



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
INGENIERIA CIVIL

Cierre de un Humedal Vertical tipo “francés” para el Tratamiento
de Lodos

Trabajo de Titulación previo a la obtención del
grado académico de Ingeniero Civil

Autores:

Christian Eduardo Medina Aguirre

Josue Sebastián Ortíz Calle

Director/a:

María Belén Arévalo Durazno

Cuenca – Ecuador

2023

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por guiarme y cuidarme en todo este camino, a mis padres por siempre estar ahí apoyándome en todo ámbito, por sus consejos y ánimos, a mis abuelitos, tíos y familiares que estuvieron ahí en todo momento desde el principio, mi enamorada que estuvo junto mí en cada paso de esta etapa de mi vida, todos mis amigos y compañeros por su ayuda, compañía y momentos de alegría en este proceso.

Josue Sebastián Ortíz Calle

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y por creer en mí en cada etapa de mi vida. Su amor y aliento han sido la fuerza que me ha impulsado a superar obstáculos y alcanzar mis metas. Este logro es también de ustedes.

A mis profesores y mentores, por su conocimiento, guía y paciencia. Gracias por compartir su experiencia y por desafiarme a alcanzar mi máximo potencial. Su dedicación y compromiso con la enseñanza han dejado una huella imborrable en mi formación.

A mis amigos y compañeros de estudio, por acompañarme en este viaje lleno de desafíos y momentos de alegría. Gracias por el apoyo mutuo, las largas horas de estudio y las conversaciones que me hicieron reflexionar. Su amistad ha sido un valioso regalo durante estos años.

Christian Eduardo Medina Aguirre

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay, cuyo trabajo y dedicación nos han proporcionado una formación excepcional. También queremos reconocer y agradecer especialmente a la ingeniera María Belén Arévalo, cuyo apoyo incondicional, dedicación y tiempo han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

Por último, deseamos mostrar nuestra gratitud a la empresa ETAPA EP, por su valioso respaldo y ayuda a lo largo de este proyecto.

Josue Sebastián Ortiz Calle – Christian Eduardo Medina Aguirre

Resumen

Los humedales de flujo vertical tipo francés son eficaces para tratar aguas residuales y lodos en un solo paso. En Cuenca se han investigado estos humedales para tratar lodos de fosas sépticas de manera más eficiente, económica y sostenible. Para este fin, se construyó un humedal piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, que fue alimentado con lodos fecales durante 18 meses. En el presente estudio se analiza el cierre de dicho piloto luego de 5 meses de su última carga, con el objetivo de observar los posibles impactos que estos humedales pueden causar una vez que han finalizado su vida útil. Se pudo determinar que el lodo depositado sobre el humedal tiene un alto contenido de materia orgánica y nitrógeno, pero bajo contenido de fósforo, y que se requiere desinfección del agua que percola a través de él debido a la contaminación microbiológica.

Palabras clave: Humedales Verticales tipo francés, Lodos de fosas sépticas, Medio Ambiente, Sostenibilidad, Cierre

Abstract

French vertical flow wetlands are efficient for the treatment of wastewater and sludge in a single step. In Cuenca, these wetlands have been investigated to treat septic tank sludge more efficiently, economically and sustainably. To this purpose, a pilot wetland was constructed at the Ucubamba Wastewater Treatment Plant and was loaded with fecal sludge for 18 months. In this study, the closure of the pilot wetland is analyzed 5 months after the last loading, with the objective of observing the potential impacts that these wetlands may cause once they have reached the end of their operational life. It was determined that the sludge deposited in the wetland has a high organic matter and nitrogen content, but a low phosphorus content. In addition, it is necessary to disinfect the percolated water due to microbiological contamination.

Keywords: French vertical flow wetlands, septic tank sludge, environment, sustainability, closure.



Este certificado se encuentra en el
repositorio digital de la
Universidad del Azuay, para
verificar su autenticidad
escanee el código QR

Este certificado consta de: 1 página

Índice de contenidos	
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	iv
Índice de contenidos.....	v
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
Introducción	1
Problemática y justificación.....	1
Capítulo 1: Revisión Literaria.....	2
1.1. Generalidades	3
1.2. Lodos de fosas sépticas	3
1.3. Humedales de tratamiento	6
1.3.1. Aplicaciones ventajas y desventajas	7
1.3.2. Clasificación.....	7
1.4. Humedales para el tratamiento de lodos de fosas sépticas	10
Capítulo 2: Metodología	15
2.1. Zona de estudio	15
2.2. Descripción del Humedal	16
2.3. Fases de funcionamiento del humedal.....	17
2.3.1. Fase 1 - Con vegetación y válvula abierta	17
2.3.2. Fase 2 - Con vegetación y válvula cerrada.....	18
2.3.3. Fase 3 - Sin vegetación y válvula cerrada.....	19
2.3.4. Fase 4 - Cierre del humedal	19
Capítulo 3: Resultados y discusión	23
2.1. Lodo depositado y material filtrante del humedal.....	23
2.2. Agua a la entrada y salida del Humedal	26
3. Conclusiones.....	30
4. Lista de Referencias.....	31

Índice de Tablas

Tabla 1.1.....5
 Principales características de los lodos de fosas sépticas.....5

Tabla 1.2 Parámetros para el dimensionamiento del Humedal..... 12

Tabla 3.1 Resultados de Laboratorio de muestra de lodos y suelo del humedal (EH: entrada humedal, SH: salida humedal, S: capa superficial, I: capa intermedia, F: fondo)23

Tabla 3.2 Comparación de los resultados de nutrientes obtenidos25

Tabla 3.3 Resultados de Laboratorio de muestra de aguas a la entrada y salida del Humedal.....26

Índice de Figuras

Figura 1.1 <i>Estructura de los rizomas de E. pyramidalis, mostrando sus raíces y dos brotes nuevos (izq.). Aplicación de lodos fecales en un lecho de secado con plantas, con dos brotes tiernos (der.), en los cuales se observan sus nudos y entrenudos</i>	14
Figura 2.1	15
<i>Ubicación de los humedales piloto en la PTAR en Ucubamba.</i>	15
Figura 2.2 <i>Esquema de la estación experimental de aguas residuales sin escala.</i>	16
Figura 2.3 <i>Humedal Piloto - Fase 1</i>	17
Figura 2.4 <i>Humedal Piloto - Fase 2</i>	18
Figura 2.5 <i>Humedal Piloto - Fase 3</i>	19
Figura 2.6 <i>Toma de Muestra de Lodos</i>	20
Figura 2.7 <i>Toma de muestras de suelo en las capas intermedias y el fondo del humedal</i>	21
Figura 2.8 <i>Muestras de agua tanto a la entrada como a la salida del humedal</i>	22
Figura 3.1 <i>Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados obtenidos</i>	24
Figura 3.2 <i>Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados para el DBO, DQO y SST.</i>	28
Figura 3.3 <i>Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados para los coliformes totales y coliformes termo tolerantes.</i>	28

Introducción

Los humedales artificiales de flujo vertical tipo francés son sistemas diseñados para imitar los procesos naturales de purificación del agua que ocurren en los humedales naturales. Estos sistemas son eficaces para tratar aguas residuales y reducir la contaminación en ríos, lagos y otros cuerpos de agua (Rodríguez, 2020).

Este tipo de humedales se originaron en Francia y son una variante de los humedales de tratamiento. Estos sistemas utilizan una serie de estanques poco profundos, que se construyen en una secuencia específica para garantizar el tratamiento adecuado del agua. Se utilizan para tratar aguas residuales domésticas o industriales, como también lodos. Se utiliza plantas y microorganismos para filtrar, absorber y descomponer los contaminantes del agua (Alberto et al., 2006).

Los lodos son el residuo sólido que se genera durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales. Estos están compuestos principalmente por materia orgánica y mineral, y contienen una gran cantidad de microorganismos, incluyendo bacterias y hongos (Amador et al., 2015).

Los lodos pueden ser tratados mediante el proceso de Fito depuración, en el cual se utilizan plantas y microorganismos para la eliminación de los contaminantes presentes en los lodos. El proceso de Fito depuración se basa en la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y otros contaminantes presentes en los lodos a través de sus raíces y la actividad de los microorganismos presentes en el sustrato del humedal (Strande et al., 2014).

Problemática y justificación

En la ciudad de Cuenca hay un alto porcentaje de viviendas que utilizan el sistema de fosas sépticas, las cuales necesitan el servicio de limpieza cada cierto periodo. La Empresa ETAPA EP, utilizando hidrocleaners realiza la extracción de los lodos de dichas fosas y posteriormente se deposita en las lagunas aireadas ubicadas en la planta de tratamiento de Ucubamba (Álvarez & Proaño, 2022).

Debido a que la PTAR de Ucubamba no está diseñada para el manejo y tratamiento de estos desechos, su nivel de eficiencia y capacidad son reducidos. Por este motivo, es que se da paso a implementar los humedales de tipo francés, ya que puede ser una opción viable y además amigable con el medio ambiente.

Los humedales artificiales son sistemas diseñados y construidos para utilizar los procesos naturales de la vegetación, los suelos y los conjuntos microbianos asociados para ayudar a tratar las aguas y lodos los cuales son aprovechados de los mismos procesos que se dan en los humedales naturales, aunque en un entorno más controlado, estos presentan una nueva solución innovadora, de esta manera generando un impacto positivo hacia el medio ambiente y sobre todo generando una forma eficiente para el tratado de lodos (Vymazal, 2010).

A demás del impacto positivo para el medio ambiente, es un sistema de tratamiento que puede ser realizado a un bajo costo, debido a que las inversiones para realizar un humedal no son en realidad altas, por otra parte, podemos decir que la elaboración, mantenimiento y operación de estos son de alguna manera sencillas.

También cabe recalcar hablando del ámbito económico que el sistema de tratamiento convencional representa una inversión del 57% más de la que sería utilizada para la construcción de un humedal artificial, y si hablamos acerca de mantenimiento y operación los humedales presentan un 94% menor en comparación a lo que se usaría en el sistema tradicional (EPA, 2000).

Por este motivo es el enfoque de realizar este tipo de humedales en Cuenca, relacionado con el mejor manejo de los lodos residuales en este sector. Se realizó diferentes tipos de procesos para comprobar la efectividad de éstos en nuestro medio. El objetivo de este trabajo es realizar el cierre de este humedal de tratamiento de lodos, analizando cuál es el estado en su fase final.

Capítulo 1: Revisión Literaria

1.1. Generalidades

Los lodos fecales son un material sólido o semisólido, subproducto significativo del tratamiento de aguas residuales in situ en zonas rurales y urbanas no conectadas a un sistema de alcantarillado municipal y se necesita que estos tengan un buen manejo, de lo contrario puede ser perjudicial para la salud y el medio ambiente (Strande et al., 2014).

En América Latina, existen áreas periurbanas en las que han instalado sistemas de saneamiento in situ, las cuales no se han desarrollado suficientes servicios para mantener y limpiar de manera segura los lodos fecales y excretas. Por lo tanto, es común observar cómo los lodos fecales y excretas desbordan los sistemas sanitarios y se filtran por las calles, ríos, quebradas y barrancos cercanos a los puntos de recolección (Rojas & César, 2011).

En un estudio de saneamiento que se realizó en Bolivia, Guatemala, Honduras y Nicaragua, resulta que el acceso a las redes de alcantarillado en las áreas urbanas varía entre el 40% y el 70%. Esto indica que una parte significativa de la población urbana utiliza otras soluciones de saneamiento básico (Rojas & César, 2011).

Además, en Ecuador, aproximadamente el 60 % de los hogares en todo el país tienen acceso al servicio de alcantarillado a través de la red pública, lo cual representa que el 40% no posee un servicio de saneamiento básico (ENCA, 2016).

Por esta razón, es importante promover la planificación de métodos de tratamiento y desfangado. Para lograr un manejo efectivo de los lodos fecales, es fundamental diseñar tecnologías de tratamiento que consideren el uso o la disposición final que se les dará, por otra parte, es importante destacar que se debe recuperar los recursos valiosos de los productos del tratamiento, siempre y cuando sea posible (Amador et al., 2015).

1.2. Lodos de fosas sépticas

Los lodos de las fosas sépticas son un tipo de lodos fecales que se generan en los sistemas de saneamiento descentralizado (fosas sépticas). Estos lodos son una mezcla de materia orgánica, líquido y sólidos.

La acumulación excesiva de lodos puede emitir olores desagradables y contribuir a la contaminación de las aguas subterráneas y los cuerpos de agua cercanos. Además, los lodos pueden contener patógenos y otros contaminantes, por lo tanto, es importante implementar prácticas de gestión adecuadas para la eliminación y tratamiento de los lodos de las fosas sépticas (Manjate, 2016).

Según EPA (2013), “se deben seguir ciertas regulaciones y mejores prácticas para la gestión de los lodos de las fosas sépticas, como el tratamiento previo de los lodos para reducir su volumen y contenido de patógenos, el uso de vehículos especialmente diseñados para la eliminación de residuos y la eliminación en instalaciones de eliminación de residuos autorizadas y reguladas”.

Además, según Epa (2000), “se recomienda la inspección y bombeo regular de las fosas sépticas para reducir la acumulación de lodos y prolongar la vida útil del sistema de tratamiento de aguas residuales”.

Las características de los lodos fecales son un factor crítico en la elección del proceso adecuado para su tratamiento, incluyendo la deshidratación, estabilización, mineralización y eliminación de contaminantes. Estas características indican las condiciones físico-químicas y el nivel de degradación bioquímica, así como la fuente u origen de los lodos fecales.

Según Koottatep et al., (2005), Strande et al., (2014) y Strauss et al., (2000), “han clasificado los lodos fecales en dos tipos según su origen. En lodos de inodoros o letrinas los cuales se caracterizan por tener alta concentración de sólidos totales, por otro lado, tenemos los lodos de fosas sépticas, los cuales se caracterizan por bajas concentraciones de sólidos totales. La caracterización de los lodos fecales debe incluir la concentración de sólidos, la demanda química y bioquímica de oxígeno, nutrientes, patógenos y metales, según se indica en la literatura revisada. Es importante destacar que las características de los lodos fecales pueden variar ampliamente según la ubicación geográfica”.

Tabla 1.1*Principales características de los lodos de fosas sépticas*

Región	Fuente Fs	pH	TS (mg.L ⁻¹)	TVS (mg.L ⁻¹)	TSS (mg.L ⁻¹)	BOD (mg.L ⁻¹)	COD (mg.L ⁻¹)	TN (mg.L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mg.L ⁻¹)
EUA	Fosa séptica	5.4	40000	25000	15000	7000	15000	700	150
Brasil	Fosa séptica		12880	3518	7091	2434	6895	120	89
Brasil	Fosa séptica		7186	3413	2064	1087	6199		58
Brasil	Fosa séptica		9267 (745 – 44472)	4868 (304 – 21445)		1863 (499 – 4104)	9419 (1363 – 25488)		
Tailandia	Fosa séptica	6.7 – 8.0	5700- 28000	4000- 21000	3150- 21600	600-5500	5400-34500	370-1500	200-590
Tailandia	Fosa séptica		15350 (2200 – 67200)	73% (TS)		2300 (600 – 5500)	15700 (1200 – 76000)	1100 (300 – 5000)	415 (120 – 1200)
Jordán	Fosa séptica				2600	1600	5750		
Indonesia	Fosa séptica		47000				24000	644	
Pilipinas	Fosa séptica		31000	19000		5500	12800		209
Noruega	Fosa séptica		54000	31600	45000	10300	42550	793	113
Ghana	Fosa séptica		12000	7080		840	7800		330
Burkina Faso	Fosa séptica		19000	8930		2.240	13500	2100	
Burkina Faso	Fosa séptica		8984	5121	7077	1453	7607		
Argentina	Fosa séptica		6000-35000	3000- 17500		750-2600	4200	190	150
France	Fosa séptica		30000	21300	23000		42000	1423	287
Europa	Fosa séptica	5.2 – 9.0	200 – 123860	160 – 65570	5000 – 70920	700 – 25000	1300 – 114870	150 – 2570	
Países Tropicales	Fosa séptica		< 30000		7000		< 15000		< 1000

Fuente: (Manjate, 2016)

Al examinar los datos presentados en la Tabla 1.1, se puede notar que los lodos fecales varían significativamente según su origen. El análisis demuestra una gran variabilidad en la calidad de los lodos, dependiendo del origen y el tipo de lodo fecal. Esto se debe a varias razones, como las diferencias en la duración del almacenamiento, la temperatura, la intrusión de aguas subterráneas y la tecnología y el patrón de vaciado del tanque (Manjate, 2016).

Sin embargo, se encontró una falta de información relacionada con el tiempo de almacenamiento de cada fuente evaluada. Además, se observó que el lodo fecal en todo el mundo se caracteriza por una gran variabilidad entre países, dependiendo del tipo de instalaciones de saneamiento in situ.

1.3. Humedales de tratamiento

Los humedales de tratamiento se han utilizado con éxito en la eliminación de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, y en la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos. Además, este sistema es eficaz en la eliminación metales pesados (Castañeda et al., 2017). Los humedales se dividen en tres zonas: la zona de flujo, la zona de raíces y la zona de salida. En la zona de flujo, el agua entra en el humedal y fluye a través de una capa de piedra o grava. En la zona de raíces, se plantan especies de plantas que ayudan a filtrar y absorber los contaminantes. En la zona de salida, el agua tratada es recogida y utilizada para riego o descargada en un cuerpo de agua (Vymazal, 2011).

Existen diferentes tipos de humedales de tratamiento, aquí se los ha clasificado en flujo horizontal, vertical y tipo “francés”. Estos humedales por lo general son usados para el tratamiento de aguas residuales, aunque existen variaciones en los humedales verticales de tal manera que puedan ser usados para el tratamiento de los lodos.

En cuanto al tratamiento de lodos, los humedales de tratamiento representan una alternativa sostenible, ya que no requieren el uso de productos químicos, ni de energía y son capaces de reducir significativamente el impacto ambiental. Además, dichos humedales pueden proporcionar beneficios adicionales, como la mejora del hábitat para

la fauna, la flora, la creación de paisajes estéticos y la conservación de la biodiversidad (Sanjrani et al., 2020).

1.3.1. Aplicaciones ventajas y desventajas

Existen varias ventajas y desventajas de los humedales construidos, a continuación, se presentan algunas de ellas (Manjate, 2016).

Ventajas:

- Bajo costo de inversión y funcionamiento.
- La eliminación de contaminantes y nutrientes.
- Producción de un material final que puede ser utilizado como abono orgánico.

Desventajas:

- Las eficiencias son de acuerdo a las condiciones climáticas.
- La eliminación de coliformes lograda no siempre es suficiente, por lo que puede requerir un proceso de desinfección.
- Facilita la producción de mosquitos.

1.3.2. Clasificación

Humedales artificiales de flujo horizontal

El humedal de flujo horizontal se originó en Alemania a finales de los años 60 y ha evolucionado con el tiempo para utilizar gravas o arenas en lugar de suelos limosos. Estos humedales se usan para el tratamiento secundario y terciario de aguas residuales domésticas e industriales. Normalmente, el tratamiento primario se realiza mediante el uso de tanques sépticos o tanques (Dotro et al., 2017).

Este es ampliamente utilizado en diferentes países como la República Checa, España, Portugal, Nicaragua y América del Norte. En regiones cálidas, es común encontrar humedales horizontales precedidos por otros sistemas de tratamiento.

Estos humedales están diseñados para tratar el efluente primario antes de su dispersión en el suelo o su descarga en aguas superficiales. Las aguas residuales fluyen lentamente a través del medio poroso debajo de la superficie del lecho en un camino más o menos horizontal hasta llegar a la zona de descarga (Manjate, 2016). Para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas, la profundidad de la capa de grava es de 0,5 a 0,7 metros (Dotro et al., 2017).

Se espera que el sistema mantenga las aguas residuales debajo de la superficie y fluyan dentro y alrededor de las raíces de las plantas, y es comúnmente utilizado para el tratamiento secundario de viviendas unifamiliares o pequeños sistemas de conglomerados (Manjate, 2016).

Los elementos básicos del sistema incluyen vegetación, zonas de arena y grava, tubería de salida y zona de recogida. Actualmente, la tecnología de tratamiento de aguas residuales con Humedales Artificiales de Flujo Horizontal es la más utilizada en todo el mundo en comparación con otros sistemas (Dotro et al., 2017).

Humedales verticales

Durante los años 90, el humedal de flujo vertical tradicional se hizo cada vez más popular en Europa, como resultado de cambios en las normas de descarga de aguas residuales tratadas descentralizadas (Dotro et al., 2017).

Estos países comenzaron a exigir la eliminación de nitrógeno amoniacal como condición para las descargas de plantas pequeñas de tratamiento de aguas residuales. Los humedales de flujo vertical se utilizan principalmente para tratar aguas residuales secundarias domésticas y existen diversas variaciones en su diseño, incluyendo el sistema de tipo francés y sistemas para tratamiento de lodos. Los sistemas verticales requieren menos terreno que los sistemas horizontales, pero necesitan más mantenimiento. Por otra parte, son súper eficientes para efluentes sépticos de pequeños poblados (Manjate, 2016).

En los humedales construidos de flujo vertical, el agua residual se bombea hacia la superficie intermitentemente y luego drena verticalmente hacia abajo a través de la capa de filtro hacia un sistema de drenaje en el fondo. Este tipo de alimentación proporciona una buena transferencia de oxígeno y capacidad de nitrificar (Dotro et al., 2017).

Humedales artificiales de flujo vertical sistema francés

El sistema francés es conocido por su eficiencia y capacidad para recibir aguas residuales sin tratar durante más de diez años sin requerir la eliminación de lodos. Estos sistemas son utilizados como parte de un sistema descentralizado debido a su robustez y baja tecnología. Aunque los humedales de flujo vertical requieren más operación y mantenimiento que las unidades horizontales, son una alternativa eficaz para el tratamiento de efluentes sépticos en pequeños poblados (Manjate, 2016).

Este sistema consta de dos etapas, la primera etapa consta de tres unidades paralelas alternas de un lecho de flujo vertical relleno de grava y diseñado para el tratamiento de aguas residuales crudas, mientras que la segunda etapa es un lecho de flujo vertical que se puede utilizar para operar en paralelo con el fin de descansar uno de los filtros o alternar la operación (Dotro et al., 2017).

Está configurado de la siguiente manera: La configuración del sistema consta de tres capas principales. La primera capa, de al menos 30 cm de espesor, está compuesta por grava fina con un tamaño de partícula de 2-8 mm. A continuación, se encuentra una capa de transición de 10-20 cm de espesor, que consiste en partículas de 5 mm de tamaño. Finalmente, se encuentra una capa de drenaje de 10-20 cm de espesor para completar el sistema (Molle et al., 2005).

La segunda etapa se compone de una capa de 30 cm o más de arena, seguida de una capa de transición de 10-20 cm de partículas con un tamaño de 3.10 mm y, por último, una capa de drenaje de 10-20 cm de espesor (Molle et al., 2005).

La primera etapa se alimenta con aguas residuales crudas las cuales pasan por una criba de malla de 20 a 40 mm. El sistema en cuestión se caracteriza por su simplicidad, ya que

solo consta de una malla y filtros en dos etapas para el tratamiento. A diferencia de otros sistemas, no se utilizan tanques para tratamientos primarios o anaerobios, ni se requieren unidades de tratamiento biológico o de lodos, lo que evita la acumulación excesiva de lodos (Manjate, 2016).

1.4. Humedales para el tratamiento de lodos de fosas sépticas

Los humedales artificiales llegan a ser una opción muy efectiva y sostenible para el tratamiento de los lodos de fosas sépticas. Estos funcionan como filtros biológicos en los cuales los lodos son tratados mediante la acción de plantas acuáticas, microorganismos y otros seres vivos presentes en su interior (Molle et al., 2013).

La eficiencia de los humedales en el tratamiento de lodos de fosas sépticas ha sido ampliamente estudiada en diferentes países, y se ha demostrado que es una tecnología efectiva y sostenible para la eliminación de contaminantes como nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno (Molle et al., 2013).

En estudios en México, se demostró que el uso de los humedales para el tratamiento de los lodos de fosas sépticas fue efectivo en la eliminación de contaminantes. En términos generales, la utilización de humedales construidos se asocia con un mejor rendimiento en la eliminación de contaminantes orgánicos, gracias al uso de materiales filtrantes que proporcionan beneficios adicionales (Marín et al., 2023).

Sin embargo, para que el humedal funcione de manera positiva se necesita tomar en cuenta ciertos parámetros como son la carga hidráulica, dimensiones del humedal, plantas en el humedal, pretratamiento de los lodos, los cual serán una parte crucial para el funcionamiento del humedal

Tasa de Carga hidráulica

Para los humedales construidos de flujo vertical que tratan lodos de fosas sépticas funcionen de manera óptima, es necesario que presenten una tasa de carga hidráulica mediana de $0,275 \text{ m}^3$ descarga/ m^2 . semana. Esta cifra indica la cantidad de agua y sólidos

que el humedal puede procesar eficientemente en un período determinado, asegurando así su correcto funcionamiento. Es importante destacar que estos parámetros son esenciales para garantizar la efectividad de los humedales en la eliminación de los contaminantes presentes en los lodos de fosas sépticas. Por lo tanto, es crucial monitorear regularmente estos valores para garantizar la calidad del tratamiento y prevenir posibles daños ambientales (Manjate, 2016).

Tasas de Carga de Lodos

La tasa de carga de los lodos se expresa como kg de sólidos secos/m²/año, lo que indica la cantidad de sólidos que se secan en un metro cuadrado de lecho durante un año. Esta cifra solo puede ser una estimación ya que las condiciones locales varían ampliamente, incluyendo la extensión del lecho y el grosor de cada capa. Aunque se puede establecer un valor medio para esta tasa de 32 kg sólidos totales/m². año. Las condiciones adversas como alta humedad, bajas temperaturas, mucha lluvia y altos porcentajes de lodos frescos pueden afectar esta tasa. Sin embargo, en condiciones muy secas, puede ser posible aplicar tasas mayores. Es importante realizar experimentos a escala piloto para determinar las condiciones operativas óptimas (Strande et al., 2014).

Consideraciones de diseño y construcción

El humedal debe ser diseñado para satisfacer los requisitos específicos de tratamiento de los lodos de fosas sépticas. Debe tener la capacidad adecuada para retener y tratar los lodos y el agua residual. Además, se deben considerar factores como el tamaño, la forma y la profundidad del humedal (Strande et al., 2014).

Para tener un resultado efectivo al momento de construir el humedal artificial con plantas es necesario tener en cuenta distintos parámetros los cuales se debe considerar al momento de diseño y construcción, presentados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2

Parámetros para el dimensionamiento del Humedal.

Factor	Parámetros a considerar	Comentarios
Selección del sitio	Uso de la tierra y acceso	• Ubicación central para minimizar la distancia de transporte
		• Ubicación alejada de residencias para evitar quejas respecto a olores, insectos o ruido.
		• Acceso adecuado para camiones.
	Disponibilidad de terreno	• Extensión suficiente para los requerimientos actuales y futuros.
	Topografía	• En lo posible, seleccionar un sitio que permite flujo por gravedad para reducir los costos y energía de bombeo.
Estructura	Celdas	• Excavar hoyos en la tierra y/o formar diques de tierra alrededor de las celdas para crear la profundidad necesaria.
		• La altura del dique encima de la arena debe ser suficiente para la acumulación de lodos durante 3 a 4 años, entonces se recomienda generalmente de 1,5 a 2 m.
		• Se recomienda construir algunas celdas, para poder descargar en una mientras las otras estén en reposo.
		• Se pueden ubicar diques entre las celdas.
		• El fondo debe tener una leve pendiente (1 a 3 %).
		• Es bueno dejar algo de espacio entre las celdas para maquinaria y actividades de mantenimiento (p.ej., cosecha de plantas, extracción de lodos secos, etc.).
	Forros	• Los fondos de las celdas deben ser sellados para prevenir la contaminación o intrusión de aguas subterráneas. Es preferible usar forros sintéticos (geomembranas), pero la arcilla compactada también funciona.
Estructuras de flujo	Entrada	• Estas estructuras deben ser sencillas y fáciles de ajustar. Es común aplicar canales o tubos con puertas.
	Salida	• Es importante instalar un rebosadero, aliviadero, compuerta o tubo ascendente que sea ajustable en su altura para retener agua dentro de cada celda en tiempos de sequía para prevenir la mortandad de las plantas.
Vida Útil		

		<ul style="list-style-type: none"> • La vida operativa de los lechos está determinada por la tasa de carga, la tasa de estabilización y el número de lechos. Este último debe calcularse basándose en la cantidad de lodos por tratarse.
Clima		<ul style="list-style-type: none"> • Puede hacer falta retener agua en los lechos para evitar los efectos negativos de las sequías y altas temperaturas sobre las plantas (véase “Salidas”).
		<ul style="list-style-type: none"> • Es recomendable incrementar el tiempo entre dos cargas consecutivas (periodo de reposo) cuando llueva excesivamente.
Medio Filtrante		<ul style="list-style-type: none"> • Puede incluir arena, grava (piedras de 5 a 75 mm) u otro sustrato grueso.
		<ul style="list-style-type: none"> • La capa superior debe tener un coeficiente de uniformidad mayor a 3,5 para prevenir una obstrucción precoz. Esto se puede lograr al cernir o lavar las partículas finas no deseadas
		<ul style="list-style-type: none"> • Es conveniente una pequeña mezcla de tierra o materia orgánica para fomentar el crecimiento inicial de las plantas.
		<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario mantener el lecho húmedo, pero no inundado, hasta que germinen las semillas o los fragmentos de rizomas produzcan nuevos brotes.
Vegetación		<ul style="list-style-type: none"> • Se deben elegir especies de plantas acuáticas nativas (no invasoras), comprobadas que se desarrollan bien en los LF.
		<ul style="list-style-type: none"> • Es importante seleccionar materia vegetativa sin señales de ataque de nematodos.
		<ul style="list-style-type: none"> • Es preferible sembrar y cosechar en la época lluviosa para facilitar el crecimiento.
Ventilación		<ul style="list-style-type: none"> • Es factible lograr más flujo de aire y mejores condiciones hidráulicas al utilizar bloques vacíos o tubos de ventilación.
Sistema de Alimentación		<ul style="list-style-type: none"> • Una distribución uniforme de los lodos (preferiblemente desde el centro del lecho) evita el crecimiento desigual de las plantas y la formación de ‘zonas muertas’.
		<ul style="list-style-type: none"> • La alimentación o carga debe realizarse de una a tres veces por semana, según la época del año.

Fuente: (Strande et al., 2014).

Plantas en el humedal

Las plantas que se utilizan en el humedal deben ser seleccionadas cuidadosamente para asegurar que sean capaces de sobrevivir en el ambiente del humedal. Además, las plantas deben ser capaces de tratar eficazmente los contaminantes presentes en los lodos (Strande et al., 2014).

Las plantas acuáticas son la mejor opción para este proceso, tienen una gran producción de semillas, pero su germinación es limitada debido a las condiciones anegadas en las que se encuentran. Por lo tanto, su reproducción se logra con mayor éxito a través de cortes, estolones o rizomas, los cuales son tallos subterráneos que tienen brotes hacia arriba y raíces hacia abajo y a los lados como se indica en la Figura 1.1. Los rizomas son muy importantes, ya que proporcionan un amplio espacio para el crecimiento de bacterias, las cuales son responsables de la degradación y mineralización de las sustancias orgánicas en los lodos en los humedales artificiales (Strande et al., 2014).

Figura 1.1

Estructura de los rizomas de E. pyramidalis, mostrando sus raíces y dos brotes nuevos (izq.). Aplicación de lodos fecales en un lecho de secado con plantas, con dos brotes tiernos (der.), en los cuales se observan sus nudos y entrenudos



Fuente: (Strande et al., 2014).

Capítulo 2: Metodología

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en la ciudad de Cuenca, Azuay a una altura de 2.560 m.s.n.m, con un área de 70.59 Km², conocida por los parques lineales alrededor de la ciudad y estar rodeada por sus 4 ríos que son: el Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui.

El estudio fue realizado en un humedal piloto, construido en las instalaciones de ETAPA EP en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, ubicado al Noreste de la ciudad como se muestra en la Figura 2.1.

Figura 2.1

Ubicación de los humedales piloto en la PTAR en Ucubamba.



Fuente: Google Maps, (2023).

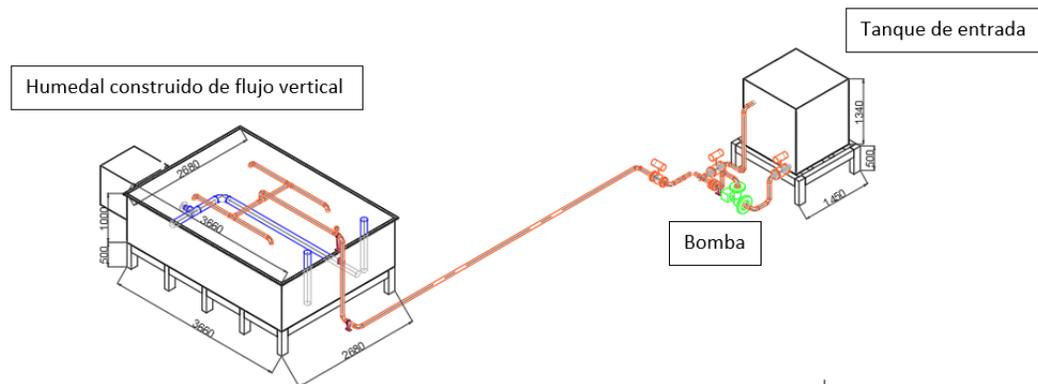
2.2.Descripción del Humedal

El humedal piloto tiene una forma rectangular, con medidas de 3.6 metros de largo y 2.68 metros de ancho. La superficie de filtración abarca un área de 9.81 metros cuadrados y tiene una profundidad media de 0.7 metros, se puede encontrar un esquema del mismo en la Figura 2.2.

El humedal se elaboró conforme a la primera etapa del sistema francés, compuesto de tres capas de medio filtrante: una capa superior de 30 cm de espesor de gravilla de tamaño de 2 a 10 mm, seguida de una capa de transición de 20 cm de espesor de gravilla de tamaño de 10 a 20 mm, finalmente, una capa de drenaje de 20 cm de espesor compuesta por grava de tamaño de 20 a 60 mm (Arévalo et al., 2020).

Figura 2.2

Esquema de la estación experimental de aguas residuales sin escala.



Fuente: (Arévalo et al., 2020).

Para regar el humedal se utilizó un tanque de entrada que recoge el agua cruda que ingresa a las lagunas de estabilización por medio de un sistema de bombas. El sistema de alimentación del humedal consta de tuberías de PVC de 50 mm colocadas sobre la capa superior del humedal con cuatro salidas para garantizar que el afluente se distribuya uniformemente en toda la superficie. Por otro lado, para el sistema de drenaje se instalaron dos tubos de PVC perforados de 110 mm en la parte inferior, los cuales se encuentran conectados a la superficie para permitir la aireación como se observa en la Figura 2.2. Finalmente, la vegetación sembrada fue *Lolium perenne* (Arévalo et al., 2020).

2.3. Fases de funcionamiento del humedal

Durante la etapa de funcionamiento del humedal, se implementó un proceso periódico de descarga de lodos de fosas sépticas provenientes de hidrocleaners. Esta descarga se realizaba directamente en el humedal con una frecuencia de una vez por semana durante 18 meses, este proceso de descarga semanal permitía introducir una cantidad manejable de lodos al humedal, los cuales eran transportados y liberados de manera cuidadosa y controlada.

El humedal piloto inició su operación en enero del 2021, la cual duró hasta abril de 2022. Durante la etapa operativa del humedal piloto se llevaron a cabo 3 fases, cada una con sus particularidades, y en cada una de ellas se evaluaron diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos.

2.3.1. Fase 1 - Con vegetación y válvula abierta

Durante la primera fase de estudio del humedal piloto, se observó en primer lugar la presencia de vegetación, específicamente la especie *Lolium perenne*, como se muestra en la Figura 2.3. Además, se constató que la válvula de salida del humedal se encontraba en una posición abierta, lo que permitía el flujo controlado de agua hacia fuera del sistema, en todo el periodo de la fase 1.

Figura 2.3

Humedal Piloto - Fase 1



Fuente: (Carchi & García, 2021).

2.3.2. Fase 2 - Con vegetación y válvula cerrada

Durante la segunda fase del estudio del humedal piloto, se observaron primeramente que la válvula de salida se encontraba cerrada, lo que implicaba que el flujo de agua hacia fuera del humedal estaba restringido y este se acumulaba dentro del humedal. Esta modificación en la posición de la válvula tenía como objetivo evaluar el impacto de esta condición en el funcionamiento y rendimiento del humedal, además se observó la presencia de vegetación *Lolium perenne* y a lo largo del transcurso de la fase 2, se llevó a cabo un mantenimiento del humedal que incluyó la remoción de la capa superficial de vegetación. Esta limpieza tenía como propósito eliminar cualquier material indeseado o en descomposición que pudiera afectar negativamente el desempeño del humedal.

Posteriormente, se procedió a la plantación de una nueva capa de vegetación, en este caso, la especie *Typha latifolia* como indica la Figura 2.4. Sin embargo, se observó un deterioro en la presencia y desarrollo de esta especie, lo que llevó a su posterior remoción del humedal. Estos cambios en la vegetación indican la importancia de realizar monitoreos y ajustes en la selección de especies vegetales, con el fin de adaptarse a las condiciones específicas del humedal y maximizar su eficacia en el tratamiento de los efluentes.

Figura 2.4

Humedal Piloto - Fase 2



Fuente: (Álvarez & Proaño, 2022).

2.3.3. Fase 3 - Sin vegetación y válvula cerrada

En la fase 3 del estudio del humedal piloto, se experimentó una ausencia total de vegetación en el sistema como se observa en la Figura 2.5, además, durante esta fase, se trabajó con la válvula de salida cerrada. Esto significa que el flujo de agua hacia fuera del humedal estaba completamente bloqueado, lo que resultó en la retención del agua dentro del sistema.

Figura 2.5

Humedal Piloto - Fase 3



Fuente: (Álvarez & Proaño, 2022).

2.3.4. Fase 4 - Cierre del humedal

Luego de que el humedal piloto fue cargado con lodos de fosas sépticas por última vez, permaneció en descanso aproximadamente 5 meses antes de analizar su etapa de cierre. El cierre consiste en probar la posibilidad de utilización del lodo depositado sobre la superficie del humedal y la contaminación que el humedal podría provocar una vez que haya terminado su vida útil. Para esto, se procedió a la toma de muestras tanto de la capa de lodo como del agua que pasa por el humedal (simulando agua lluvia que se infiltraría).

Capa Lodo y Suelo del Humedal

Para llevar a cabo la toma de muestras de lodos y suelo del humedal se utilizó las siguientes herramientas:

- Guantes
- Mascarilla
- Fundas Ziploc
- Calador de Suelo Barreno + prolongaciones

En primer lugar, se realizó la muestra de lodo superficial de manera manual en diversas partes del humedal para tener una muestra homogénea y se colocó en fundas ziploc para de esta manera mantenerla en buen estado hasta llevarla al laboratorio, como se muestra en la Figura 2.6.

Figura 2.6

Toma de Muestra de Lodos



En segundo lugar, se tomó una muestra del suelo del humedal en una capa intermedia y al fondo del humedal, mediante el calador de suelo barreno y con la ayuda de sus prolongaciones facilitó la extracción de la muestra cómo se revela en la Figura 2.7, de la misma manera se tomó muestras de distintas partes de la superficie del humedal, y se colocó en fundas ziploc.

Figura 2.7

Toma de muestras de suelo en las capas intermedias y el fondo del humedal



En la muestra de lodos en el laboratorio se analizó parámetros como Nitrógeno, Fósforo, Materia orgánico, Carbono y Relación C/N.

Agua – entrada y salida del Humedal

Con el propósito de ejecutar la recolección de muestras de agua, se emplearon los siguientes instrumentos y utensilios:

- Guantes
- Mascarilla
- Manguera
- Embaces de 4 litros y 10 litros

- Frascos de muestra de Orina

El proceso de la toma de muestras de agua tanto a la entrada como salida del humedal, fue mediante el tanque de entrada; el cual se llenó de agua potable proporcionada por la empresa Etapa EP a través de una manguera de aproximadamente 50m, posteriormente se activó el sistema para poder regar el humedal gracias a las tuberías ya conectadas, como se observó en la Figura 2.2, de esta manera facilitó la toma de muestras a la entrada y salida del humedal para así poder realizar las pruebas correspondientes del estudio, como se indica en la Figura 2.8. Se debe mencionar que el tanque de carga, donde se colocó el agua potable, tenía restos del agua residual que normalmente llega a éste (como se mencionó anteriormente) lo que cambió la composición del agua de entrada al humedal.

Figura 2.8

Muestras de agua tanto a la entrada como a la salida del humedal



Fuente: (Carchi & García, 2021).

Durante el análisis de la muestra de aguas en el laboratorio, se evaluaron diversos parámetros esenciales para examinar la calidad del agua en el humedal en su fase final. Estos parámetros incluyeron DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química), Fósforo total, NKT (Nitrógeno Kjeldahl Total), Sólidos Suspendedos Totales, Coliformes, Parásitos Y Áscaris SP.

La Tabla 3.1 muestra el análisis de diversos parámetros en relación con los niveles de las capas. Se han evaluado Potasio, Nitrógeno, Fósforo, Materia Orgánica, Carbono y la relación carbono-nitrógeno. Se observa que en la entrada del humedal el contenido de los nutrientes es mayor en la capa superficial y disminuye a medida que avanza la profundidad. En cambio, a la salida la capa de 60 cm presenta menores valores comparado con el fondo. En este hecho se refleja la capacidad de filtración del humedal en su primera capa.

Además, en la capa superficial se presentan los valores de Coliformes totales, Escherichia Coli, Calcio, Magnesio.

Se han calculado valores promedio de cada parámetro (Figura 3.1) para poder realizar una comparación con valores esperados en suelos utilizados para la agricultura (Tabla 3.2).

Figura 3.1

Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados obtenidos

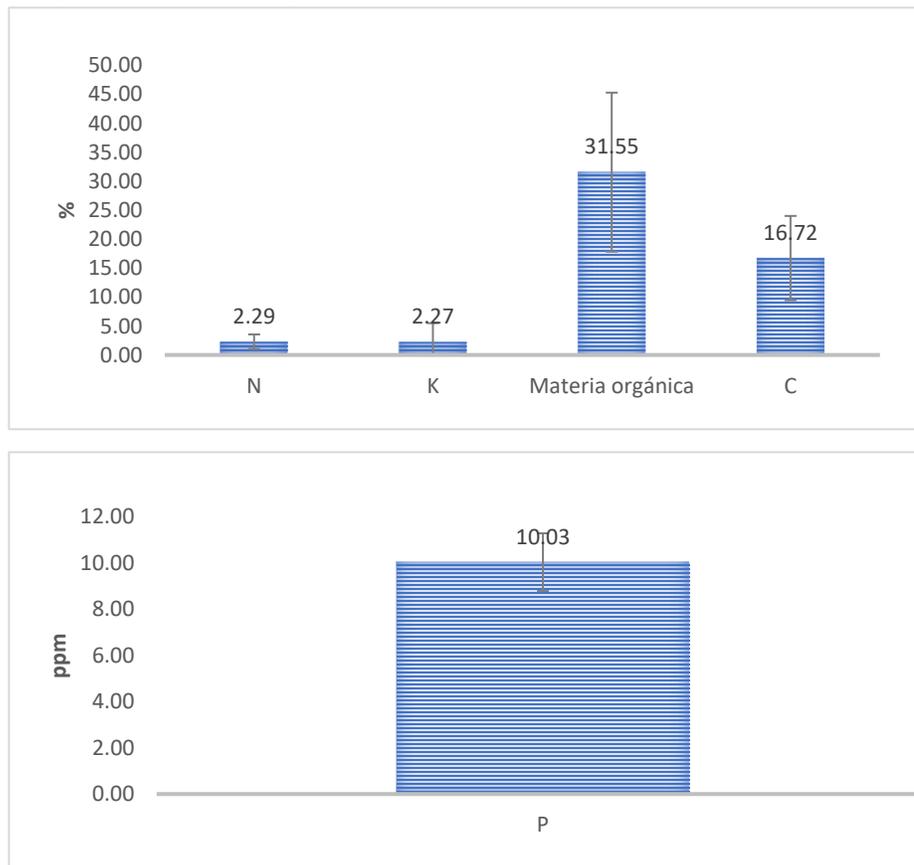


Tabla 3.2*Comparación de los resultados de nutrientes obtenidos*

Nutrientes	Unidad	Niveles Críticos (Bajo)	Niveles Críticos (Alto)	Resultado obtenido
MO	%	<1.2	>2.8	31.55
C	%	<1.2	>1.2	16.72
N	%	<0.1	>0.3	2.29
P	ppm	<12	>30	10.03
K	%	<0.12	>0.3	2.27

Los resultados en la Tabla 3.2 nos revelan que es un suelo rico en materia orgánica como su alto contenido de carbono también lo indica. Además, presenta una abundancia de nitrógeno, aunque el contenido de fósforo es bajo. Por otro lado, se encontró una alta cantidad de potasio (FAO, 2013).

En cuanto a la presencia de patógenos, la concentración de coliformes totales está sobre los niveles máximos permisibles. Según la (INCOTEC, 2004), “Para fertilizantes y acondicionadores orgánicos no se debe sobre pasar los 1000 UFC/g de enterobacterias totales”. En este caso, el valor de 45000 UFC/g es alto, aunque el resultado de E. coli (30 UFC/g) es bajo. En cualquier caso, indica que este suelo no podría ser utilizado como acondicionador de suelos.

2.2. Agua a la entrada y salida del Humedal

Tabla 3.3*Resultados de Laboratorio de muestra de aguas a la entrada y salida del Humedal.*

Datos	DBO5 [mg/l]		DQO [mg/l]		Fósforo Total [mg/l]	NKT [mg/l]	Sólidos Suspendidos Totales [mg/l]	Coliformes Totales [NMP/100ml]	Coliformes Termo tolerantes [NMP/100ml]	Parásitos [#1]	Áscaris SP [#1]
	E	S	E	S	S	S	S	S	S	S	S
Semana 1		13		127	1.87	5.4	82	7.80E+03	2.00E+03		
Semana 1		<4		83	1.27	5.12	10	3.30E+04	1.70E+04		
Semana 1		5		65	1.55	5.69	28	4.50E+03	2.00E+03		
Semana 2		11		37	0.99	5.97	31	2.00E+03	2.00E+03	0.2	0.2
Semana 2					0.99	2.94	12	3.30E+03	2.00E+02		
Semana 2	11	17	68,5	158							
Semana 3	3	18,5	4	5							
Semana 3	5		65								
Promedio	6.33	11.5	34.5	79.17	1.33	5.02	32.60	1.01E+04	4.64E+03	0.20	0.20
Desviación estándar	4.16	5.0	43.13	56.56	0.38	1.21	29.15	1.30E+04	6.95E+03		

En esta la Tabla 3.3 se observan los valores obtenidos por semanas para DBO₅, DQO, Fósforo Total, NKT, Sólidos Suspendidos Totales, Coliformes Termo tolerantes, Parásitos y Áscaris SP.

El valor de DQO en el punto de entrada, tuvo como resultado un valor medio de 34.5 mg/L, sin embargo, el resultado obtenido luego del análisis en el punto de salida dio un valor medio de 79.17 mg/L (Figura 3.2). Lo que quiere decir que de alguna manera el humedal contamina el agua cuando percola, aun así, el valor es bastante bajo, por lo tanto, está dentro del rango admitido que es 250 mg/L para descarga a cuerpos de agua dulce (Ley de Gestión Ambiental, 2009).

La DBO₅ registró una concentración media de 6.33 mg/L en el punto de entrada y en la salida tiene un valor medio de 11.50 mg/L (Figura 3.2) encontrándose por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental Según FAO (1995) y TULSMA (2003). Sin embargo, analizando el valor para las aguas que pueden ser reutilizadas para uso agrícola deben tener como el límite el valor es de 15 mg/L y para descarga a un cuerpo de agua dulce es de 50 mg/L, lo que indica que, aunque el agua que percola se contamina, puede ser reutilizada. Finalmente, el valor medio de sólidos suspendidos es de 32.60 mg/L (Figura 3.2), que es un valor admitido ya que tiene un máximo de 90 mg/L según FAO (1995).

En cuanto a los nutrientes, el valor del fósforo es 1.33 mg/l como se observa en la tabla 6 y según la (Ley de Gestión Ambiental, 2009), “el límite permitido para descargas a un cuerpo de agua dulce es de 15 mg/l”.

Figura 3.2

Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados para el DBO, DQO y SST.

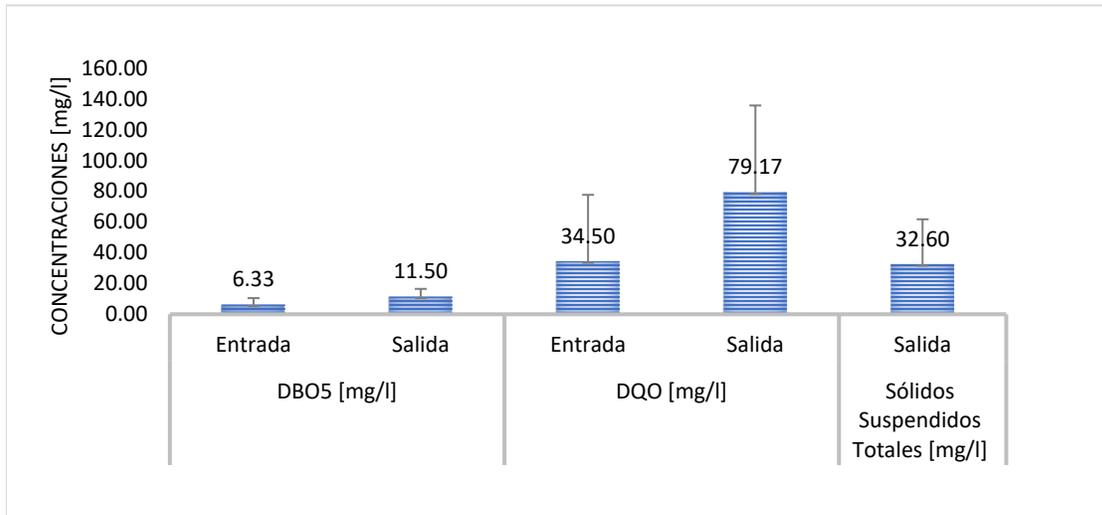
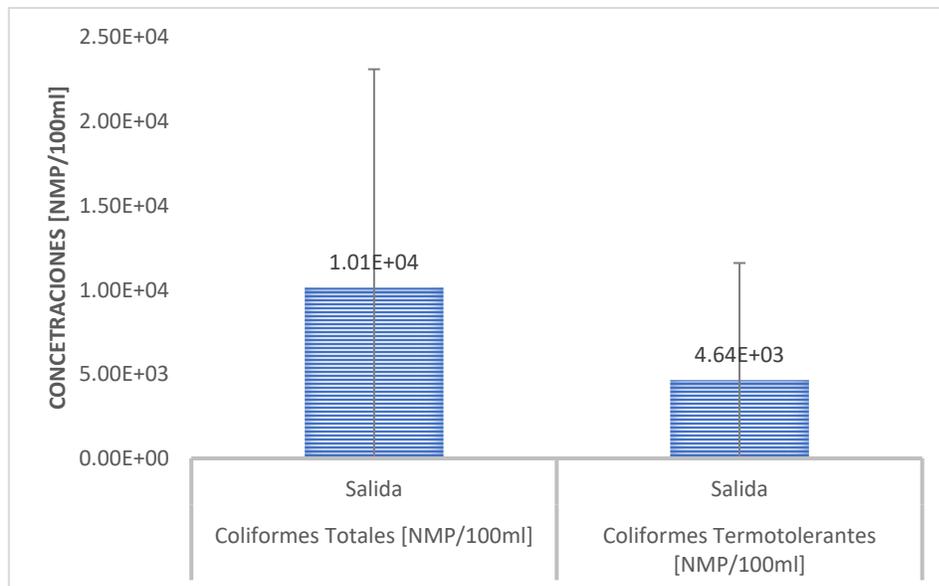


Figura 3.3

Gráfico de barras del promedio y desviación estándar de los resultados para los coliformes totales y coliformes termo tolerantes.



El análisis de la muestra de coliformes nos da un valor de 10120 por 100 ml (Figura 3.3) por lo que está por encima de los límites que es de 5000 por 100 ml Según la FAO (1995). Y el valor de coliformes totales es de 4640 por 100 ml (Figura 3.3) el cual también sobrepasa el límite para agua destina a uso de riego que es de 1000 por 100 ml Según la FAO (1995).

Debido a que el agua utilizada en la investigación fue recolectada de un tanque que previamente había sido utilizado para la descarga de aguas residuales, se debe considerar la posibilidad de que los coliformes totales estuvieran presentes en el agua recolectada. Es importante tener en cuenta que la vida de los coliformes en el agua puede durar desde días hasta meses, dependiendo de las condiciones ambientales (Iván et al., 2010). En este caso, al haber estado en un tanque de plástico, que proporciona un ambiente favorable para su supervivencia, se puede afirmar que la presencia de coliformes en el agua antes que percole en el humedal era una posibilidad. Sin embargo, se debe destacar que, debido a que no se realizaron muestras a la entrada del humedal, no se puede determinar con certeza si el agua ya estaba contaminada antes de pasar por el humedal o si se contaminó al percolar, o por los dos medios. De todas maneras, el agua necesitará un proceso de desinfección para poder utilizarse o se le podría dar otro uso.

3. Conclusiones

Los resultados mostraron que la capa de lodo formada sobre el humedal es rica en materia orgánica y carbono, lo cual es beneficioso para la fertilidad y estructura del suelo. También se observó un alto contenido de nitrógeno, lo que favorece el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el suelo presentó un bajo contenido de fósforo, lo que puede requerir enmiendas para mejorar su disponibilidad. Por otro lado, el contenido de potasio es adecuado para el desarrollo saludable de los cultivos.

Además, los resultados revelaron un contenido elevado de coliformes totales, lo cual indica una contaminación microbiana en el suelo. Además, aunque la presencia de *E. coli* es mínima, es esencial abordar esta situación para asegurar la ausencia de riesgos para la salud y tomar medidas para mejorar la calidad microbiológica del suelo si éste quiere utilizarse como fertilizante o acondicionador de suelos.

Los resultados de DQO y la DBO₅ del agua que percola a través del humedal, muestran que existe una contaminación en el agua a la salida. A pesar de esto, los niveles de contaminantes aún se encuentran dentro de los rangos permitidos establecidos por FAO (1995) y TULSMA (2003) para la descarga en cuerpos de agua dulce. Además, la concentración de DBO₅ en el agua tratada se encuentra por debajo de los estándares de calidad ambiental, lo que indica que puede ser reutilizada para uso agrícola. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la contaminación en el proceso de percolación. En cuanto a los sólidos suspendidos, el valor obtenido está muy por debajo del límite máximo permitido.

Los resultados del análisis de la muestra de coliformes indican que el agua que ha pasado por el humedal artificial no cumple con los límites establecidos por FAO, (1995) para ser utilizado en el riego, ya que los valores de coliformes totales y fecales son significativamente altos.

4. Lista de Referencias

- Alberto, W., Chafloque, L., & Guadalupe Gómez, E. (2006). *A design of an artificial marsh for treating waste water in the UNMSM* (Vol. 15).
- Álvarez, E. V., & Proaño, J. E. (2022). *Tratamiento de lodos de fosas sépticas en humedales de flujo vertical con período de retención de 7 días, en la ciudad de Cuenca- Ecuador*.
- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. In *Revista CENIC Ciencias Químicas* (Vol. 46).
- Arévalo, M. B., García, J. A., Narváez, A., & Andrés, A. (2020). *Modified First Stage of French Vertical Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Highlands: Start-Up of the System*.
- Carchi, W. J., & García, B. A. (2021). *Tratamiento de lodos de fosas sépticas con humedales de flujo vertical en Cuenca, Ecuador*.
- Castañeda, L. A., Alberto, L., & Sarmiento, C. (2017). *Una Revisión Sobre el Uso de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas en América Latina: Diseño, Operación y Resultados*.
<https://www.researchgate.net/publication/321197781>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Humedales para Tratamiento*.
- ENCA. (2016). *Estrategia nacional de calidad del agua*.
- EPA. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales -Humedales de flujo libre superficial EPA 832-F-00-024*.
- EPA. (2013). *Report on the 2013 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) International Decontamination Research and Development Conference*.
www.epa.gov/nhsrc
- FAO. (1995). *Normas oficiales para la calidad del agua Venezuela*.
- INCOTEC. (2004). *Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo*. NTC.
- Iván, R., Novelo, M., San, L., Cedillo, P., René, E., Borges, C., & Borges, E. V. (2010). Modelación del Tiempo de Conservación de Muestras Biológicas Agua. In *Rev. Int. Contam. Ambient* (Vol. 26, Issue 4).
- Koottatep, T., Surinkul, N., Polprasert, C., Kamal, A. S. M., Koné, D., Montangero, A., Heinss, U., & Strauss, M. (2005). Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate: Lessons learnt from seven years of operation. *Water Science and Technology*, 51(9), 119–126. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0301>

- Ley de Gestion Ambiental. (2009). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*.
- Manjate, E. S. (2016). *Behaviour evaluation of vertical flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage and septic tank sludge*.
- Marín, J. L., Sandoval, L. C., López, M. C., Sandoval, M., Meléndez, R. Á., González, H. R., & Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. In *Processes* (Vol. 11, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G., & Iwema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems. In *Water Science and Technology* (Vol. 51, Issue 9, pp. 11–21). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0277>
- Molle, P., Vincent, J., Troesch, S., & Malamaire, G. (2013). *Humedales artificiales utilizados en el tratamiento de lodos y fangos extraídos de fosas*. <http://ithe.fr/>,
- Rodriguez, D. C. (2020). Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del area superficial basado en la remoción de la materia organica. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 65–73. <https://doi.org/10.21500/20275846.4558>
- Rojas, F., & César, B. (2011). *Viviendo sin alcantarillado sanitario El negocio de la recolección de lodos fecales en 4 ciudades de América Latina*. www.wsp.org
- Sanjrani, M. A., Zhou, B., Zhao, H., Zheng, Y. P., Wang, Y., & Xia, S. B. (2020). Treatment of wastewater with constructed wetlands systems and plants used in this technology – a review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), 107–127. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_107127
- Strande, L., Ronteltap, M., & Brdjanovic, D. (2014). *Manejo de Lodos Fecales: Un enfoque sistémico para su implementación y operación* (L. Strande, M. Ronteltap, & D. Brdjanovic, Eds.; Primera Edición). IWA Publishing.
- Strauss, M., Agnes, M., Ingallinella, A. M., Koottatep, T., & Seth, A. L. (2000). *Cuando los tanques sépticos están llenos-el desafío del manejo y tratamiento de lodos fecales*. <https://www.researchgate.net/publication/228708167>
- TULSMA. (2003). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*. www.lexis.com.ec
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. In *Water (Switzerland)* (Vol. 2, Issue 3, pp. 530–549). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

Vymazal, J. (2011). Enhancing ecosystem services on the landscape with created, constructed and restored wetlands. *Ecological Engineering*, 37(1), 1–5.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2010.07.031>