

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Depuración de aguas residuales con colectores solares en un sistema de lombrifiltro para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Ronald Mamani Mamani
Daniel Josue Alvarez Rivas

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, febrero de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

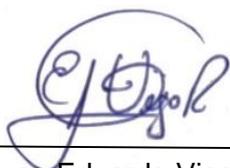
Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

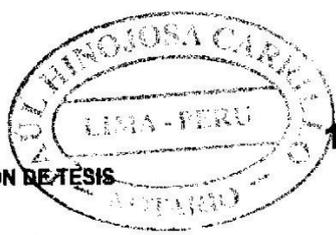
Que el presente informe de investigación titulado: **“DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON COLECTORES SOLARES EN UN SISTEMA DE LOMBRIFILTRO PARA LA REMOCIÓN DE ELEVADAS CARGAS ORGÁNICAS EN CONDICIONES ALTOANDINAS”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres **Ronald Mamani Mamani** y **Daniel Josue Alvarez Rivas** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 03 días del mes de mayo del año 2022



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera
Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 10 día(s) del mes de febrero del año 2022, siendo las 9:30 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Alex Danny Shambi Rodriguez, el secretario: Msc. Rose Adeline Gallata Shura y los demás miembros: Ing. Verónica Haydee Pari Mamani y el asesor: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Depuración de aguas residuales con colectores solares en un sistema de bambufiltro para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas

de el(los)/a(la)s bachiller(es): a) Ronald Mamani Mamani
 b) Daniel Josue Alvarez Rivas
 conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental
 (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueitas por el(los)/a(la)(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Ronald Mamani Mamani

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literar	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b): Daniel Josue Alvarez Rivas

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literar	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente [Firma]
Secretario

 Asesor _____
Miembro

 Candidato/a (a) _____
Candidato/a (b)

Depuración de aguas residuales con colectores solares en un sistema de lombrifiltro para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas

Ronald Mamani Mamani^{1*}, Daniel Josue Alvarez Rivas², Juan Eduardo Vigo Rivera³

¹Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú

²Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú

³Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.

*Autor para correspondencia: ronald.mm@upeu.edu.pe

Ronald Mamani Mamani <https://orcid.org/0000-0003-0777-2575>

Daniel Josue Alvarez Rivas <https://orcid.org/0000-0001-9577-783X>

Juan Eduardo Vigo Rivera <https://orcid.org/0000-0002-6597-7336>

Resumen

El sistema de alcantarillado en la ciudad de Juliaca no logra coberturar a toda la población, en consecuencia, muchos hogares optan por construir letrinas o fosas sépticas artesanales, eso conlleva encontrar nuevas alternativas para la depuración de las aguas residuales. El objetivo del estudio fue depurar aguas residuales en un sistema de lombrifiltro con colectores solares para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas a 3825 msnm. Se instalaron dos lombrifiltros conformados por cinco estratos consecutivos de piedra pómez, dos estratos de lombrices de la especie *Eisenia foetida*, carbón y arena; a un lombrifiltro se instaló un sistema de calentamiento solar con colectores planos de bajo costo, mientras que el otro fue el lombrifiltro control. Se monitoreó la DBO₅ y DQO cada 3 días en el periodo experimental de marzo a mayo (2021), conjuntamente con la temperatura de los estratos en cada lombrifiltro. El lombrifiltro con colectores solares tuvo una temperatura media de 17.44°C obteniendo mayor remoción de carga orgánica con un 66 y 53% para la DBO₅ y DQO; en comparación, al lombrifiltro control que tuvo una temperatura media de 11.88 °C con una remoción de 43 y 33% para la DBO₅ y DQO, respectivamente. El uso de colectores solares mejoró el acondicionamiento del estrato de las lombrices contribuyendo a una mejor depuración del agua residual en el lombrifiltro.

Palabras clave: lombrifiltro; *Eisenia foetida*; colector solar; depuración; carga orgánica.

ABSTRACT

The sewage system in the city of Juliaca does not cover the entire population, consequently, many households choose to build latrines or artisanal septic tanks, which entails finding new alternatives

for wastewater treatment. The objective of the study was to purify wastewater in a vermifilter system with solar collectors for the removal of high organic loads in high Andean conditions at 3825 meters above sea level. Two earthworm filters were installed, made up of five consecutive layers of pumice stone, two layers of earthworms of the *Eisenia foetida* species, charcoal and sand; a solar heating system with low-cost flat collectors was installed on one wormfilter, while the other was the control wormfilter. BOD5 and COD were monitored every 3 days in the experimental period from March to May (2021), together with the temperature of the strata in each vermifilter. The vermifilter with solar collectors had an average temperature of 17.44°C, obtaining a higher organic load removal with 66 and 53% for BOD5 and COD; in comparison, to the control vermifilter that had an average temperature of 11.88 °C with a removal of 43 and 33% for BOD5 and COD, respectively. The use of solar collectors improved the conditioning of the stratum of the worms, contributing to a better purification of the residual water in the wormfilter.

Keywords: wormfilter; *Eisenia foetida*; solar collector; depuration; organic load.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es indispensable, debido a que el vertimiento inadecuado de estas genera contaminación no solo de los diversos ecosistemas existentes sino también de las fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas, lo que amenaza la sostenibilidad y la salud de la población (Martínez, 2014; Cabezas, 2018). En el Perú, solo el 32 % de las aguas residuales generadas recibe tratamiento antes de su vertimiento (Lima, 2020). Ante esta problemática, surge la necesidad de tratar las aguas residuales con el fin de evitar o controlar la contaminación de los recursos hídricos y asegurar que pueda ser utilizada para diferentes fines (Martínez et al., 2011).

En la actualidad, el problema más frecuente que se encuentra en la ciudad de Juliaca es la baja cobertura del servicio de alcantarillado, debido a que la Entidad Prestadora de Servicio de Saneamiento (EPS SEDA JULIACA) solo logra abastecer al 60 % de la población juliaqueña (Yanqui, 2019). Ante esto, los pobladores que no cuentan con el servicio optan por la construcción de letrinas o fosas sépticas artesanales para el vertimiento de sus aguas residuales, lo cual constituye no solo un problema de contaminación de los recursos hídricos (Reyes y Morales, 2019) sino además un riesgo para la salud pública (Quispe y Casimiro, 2019) y la alteración del bienestar de la población. Según Huiza y Ordóñez (2018), la técnica de pared caliente representa un sistema eficiente para acondicionar el desarrollo de las lombrices y aumentar la temperatura en el lombrifiltro; obteniendo una remoción de 62.5% de DBO₅. Por otro lado, Castillo y Chimbo (2021), evaluaron la eficiencia de la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas mediante el uso de lombrifiltro,

conformado por 4 estratos (aserrín con lombrices *Eisenia foetida*, carbón activado, grava y piedras de río) obteniendo porcentajes de remoción de 52.3 y 66.7% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

El lombrifiltro es un método alternativo para el tratamiento de aguas residuales respecto a los tratamientos convencionales, poseen una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica (Maza, 2017). Este sistema de tratamiento aerobio utiliza microorganismos y lombrices californianas en el proceso (Saboya, 2021), quienes ingieren diariamente el 100 % de su peso en materia orgánica en descomposición, de la cual el 60 % es excretado como abono orgánico (Somarriba & Guzmán, 2004), por lo que precisa conservar ciertas condiciones operacionales para evitar cualquier daño en el mismo (Guillermo, 2019). La clave en el correcto funcionamiento de este sistema se encuentra en proporcionar una temperatura óptima para el desarrollo adecuado de la lombriz roja californiana (Ruiz et al., 2013). Este acondicionamiento se puede realizar a través de calentadores solares que aumenten no solo la temperatura del agua residual sino también del estrato donde se ubican las lombrices, representado un sistema de tratamiento ecológico e innovador que requiere una baja inversión, es eficiente y amigable con el ambiente al aprovechar la radiación solar de las zonas altoandinas.

El objetivo del presente trabajo fue depurar aguas residuales con colectores solares en un sistema de lombrifiltro para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el distrito de Juliaca con coordenadas UTM (381593 Este, 8288375 Norte), en la Región Puno – Perú a 3825 msnm, y los análisis se realizaron en los laboratorios de la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca. Se monitoreó la DBO₅ y DQO cada 3 días en el periodo experimental de marzo a mayo (2021), conjuntamente con la medición de la temperatura de los estratos en cada lombrifiltro. El agua residual que se depuró proviene de una fosa séptica de una vivienda familiar.

Diseño y construcción del lombrifiltro

La investigación consta de dos tratamientos individuales, se empleó un biofiltro dinámico aerobio de flujo vertical conocido como “Lombrifiltro” al que se le integró colectores solares (de ahora en adelante Lombrifiltro con colectores solares) y otro sistema con las mismas características, pero a temperatura ambiente altiplánica (de ahora en adelante Lombrifiltro control).

El sistema de lombrifiltro consta de un contenedor transparente de PVC (policloruro de vinilo) de 75 L que almacena el agua residual, seguido de una bandeja de 5 L que distribuye el agua residual a los estratos del lombrifiltro conformado por piedra pómez, seguida de dos estratos de humus con lombrices, luego por un estrato de carbón, finalmente por un estrato de arena tamizada contenidas por bandejas de 15L las cuales se encuentran sostenidas por una estructura metálica de 0.35, 0.54 y 1.25m de ancho, largo y alto, respectivamente. La Figura 1 muestra el diseño del lombrifiltro especificando los materiales y medidas que se usaron para la construcción de cada lombrifiltro.

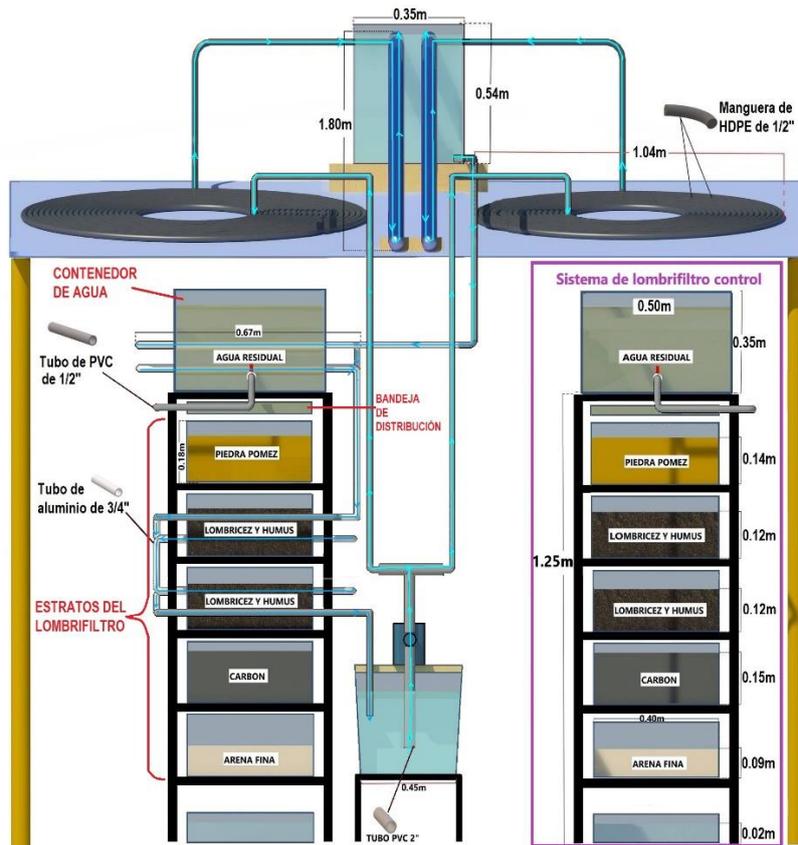


Figura 1. Vista frontal del diseño del lombrifiltro.

La tabla 1 indica el volumen que ocupa cada estrato colocado en el lombrifiltro.

Tabla 1

Volúmenes ocupados por los estratos que conforman el lombrifiltro

Estrato	Volumen (m ³)
Piedra pómez	0.016
Humus y lombrices	0.0144
Carbón	0.018
Arena fina	0.0108

Cada contenedor de los estratos fue perforado en la base con un diámetro de 2 mm en intervalos de 0.03x0.03m entre cada agujero. Se realizó el mismo procedimiento con las 2 bandejas distribuidoras de agua residual, el cual actuó como decantador primario. Las dimensiones de los contenedores y bandejas se aprecian en la Figura 2.

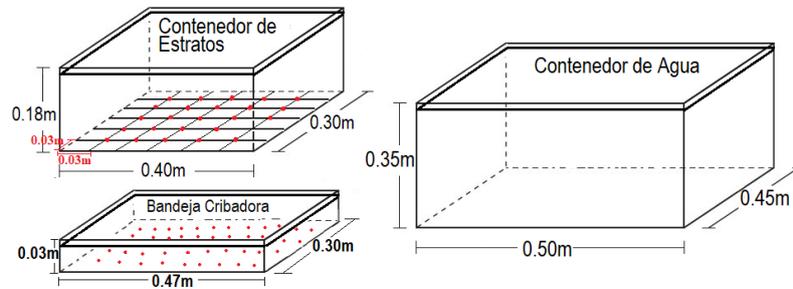


Figura 2. Dimensiones de los contenedores y bandejas que conforman el lombrifiltro.

Para el lombrifiltro con colectores solares se construyeron dos calentadores empleando una manguera de polietileno de alta densidad (HDPE) de Φ ½” con 100 m de longitud el cual fue dividido en 60 y 40m para cada colector solar, enrollándolo concéntricamente y colocado sobre una superficie de calamina para la refracción de los rayos solares que concentre el calor en la manguera de polietileno. También se utilizaron 2 tubos de vacío de 1.80 m de longitud, estos fueron conectados en un contenedor de 30L el cual actuó como un tanque de recirculación para el agua caliente; dentro de los tubos de vacío se introdujeron tubos de aluminio de Φ ¾” y 1.53 m de longitud, con el fin de impulsar el agua caliente que se encuentra dentro de los tubos de vacío hacia el contenedor para posteriormente descender, tal como se puede apreciar en la Figura 3.

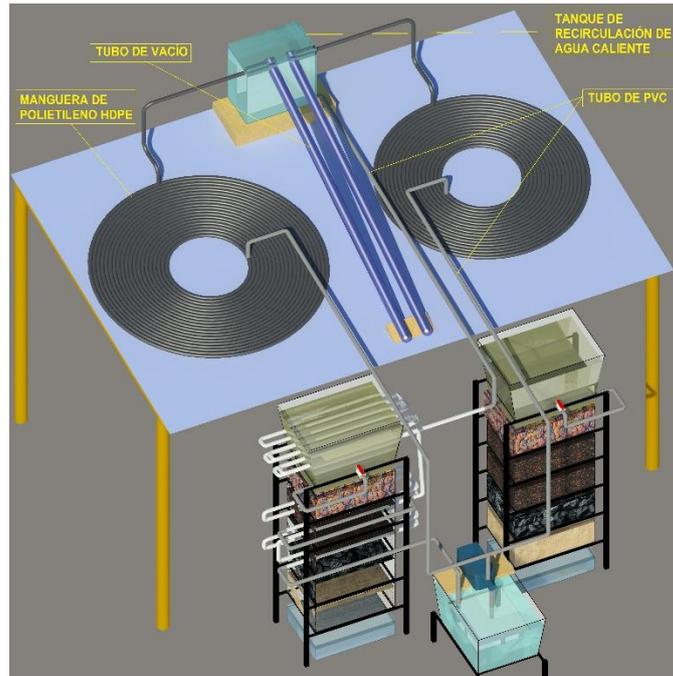


Figura 3. Vista isométrica de los colectores solares

Con el fin de incrementar la temperatura del agua residual vertida en el tanque de almacenamiento y en el estrato de las lombrices se insertaron 10 y 8 tubos de aluminio, la transferencia de calor por conducción se realizó mediante los tubos de aluminio conectados internamente con el tanque de almacenamiento y los estratos de las lombrices, finalmente se conectó al contenedor de recirculación de agua con la ayuda de una electrobomba centrífuga para llegar hacia los colectores solares, como se aprecia en la figura 4.

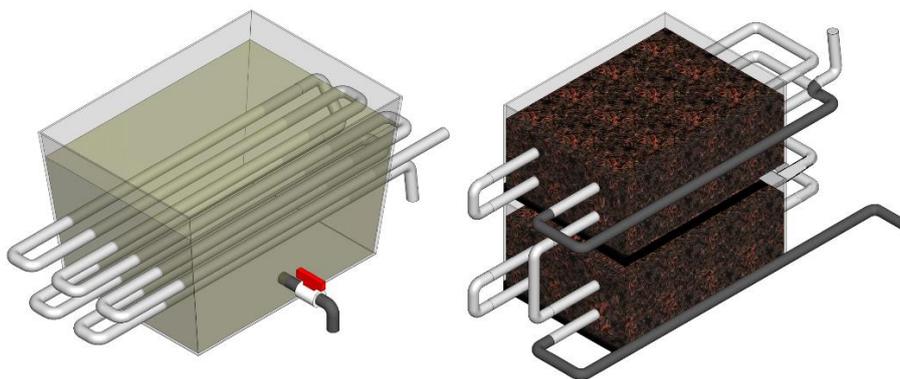


Figura 4. Vista isométrica del tanque de almacenamiento de agua residual (lado izquierdo) y el estrato de lombrices (lado derecho).

La cantidad de agua residual con alta carga orgánica tratada fue de 3L/día, dentro de un horario de 9 a.m. a 2 p.m., el horario fue establecido tomando en consideración que la temperatura ambiente es

mayor en dicho horario, por lo tanto, se pudo aprovechar al máximo los colectores solares. El tiempo de retención hidráulica de la primera prueba de los filtros fue de 15h 17min, seguido de las demás pruebas que tuvieron un tiempo de retención hidráulica de 13h 32min.

Densidad poblacional y adaptación de las lombrices californianas

Para el cálculo de la densidad poblacional se tomó en cuenta al autor Rivera (2017) quien menciona que la densidad poblacional de lombrices no puede superar más de 2.5kg/m², ya que su reproducción se realizaría en forma lenta por la competencia que se genera por alimento y espacio. Por consiguiente, se propuso la ecuación 1 para obtener una cantidad adecuada de lombrices en base al área disponible.

$$\frac{((2500g*(W))*(A))}{1m^2} \quad (1)$$

Donde, W=Peso promedio de lombrices (g), A= Área disponible (m²). Al reemplazar los datos en la fórmula (1), la cantidad de lombrices para cada estrato (Humus y lombrices) fue de 240, cada lombriz tenía un peso entre 0.24 a 1.8 gramos con un diámetro de 3 a 5 mm. Antes de colocar las lombrices en el lombrifiltro y ponerlas en contacto con el agua residual, fue necesario que pasen por un proceso de adaptación para que logren adecuarse a su nuevo ambiente, de lo contrario, la exposición directa a estos factores dañaría la epidermis de la lombriz e incluso experimentarían cambios bruscos en el medio o el hábitat que a su vez afectarían su metabolismo (Castillo & Chimbo, 2021).

En base a la investigación de Loro (2018), el proceso de adaptación duró 15 días, este consistió en regar diariamente 1 L de agua residual de la fosa séptica a una bandeja con sustrato (humus) donde se ubicaban todas las lombrices junto con estiércol, esto mejoraría la dinámica poblacional de la *Eisenia foetida* tal como concluye Loza et al. (2010).

Determinación del porcentaje de la eficiencia de remoción

Para evaluar la eficiencia del lombrifiltro con colectores solares y el lombrifiltro control se determinó el porcentaje de remoción de los parámetros analizados utilizando la ecuación 2 propuesto por el autor Caicedo (2017).

$$\% \text{ de remoción} = \frac{(\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final})}{(\text{Concentración inicial})} \times 100 \quad (2)$$

Análisis de datos estadísticos

Los resultados del porcentaje de remoción obtenidos se introdujeron y analizaron con los Softwares Excel versión 2016 y Statgraphics centurión v.19, para así realizar el análisis de comparación

mediante la prueba paramétrica T de Student para dos muestras independientes a un nivel de significancia de $P < 0.05$ y así determinar la diferencia de medias entre ambos lombrifiltros, se formularon las siguientes hipótesis:

H_0 : El lombrifiltro con colector solar y el lombrifiltro control remueven la misma cantidad de carga orgánica.

H_a : El lombrifiltro con colector solar tendrá una mayor eficiencia de remoción de la carga orgánica a diferencia del lombrifiltro control.

Seguido a esto se realizó el modelamiento lineal teniendo como variable predictor el tiempo (días) y variables de respuesta DBO_5 , DQO, enseguida se procedió a calcular las constantes de ajuste bajo el modelo “Y-Inversa Raíz Cuadrada de-X”.

RESULTADOS

La Figura 5 muestra el comportamiento promedio de la DBO_5 y las curvas de ajuste del modelamiento lineal; En la prueba inicial el agua residual presentó una concentración media de 568.7 mg/L de DBO_5 para ambos lombrifiltros, el lombrifiltro con colectores solares alcanza su mayor reducción en el día 21 con 169.5 mg/L y el lombrifiltro control alcanzó su mayor reducción en el día 12 con 283.7 mg/L de DBO_5 .

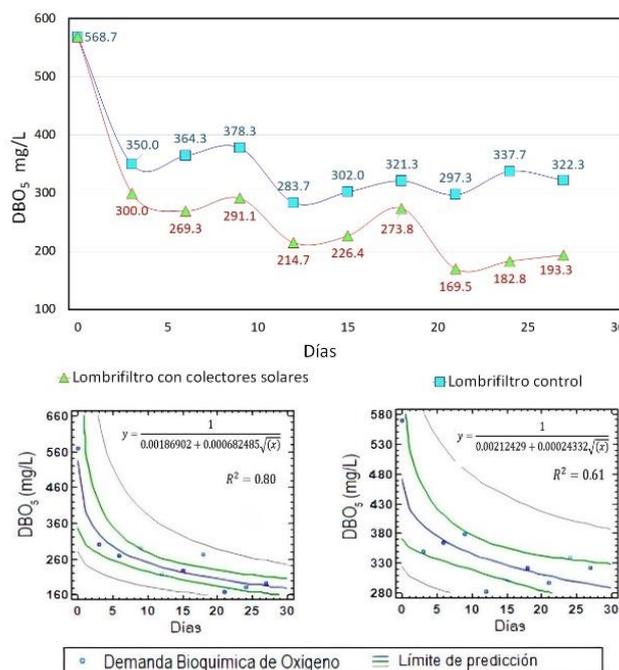


Figura 5. Parte superior: variación de la concentración de DBO_5 . Parte inferior: Ajuste con el modelo Y-Inversa raíz cuadrada de-X.

En el ajuste con el modelo “Y-Inversa raíz cuadrada de-X” se obtuvo un R^2 de 0.80 para el lombrifiltro con colectores solares, a diferencia del lombrifiltro control donde su R^2 es de 0.61; se aprecia que el lombrifiltro con colectores solares tiene un R^2 más representativo del modelo lineal con un mejor ajuste debido al acondicionamiento que se le dio al sistema del lombrifiltro.

La Figura 6 muestra el comportamiento promedio de la DQO y las curvas de ajuste del modelamiento lineal; En la prueba inicial el agua residual presentó una concentración media de 1078.3 mg/L de DQO para ambos lombrifiltros, el lombrifiltro con colectores solares alcanza su mayor reducción en el día 24 con 503.8 mg/L y el lombrifiltro control alcanzó su mayor reducción en el día 12 con 687.3 mg/L de DQO.

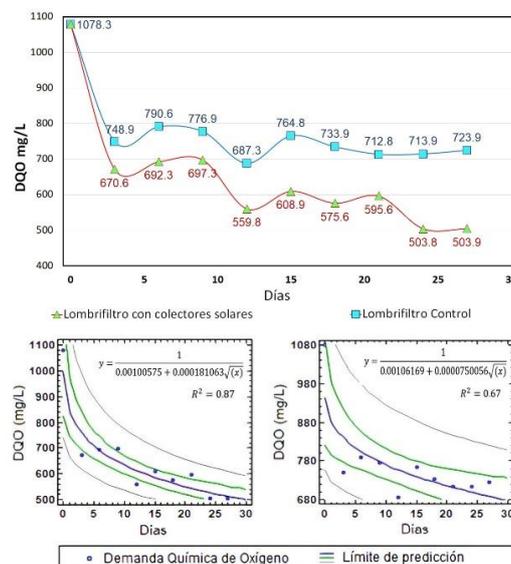


Figura 6. Parte superior: variación de la concentración de DQO. Parte inferior: Ajuste con el modelo Y-Inversa raíz cuadrada de-X.

En el ajuste con el modelo “Y-Inversa raíz cuadrada de-X” se obtuvo un R^2 de 0.87 del lombrifiltro con colectores solares, a diferencia del lombrifiltro control donde su R^2 es de 0.67; se aprecia que el lombrifiltro con colectores solares tiene un R^2 más representativo del modelo lineal con un mejor ajuste debido al acondicionamiento del sistema del lombrifiltro.

En la tabla 2 se puede apreciar los valores de los porcentajes de remoción en función de los días. Para el último día de depuración se logró reducir un 66% y 53 % de DBO₅ y DQO en el lombrifiltro con colectores solares, a comparación del lombrifiltro control que obtuvo un 43 y 33% de DBO₅ y DQO, respectivamente.

Tabla 2

Porcentaje de remoción en función de los Lombrifiltros

Tiempo (días)	Lombrifiltro con Colector Solar		Lombrifiltro Control	
	Remoción de DBO ₅		Remoción de DQO	
	%	%	%	%
0	0	0	0	0
3	47	38	38	31
6	53	36	36	27
9	49	33	35	28
12	62	50	48	36
15	60	47	44	29
18	52	43	47	32
21	70	48	45	34
24	68	41	53	34
27	66	43	53	33

Nota. Esta tabla muestra como varía el porcentaje de remoción de conforme van transcurriendo los días.

La figura 7 muestra el comportamiento de la temperatura de los estratos de los lombrifiltros y la temperatura ambiental durante el periodo experimental, la temperatura ambiental monitoreada presenta una media de 8.45 °C, por otro lado, la temperatura media obtenida en el lombrifiltro con colectores solares ascendió a 17.44 °C a diferencia del estrato del lombrifiltro control que obtuvo 11.88 °C.

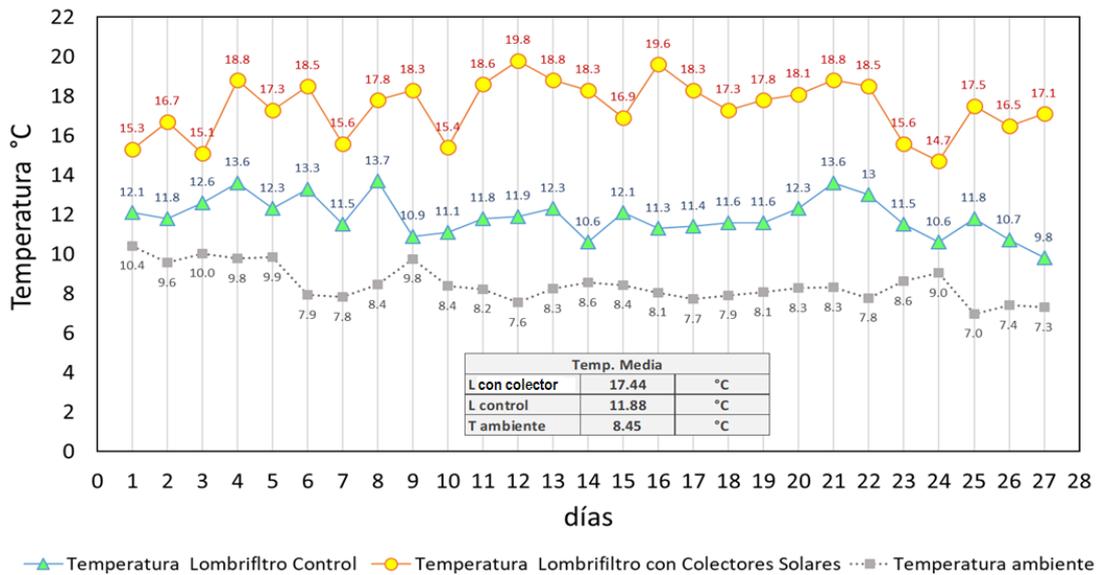


Figura 7. Variación de la temperatura del estrato de lombrices en ambos lombrifiltros.

Como se aprecia, el comportamiento de las temperaturas de los lombrifiltros es variable, el lombrifiltro con colectores solares al estar sometido a los sistemas de calentamiento solar presentó valores mayores que el lombrifiltro control que estuvo a una temperatura altiplánica.

Los resultados estadísticos de la prueba T de Student nos muestran que los valores de p-valor resultaron 0.039 para DBO₅ y 0.033 para DQO, como el p-valor es menor que 0.05 se acepta la hipótesis alterna, la cual indica una mejor eficiencia de remoción de los parámetros en el lombrifiltro con colectores solares.

DISCUSIONES

Con respecto a los valores de la tabla 2, la remoción de los parámetros de la DBO₅ y DQO para el lombrifiltro con colectores solares fueron superiores al 50% en la remoción de la carga orgánica a comparación del lombrifiltro control, que no logró superar este porcentaje en ninguno de los parámetros. Estos resultados son corroborados por Huiza y Ordoñez (2018), quienes determinaron la eficiencia de un lombrifiltro utilizando la técnica de pared caliente para tratar aguas residuales domésticas, con la que confirman una eficiencia de remoción superior al 50% de la carga orgánica. Así mismo, Castillo y Chimbo (2021) obtuvieron porcentajes de remoción de 52 y 67 % para DBO₅ y DQO, respectivamente.

Los valores mostrados en las figuras 5 y 6 nos muestran que el comportamiento del lombrifiltro con colectores solares se dividió en tres etapas (adaptación-estabilización-masificación) en la etapa de adaptación las lombrices comenzaron a disminuir su cantidad por las nuevas condiciones del ambiente altiplánico, en consecuencia, se obtuvieron elevados niveles de carga orgánica. Por otro lado, en la etapa de estabilización se observó mayor reducción de la carga orgánica por la rápida adaptación de las lombrices a su nuevo ambiente, mejorando su desarrollo, reproducción y consumiendo mayor cantidad de materia orgánica. Finalmente, en la etapa de masificación, donde las lombrices alcanzaron un número máximo al que recomienda Rivera (2017), se observó una gran cantidad de lombrices, esto dificultaba su movimiento impidiendo su alimentación adecuada y, en consecuencia, se obtuvo una baja reducción de la carga orgánica. Cabe mencionar que, el humus de las lombrices no fue retirado de los estratos produciendo un arrastre de tierra a las otras capas de los filtros y este terminó en la muestra final, aumentando la carga orgánica al final del tratamiento y esto conllevó a la saturación de la eficiencia de remoción de carga orgánica en el lombrifiltro.

Según el índice de biodegradabilidad – relación DBO₅/DQO propuesto por Ardila et al. (2012), la muestra inicial del agua residual presentó un valor de 0.53 por lo tanto, se puede afirmar que el agua residual de la fosa séptica es de naturaleza poco biodegradable.

Tabla 3

Criterios de biodegradabilidad según la relación DBO₅/DQO.

DBO₅/DQO	Carácter
>0.8	Muy biodegradable
0.7 – 0.8	Biodegradable
0.3 – 0.7	Poco biodegradable
<0.3	No biodegradable

Fuente: Ardila et al., 2012.

Pire et al. (2011) menciona que las características de biodegradabilidad son de vital importancia cuando se van a tratar aguas residuales, ya que los contaminantes orgánicos biodegradables son de fácil remoción siempre y cuando no se encuentren en elevadas concentraciones,

Los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual de la fosa séptica indicaron que este contiene elevados niveles de carga orgánica, encontrándose por encima de la concentración fuerte que clasifican los autores Metcalf & Eddy (2000), en su tabla de composición típica de un agua residual urbana según el nivel de concentración de los parámetros contaminantes.

Se confirma la conclusión de Kusanovic (2009), quien menciona que el lombrifiltro no genera olores debido a la cinética de tratamiento del sistema (aerobio), además no ocasiona lodos activos y se caracteriza por producir humus orgánico que se utiliza como fertilizante.

El ajuste realizado con el modelo de “Y-inversa raíz cuadrada de-X” en el programa Statgraphics centurión v.19 tuvo mayor aceptación, por tener resultados dentro del rango regular para posteriores días de depuración con el modelo lineal de cada parámetro respectivo; puesto que este sistema de lombrifiltro tiende a saturarse y colmatarse, no disminuyendo en su totalidad las cargas orgánicas.

CONCLUSIONES

La caracterización del agua residual proveniente de una fosa séptica presentó una elevada carga orgánica con concentraciones de 568.75 y 1078.25mg/L para la DBO₅ y DQO, presentando poca biodegradabilidad (DBO₅ /DQO=0.53).

Asimismo, se depuró el agua residual con alta carga orgánica en dos sistemas de lombrifiltros, determinándose como el más eficiente el lombrifiltro con colectores solares (temperatura media de 17.44°C) alcanzando una remoción de 66 y 53% para la DBO₅ y DQO, respectivamente. A comparación del lombrifiltro control (temperatura media de 11.88°C) que tuvo una remoción de 43 y 33% para la DBO₅ y DQO, respectivamente.

Finalmente, se concluye que el uso de colectores solares en condiciones altoandinas incrementó la adaptabilidad- estabilización-masificación de las lombrices californianas que contribuyeron en la depuración del agua residual con alta carga orgánica en el lombrifiltro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ardila, A. N., Reyes Calle, J., Arriola Villaseñor, E., & Alfredo Hernández, J. (1900). Remoción fotocatalítica de DQO, DBO₅ Y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *Revista Politécnica*, 8(9), 15, 9–17. <https://bit.ly/2Xyrgw4>
- Bermúdez, G. W. (2019). *Tratamiento de agua residual del camal municipal de Chimbote, usando un Biofiltro de lombrices, para el riego de parques y jardines* [Tesis de licenciatura, Universidad San Pedro]. <https://bit.ly/39hJVzO>
- Bernal-Martínez, L. A. et al. (2011). Tratamiento de agua residual municipal por un sistema fisicoquímico y oxidación química en flujo continuo. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(2), 69–81. <https://bit.ly/3lGPQ7q>
- Cabezas, C. A. (2018). *Remoción de huevos, larvas y quistes de enteroparásitos en las plantas de tratamiento de aguas residuales de los distritos de Huanta y Luricocha, Ayacucho 2017* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://bit.ly/2Z3Jwiuç>
- Caicedo, J. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de Eisenia foetida y agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Riobamba 2015* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <https://bit.ly/3p3btRS>
- Castillo, J. G., & Chimbo, J. E. (2021). Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales. *Enfoque UTE*, 12(2), 80–99. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746>
- Corcoran, E. et al. (2010). Sick water? The central role of wastewater management in sustainable development- A rapid response assessment. <https://bit.ly/3koWaAZ>
- Huiza, J. K. y Ordoñez, N. G. (2018). *Eficiencia de lombrifiltro implementando la técnica de pared caliente en el tratamiento de aguas residuales domésticas del centro poblado de Huaylacucho del distrito de Huancavelica-2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://bit.ly/2XsCh2U>
- Kusanovic, M. (2009). *Planta de Tratamiento de Riles* [Tesis de licenciatura, Universidad de Mangallanes]. <https://bit.ly/3zsU4Eq>

- Lima, L. M. (2020). *Efecto del vertimiento de aguas residuales domiciliarias en la calidad del agua en el río Sicra Lircay – Huancavelica 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. <https://cutt.ly/JmIZhN8>
- Loro, A. C. (2018). *Evaluación de la eficiencia del tratamiento secundario de aguas residuales domésticas utilizando un biofiltro con eisenia foetida y un biofiltro convencional* [Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Sur]. <https://bit.ly/2Xxtwo5>
- Loza, M. et al. (2010). Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(4), 555–565. <https://bit.ly/3AwfnXe>
- Martínez, P. A. (2014). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas* [Tesis doctoral, Universidad de Murcia]. <https://bit.ly/3tV5LCF>
- Maza, J. (2017). *Lombrifiltro para mejorar la calidad de las aguas residuales* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. <https://bit.ly/3tThwcQ>
- Metcalf y Eddy, 2000. *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización*. México, D.F. 752p.
- Peña, B. S. (2018). *Evaluación de la eficiencia del tratamiento secundario de aguas residuales domésticas utilizando un biofiltro con eisenia foetida y un biofiltro convencional* [Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Sur]. <https://bit.ly/3lCbOsd>
- Pire, M. C. et al. (2011). Biodegradabilidad de las diferentes dracciones de agua residual producidas en una tenería. *Ciencia e Ingeniería neograndina*, 21(2), 5–19. <https://doi.org/10.18359/rcin.257>
- Quispe, A. y Casimiro, W. (2019). Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domesticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica. *Cátedra Villarreal*, 7(1), 66–67. <https://doi.org/10.24039/cv201971325>
- Ramón, J. A. et al. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46–54. <https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
- Reyes, J. F. y Morales, E. (2019). Eficiencia del tratamiento de aguas residuales utilizando lombrices californianas (*Eisenia foétida*) y el jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*), Chachapoyas, 2018. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(1), 33. <https://doi.org/10.25127/ucni.v2i1.445>
- Rivera, P. A. (2017). *Producción de Bioabono, mediante el uso de la lombriz roja californiana (Eisenia foetida)* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://bit.ly/3APO6iF>

- Ruiz, M. et al. (2013). Biodegradabilidad de artículos desechables en un Sistema de Composta con Lombriz. *Información Tecnológica*, 24(2), 47–56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200007>
- Saboya, X. V. (2021). Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas. *Revista Muro de la Investigación*, 6(1), 60–83. <https://doi.org/10.17162/rmi.v6i1.1439>
- SENAMHI. (2020). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
- Somarriba, R. J., & Guzmán, F. (2012). Guía de Lombricultura. In F. Alemán (Ed.), *Lombricultura una alternativa de producción* (4th ed., Issue 4). <https://bit.ly/3u6unZ9>
- Vásquez, S. D. (2014). Caracterización de los lodos provenientes de las fosas sépticas de Zamorano para la selección de alternativas de tratamiento [Tesis de Licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras]. <https://bit.ly/3lVwMCf>
- Yanqui, Y. J. (2019). *Evaluación de tecnologías no convencionales para el tratamiento de aguas residuales en zonas urbano-marginales de la ciudad de Juliaca* [Tesis de licenciatura, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. <https://bit.ly/3m9xMDh>