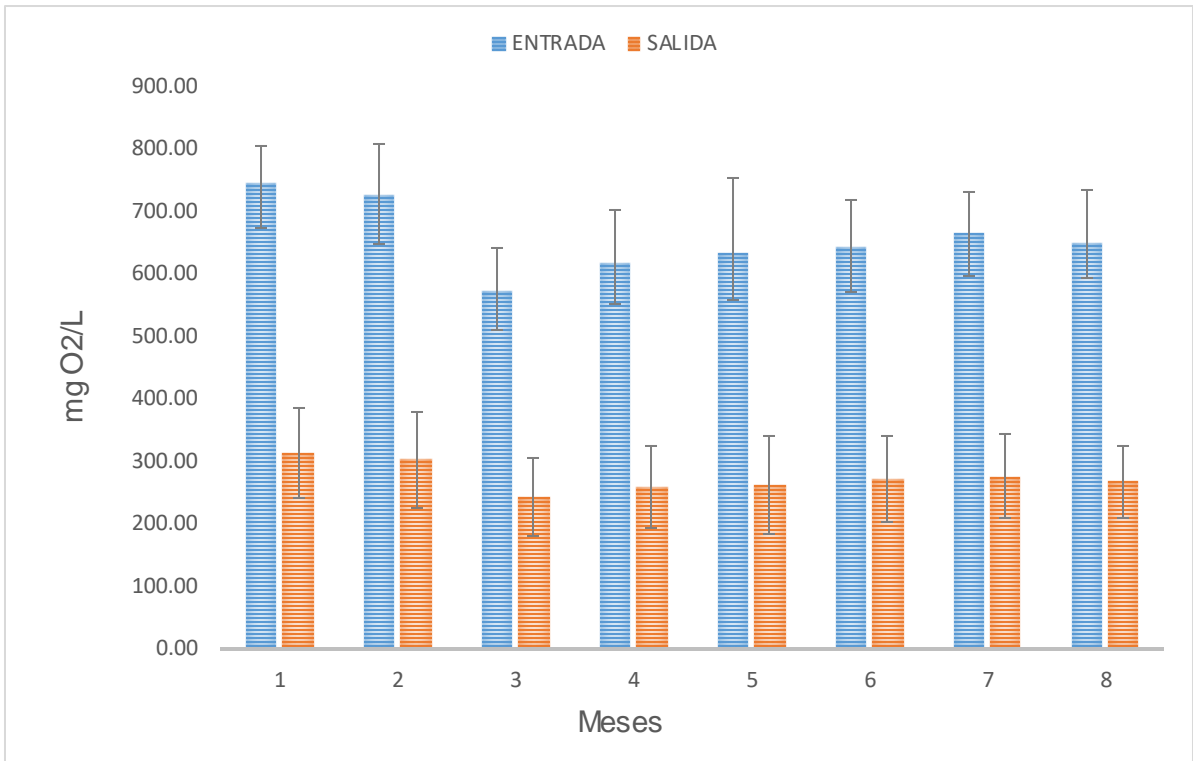


Figura 16. Variación de la DBO₅ durante la experimentación

Fuente: Elaboración propia

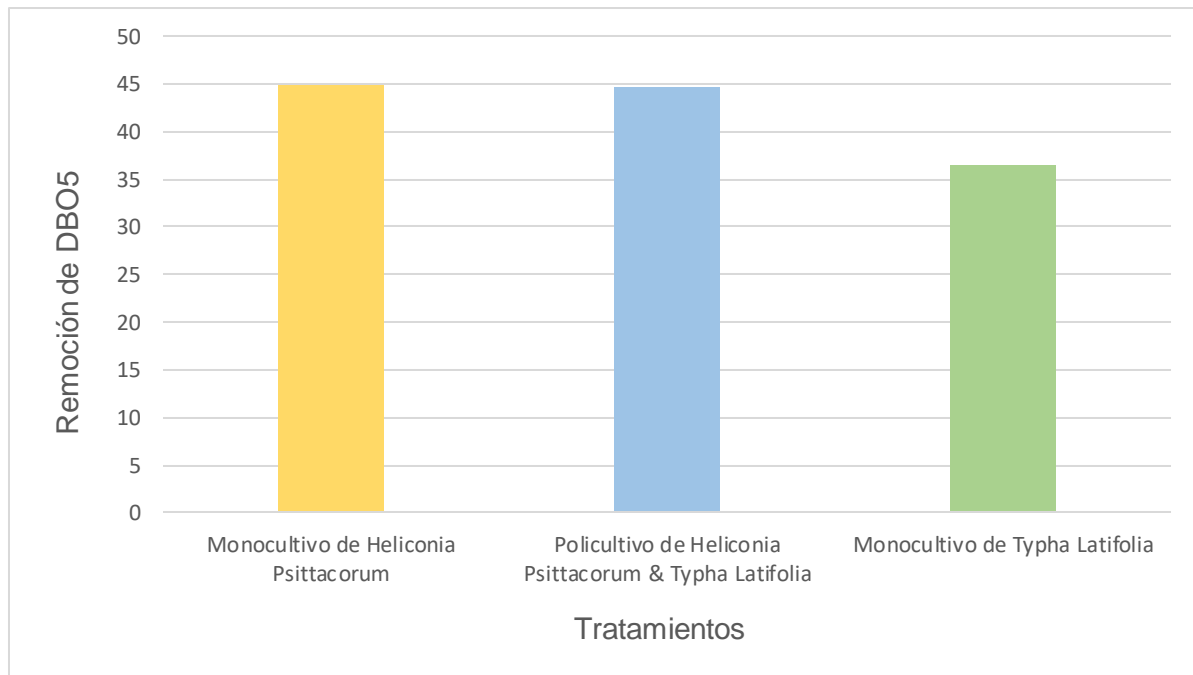


Figura 17. Comparación de la remoción de DBO₅ entre monocultivos y policultivos

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Nitrógeno Total

A diferencia de la DQO y DBO₅ que la mayor carga en el afluente se observó (figura 18) en los primeros meses, la mayor carga de Nitrógeno se observó en el mes 8 con 8.55 ± 1.51 mg/L NTK. En el mes 4 se registró la menor carga de nitrógeno con 6.60 ± 154.31 mg/L NTK. Con respecto al efluente la mayor variación se registró en el mes 4 con 6.60 ± 0.84 mg/L NTK.

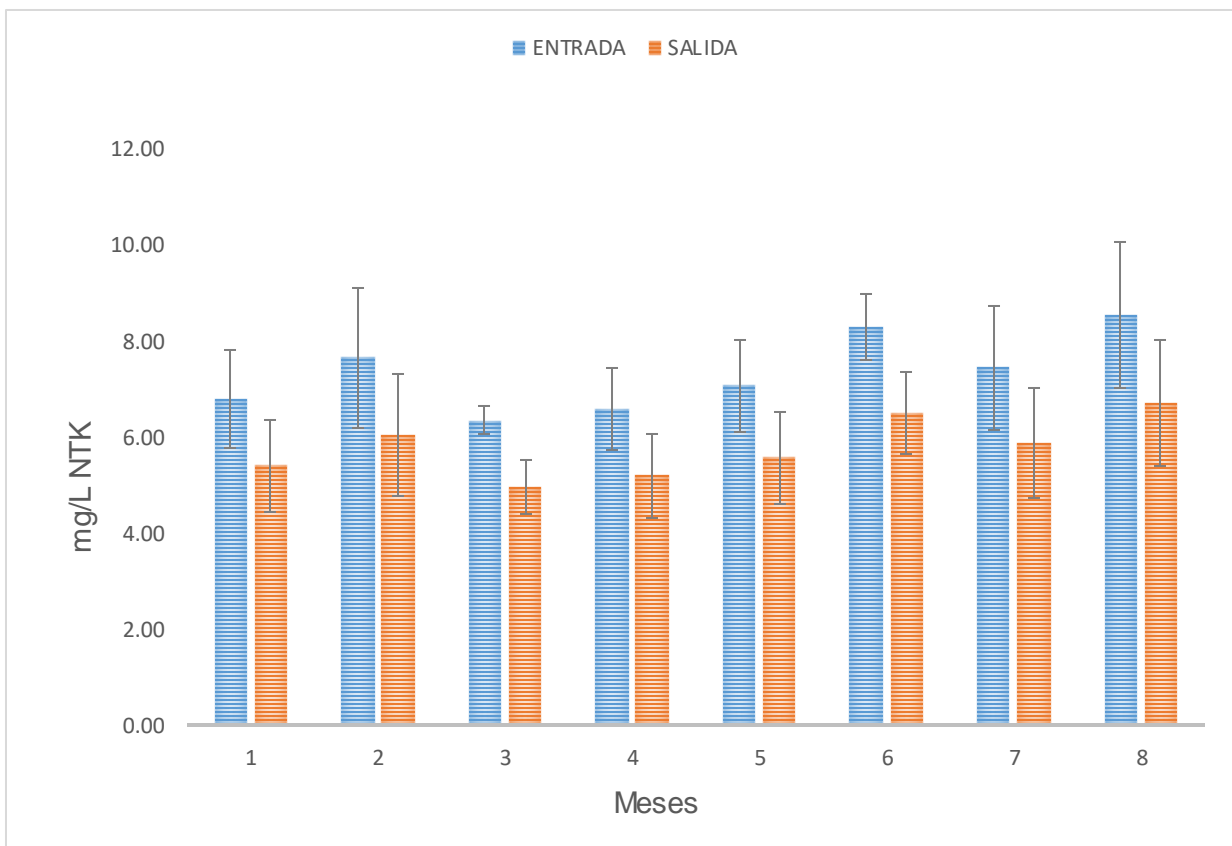


Figura 18. Variación del NT durante la experimentación

Fuente: Elaboración propia

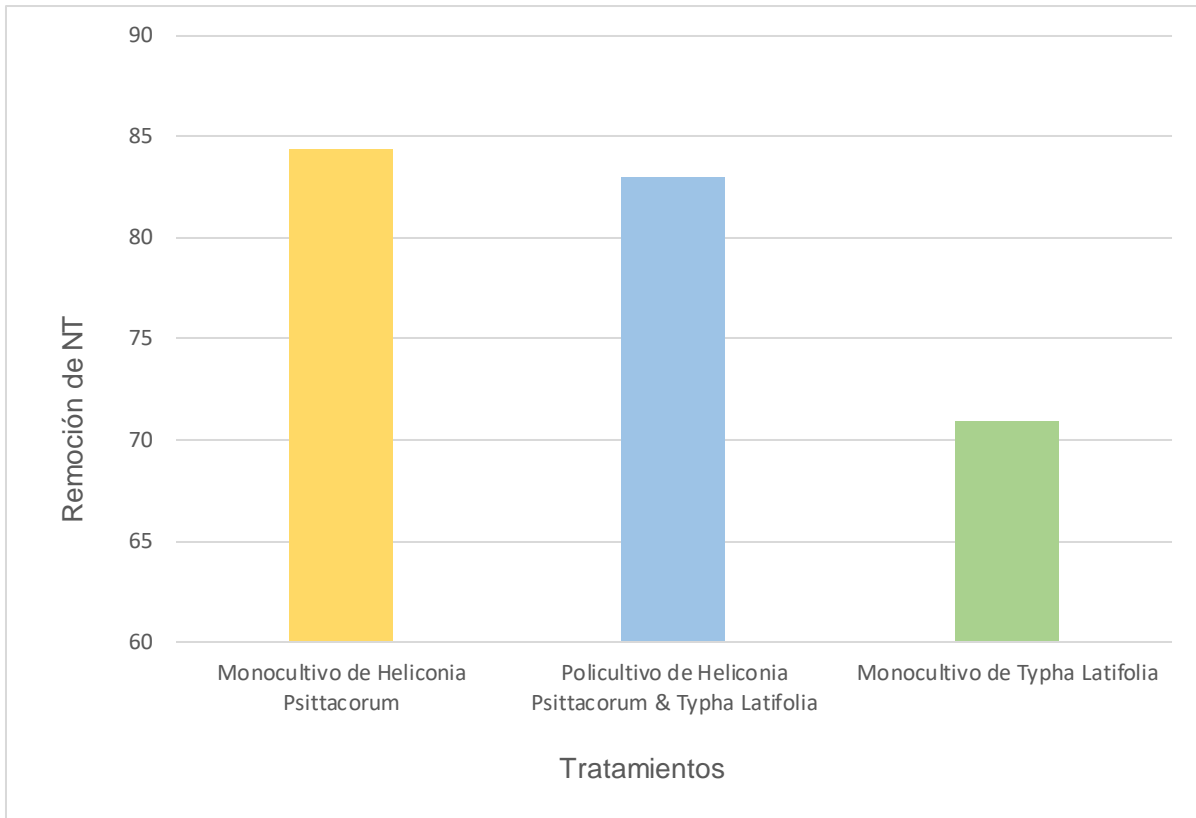


Figura 19. Comparación de la remoción de DBO₅ entre monocultivos y policultivos

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la remociones entre monocultivos y policultivos observable en la figura 19, indicaron que los policultivos de ambas especies (*Typha Latifolia* y *Heliconia Psittacorum*) tuvieron la mayor remoción de nitrógeno total, sin embargo ambas especies tanto en monocultivo como policultivo tuvieron remociones mayores a 70%, lo que podría atribuirse a que al principio de la experimentación el sistema se estuvo alimentando con agua residual doméstica para el periodo de aclimatación de las plantas lo que propicia el crecimiento bacteriano en las raíces de las plantas y medio filtrante, esta mejora es notable a través de la degradación la eliminación de contaminantes, principalmente compuestos nitrogenados. Estos resultados son mayores a los reportados por Saeed & Sun, 2017 quien utilizó también plantas ornamentales.

4.3.4 Amonio

El nitrógeno amoniacal es uno de los componentes transitorios del agua, pues es parte del ciclo del nitrógeno y se ve afectado por la actividad biológica. El nitrógeno amoniacal, se origina de la degradación del nitrógeno orgánico y, este a su vez, por acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos y finalmente a nitratos. (Clair, 1994).

El afluente con mayor carga de amonio se encontró en el mes 3 (figura 20) con 0.4525 ± 0.1338 mg/L NH_3 . Por otro lado, el mes 6 registró la menor carga de amonio con 0.1550 ± 0.1124 mg/L NH_3 . La variación máxima en el efluente se registró en el mes 4 con 0.3233 ± 0.1031 mg/L NH_3 .

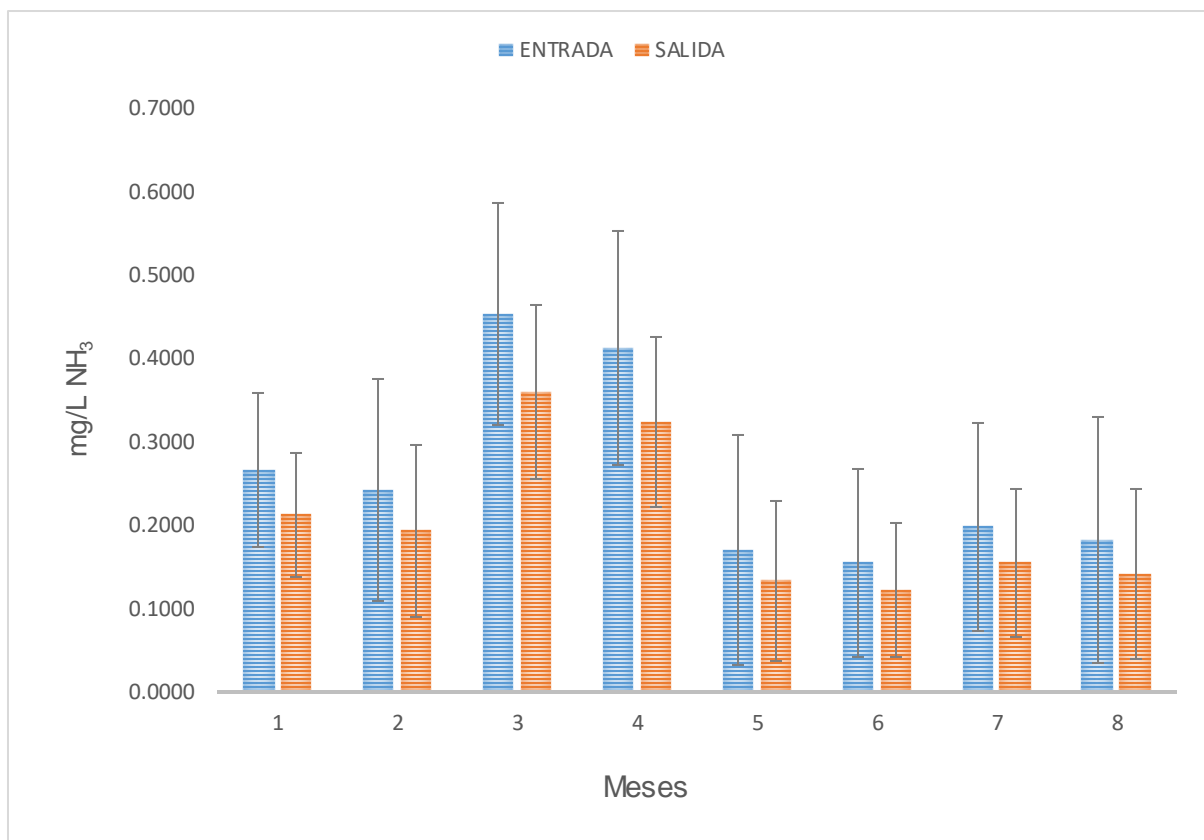


Figura 20. Variación del NH_3 durante la experimentación

Fuente: Elaboración propia

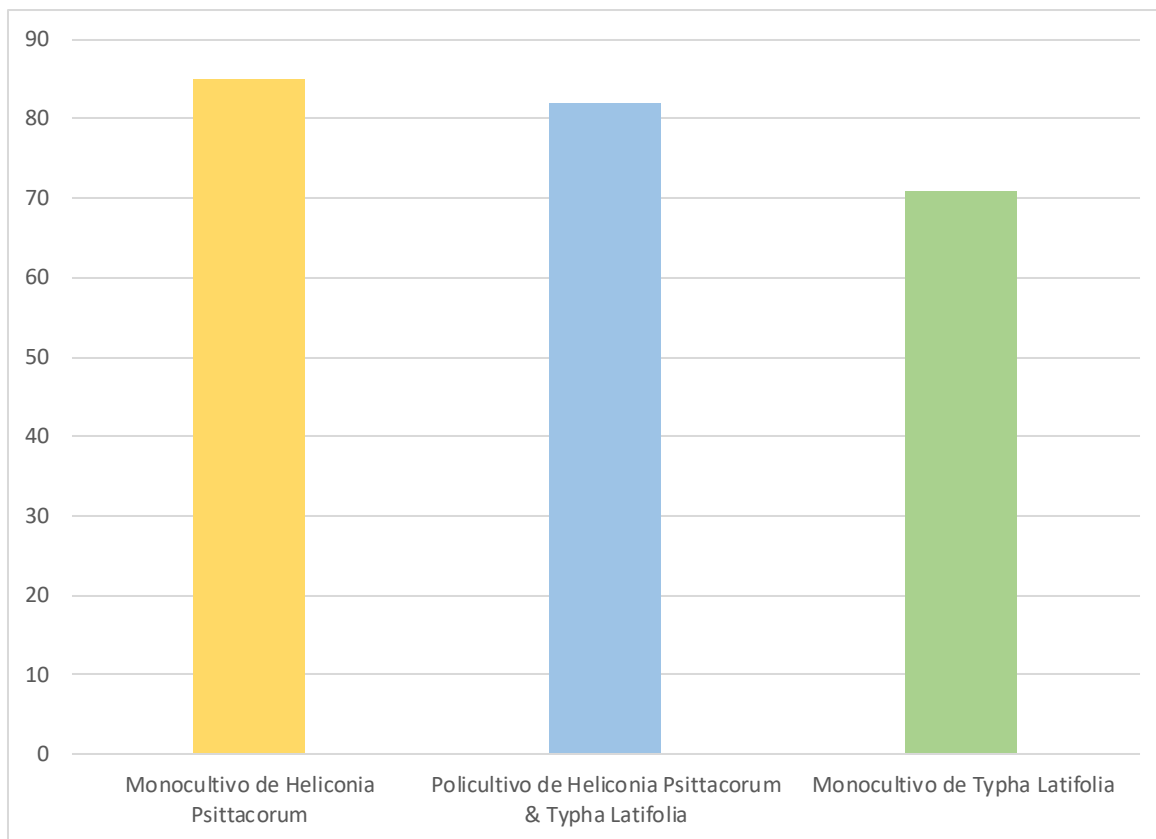


Figura 21. Comparación de la remoción de NH₃ entre monocultivos y policultivos

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento que obtuvo mayores remociones de NH₃, fueron los HC-FSSV con monocultivo de *Heliconia Psittacorum* (figura 21). Estos resultados coinciden con los reportados con Silvestrini et al., 2019 quién trató lixiviados en el mismo tipo de humedales construidos.

Las concentraciones de amonio fueron altas dada la fuente los lixiviados a pesar de que fueron diluidas con agua residual doméstica 1:1. Aun así, el nitrógeno amoniacal se disminuyó significativamente. Ambas especies de plantas se adaptaron sin problema alguno, esto debido a que el amonio puede favorecer el desarrollo de la vegetación (Schwammberger et al., 2019)

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó el uso de Humedales Construidos Subsuperficiales de Flujo Vertical (HC-FSSV), para el tratamiento de lixiviados a través de monocultivos y policultivos de *Typha Latifolia* y *Heliconia Psittacorum*.

De entre las tres configuraciones del sistema (monocultivo de *Heliconia Psittacorum*, monocultivo de *Typha Latifolia* y Policultivo de ambas especies) se encontró que la combinación de los humedales que tenían monocultivo de *Heliconia Psittacorum* alcanzaron los siguientes porcentajes de remoción; DQO (45.59 %), DBO5 (44.92 %), Nitrógeno Total (84.35 %) y finalmente el Amonio (85.08 %). Los policultivos de *Heliconia Psittacorum* con *Typha Latifolia* quedaron de la siguiente manera: DQO (52.50 %), DBO5 (44.58 %), Nitrógeno Total (83.01 %) y Amonio (82.06 %), Y finalmente los humedales con monocultivo de *Typha Latifolia* tuvieron los siguientes resultados de remoción DQO (62.16 %), DBO5 (36.47%), Nitrógeno Total (70.96 %) y Amonio (70.82 %).

En general el sistema obtuvo remociones satisfactorias y mayores a las reportadas en bibliografía, lo que demuestra que los HC-FSSV con las configuraciones empleadas son capaces de eliminar los contaminantes más comunes contenidos en los lixiviados procedentes de vertedero a cielo abierto, por lo que replicar este sistema a escala real resulta una opción prometedora, principalmente en zonas rurales o en zonas que al igual que Misantla Veracruz, que fue el caso de estudio, no cuentan con la infraestructura adecuada de un relleno sanitario para la correcta gestión de residuos y el adecuado tratamiento de lixiviados que se generan diariamente.

Por otro lado, se debe considerar que Misantla, Veracruz es una zona de clima tropical, por lo que la temperatura pudo haber influido ampliamente en el buen funcionamiento del sistema, también debe considerarse que los lixiviados que alimentaron al sistema no fueron crudos en su totalidad, por lo que las investigaciones futuras deben estar encaminadas hacia la evaluación de nuevas especies ornamentales que permitan favorecer y aumentar las condiciones para eliminar contaminantes en lixiviados menos diluidos.

BIBLIOGRAFÍA

Abou, S. I., Hellal, M. S., Aly, O. H., & Abo, S. A. (2019). Decentralized wastewater treatment using passively aerated biological filter. *Environment Technology*, 250-260.

Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 173-191.

Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., Sáez, V., & Gladys, C. (2018). Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina.

Álvarez, J., & Bécares, E. (2005). El papel de la vegetación en humedales contruidos para el tratamiento de aguas residuales. *Instituto de Medio Ambiente (IMA), Universidad de León, Calle de La Serna, 56(24007)*, 24-28.

Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Payday, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, 146.

Borbón, D. S., & de la Torre, J. M. (2020). Huertos urbanos como estrategia de resiliencia urbana en países en desarrollo. *Viviendas y comunidades sustentables*, 81-102.

Brennan, R. B., Clifford, E., Devroedt, C., Morrison, L., & Healy, M. G. (2017). Treatment of landfill leachate in municipal wastewater treatment plants and impacts on effluent ammonium concentrations. *Journal of Environmental Management*, 188, 64-72.

Casierra, H. A., Charris, J. C., Caselles, A., & Parody, A. E. (2017). Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae). *Water, Air & Soil Pollution*.

Clair, N., Perry, L., & McCarty, G. F. (1994). *Química para ingeniería ambiental*. McGraw Hill, Estados Unidos.

CONANP. (2021). *El abc de los humedales*. SEMARNAT.

Costa, A. M., Alfaia, R. G., & Campos, J. C. (2018). Landfill Leachate treatment in Brazil - An overview. *Journal of Environmental Management*, 110-116.

Delgadillo, O., Camacho, A., F. Perez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.

DOF. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. CDMX: SEMARNAT.

Fernández, E. S., Garrido, J. M., Coda, F. E., Pujol, R. O., & Coma, S. C. (2008). Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias. *Técnica industrial*, 44-49.

Fonseca, C. M. (2010). Diseño de Humedal Construido para tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí.

Galina, R., Mezquita, I., & Chávez, V. (2019). Repositorio Veracruz. SEMARNAT. <http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2020/03/TiraderoVSRellenoSanitarioP.pdf>

Gutierrez, L. (2014). Rellenos Sanitarios. Costa Rica: Grupo de Estudios en Ingeniería Ambiental.

Cisneros Estrada, X. (2018). Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura.

INEGI. (2020). habitantes por municipio. Misantla: cuéntame INEGI.

Konnerup, D., Koottatep, T., & Brix, H. (2009). Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological engineering*, 35(2), 248-257.

LGEEPA. (2022). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación.

LGPGIR. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. CDMX: DOF.

Lorenzo , E. V., Ocaña, J. G., Fernández, L. A., & Venta , M. B. (2009). Reúso de aguas residuales para riego agrícola. CENIC. Ciencias Biológicas, 40, 35-44.

Luna, V. M., & Aburto, S. (2014). Sistema de Humedales Artificiales para el Control de la Eutroficación del Lago del Bosque de San Juan de Aragon. (U. N. México, Ed.) Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas.

Luna, V. M., & Aburto, S. (2015). Los parámetros del agua resultante de un proceso de humedales construidos son aptas y cumplen con la normatividad para incorporarse a un cuerpo de agua natural. P Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 39.

Martinez, A. G., Padrón, W., Rodríguez, O. F., Chiquito, O., Escarola, M. A., Hernández-Lara, J. M., & Martinez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales de manejo de lixiviados. Avances en química, 37-47.

Martínez, Ó. P. (2009). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada*. Universidad de Cantabria.

Mateo, N., Nani, G., Montiel, W., Nakase, C., Salazar-Salazar, C., & Sandoval, L. (2020). Efecto de *Canna hibryds* en humedales construidos parcialmente saturados para el tratamiento de aguas porcinas. *RINDERESU*, 4(1-2), 59-68.

Montes, W. M. C. (2011). Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua, Méx

Morales, G., Vidal, G., Vera, I., & López, D. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46.

Morales, K. P. (2018). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de lixiviados de Villavicencio.

Mosquera, Y. N. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Revista Tumbaga*, 1(7).

Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.

Nakase, C., Zurita, F., Nani, G., Reyes, G., Fernández-Lambert, G., Cabrera-Hernández, A., & Sandoval, L. C. (2019). Nitrogen removal from domestic wastewater and the development of tropical ornamental plants in partially saturated mesocosm scale constructed wetlands. *International journal of environmental research and public health*, 16.

OMS. (2022). Organización Mundial de la Salud. OMS.

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/human-rights-and-health#:~:text=La%20Constituci%C3%B3n%20de%20la%20OMS,de%20salud%20de%20calidad%20suficiente>

ONU-HABITHAT. (2008). Manual de Humedales Artificiales. Nepal, Katmandu: ONU-HABITHAT.

Orduña Gaytán, F., Vallejo Cantú, N. A., & Alvarado Lassman, A. (2018). *Evaluación de la remoción de contaminantes en humedales artificiales sembrados en monocultivo con plantas ornamentales utilizando el efluente de un reactor anaerobio* (TecNM campus Orizaba).

Orozco, C. E., Rodriguez, M. A., & Pohlan, A. J. (2006). Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado del café. Hig. Sanid. Ambient., 190-196.

Paredes Gilón, L. (2014). Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales contruidos de flujo vertical, sembrados con heliconia (*sp*), para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Perez, Y. A., Garcia, D., & Jauregui, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas* 31, 2279.

Quezada de la Cruz, A. (2016). Remoción de contaminantes nitrogenados de las aguas residuales de café por diferentes sistemas de humedales. *ECOSUR*.

Rivera, S. A. (2022). Arquitectura de una red neuronal para el pronóstico de la remoción de contaminantes en lixiviados mediante humedales construidos verticales parcialmente saturados (TecNM campus Misantla).

Robinson, N. A. (2016). *Environmental Law Lexicon*. Law Journal Press.

Rodríguez, M. R., Molina, J., Jacome, A., & Suarez, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, investigación y tecnología*.

Sandoval, L. C., Alvarado, A., Marin-Muñiz, J. L., Mendez, J. M., & Zamora, Z. A. (2020). Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 23, 38.

Sandoval, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marin-Muñiz, J., Mendez-Contreras, J., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the use of ornamental plants and different

substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, 10 (5), 1594.

Schwammburger, P. F., Lucke, T., Walker, C., & Trueman, S. J. (2019). Nutrient uptake by constructed wetland plants during the construction phase of an urban residential development. *Science of the total environment*, 390-403.

SEMARNAT. (2005). *Estadísticas del agua en México*. MEXICO: CONAGUA.

SEMARNAT. (2010). *Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana*. Ciudad de México: Gobierno de México.

SEMARNAT. (2015). *Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. SEMARNAT.

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/recuadros/recuadro7_1.html

SEMARNAT. (2019). Gobierno de México.

<https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>

SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (10 de julio de 2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agron. colomb.* vol.26(2).

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water research*, 203, 117525.

Torres-Bojorges, A., Zurita, F., & Tejada, A. (2017). Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering*, 98, 410-417.

Vymazal, J., & Krofelová, L. (2015). Multistage Hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen. *Ecological Engineering*, 84, 202-208.

Wojciechowska, E., Gajewska, M., & Obarska-Pemkowiak, H. (2010). Treatment of landfill leachate by constructed wetlands: Three case studies. *Polish Journal of Environmental Studies*.

Zamora, S., Marin-Muñiz, J. L., Nakase-Rodriguez, C., Fernández-Lambert, G., & Sandoval, L. (2019). Wastewater treatment by constructed wetland eco-technology: Influence of mineral and plastic materials as filter media and tropical ornamental plants. *water*, 11.