

EFICIENCIA DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*) EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Deybi Karin Cáceres Poma^{1a}, Gisela Milagros Calisaya Vera^{2b}, Edgar Virgilio Bedoya Justo^{3c}

RESUMEN

Objetivo. Evaluar la eficiencia de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Moquegua. **Materiales y métodos.** Se tomó una muestra representativa de aguas residuales domésticas (afluente), la cual fue analizada considerando parámetros físicos (temperatura y STS), químicos (pH y DBO₅) y microbiológicos (coliformes termotolerantes), para determinar su estado inicial. Este afluente –previo tratamiento preliminar– pasó a través de un proceso de tratamiento con las lombrices, en estructuras denominadas lombrifiltros, siendo evaluado en función de distintas tasas de riego: A₁ (0,5 [m³/día]/m²), A₂ (1 [m³/día]/m²) y A₀ (grupo control). Los efluentes de dichas unidades se analizaron considerando los mismos parámetros establecidos para el afluente, cada uno con dos repeticiones; la prueba estadística aplicada fue el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey. **Resultados.** Se mostró mayor remoción de STS en A₁, y mayor descenso de la temperatura y coliformes termotolerantes en A₂; mientras que, tanto A₁ como A₂, mostraron la mayor eficiencia respecto a la DBO₅ y pH, por lo que se determinó un descenso medio de 0,82 °C, 61,11% de STS, 50,14% de DBO₅, 99,71% de coliformes termotolerantes, y un pH final de 8,27.

Palabras clave: Tratamiento; Agua residual; *Eisenia foetida*; Lombrifiltro.

EFFICIENCY OF THE RED CALIFORNIAN RED WORM (*Eisenia foetida*) IN THE TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER

ABSTRACT

Objective. Evaluate the efficiency of the red Californian earthworm (*Eisenia foetida*) in the treatment of domestic wastewater in Moquegua. **Materials and methods.** In this research consisted in taking a representative sample of domestic wastewater (tributary), which was analyzed considering physical parameters (temperature and STS), chemical (pH and BOD₅) and microbiological (thermotolerant coliforms), to determine its initial state. This tributary –previous preliminary treatment– passed through a treatment process with the earthworms, in structures called earthworm-filters, being evaluated according to different irrigation rates: A₁ (0,5 [m³/day]/m²), A₂ (1 [m³/day]/m²) and A₀ (control group). The effluents of those units were analyzed considering the same parameters established for the tributary, each one with two repetitions, applying the analysis of variance (ANOVA) as a statistical test, and the Tukey test. **Results.** Showed a better removal of STS in A₁, and greater decrease in temperature and thermotolerant coliforms in A₂; while, both A₁ and A₂, showed the highest efficiency with respect to BOD₅ and pH, determining an average decrease of 0,82 °C, 61,11% of STS, 50,14% of BOD₅, 99,71% of thermotolerant coliforms, and a final pH of 8,27.

Key words: Treatment; Wastewater; *Eisenia foetida*; Earthworm-filter.

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad José Carlos Mariátegui. Moquegua, Perú.

² Ingeniero Ambiental. Tesis para título universitario.

³ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad José Carlos Mariátegui. Moquegua, Perú.

^b Ingeniero Ambiental. Tesis para título universitario.

^c Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad José Carlos Mariátegui. Moquegua, Perú

^c Docente ordinario, asesor. Dr. en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de contaminación al que nos enfrentamos hoy en día es el inadecuado manejo de las aguas residuales domésticas, cuyo vertimiento a cuerpos de agua y su reutilización, sin un tratamiento previo adecuado, constituye no solo un problema de contaminación de los recursos hídricos y la pérdida de ecosistemas, sino también un riesgo para la salud pública y la alteración del bienestar de la población.

Tal es el caso de la región Moquegua, en donde el porcentaje de tratamiento de agua residual apenas alcanza el 27,96%, debido a la falta de plantas de tratamiento de agua residual y a que las existentes se encuentran colapsadas, o no cuentan con un diseño apropiado, tal como indican las normas sanitarias ⁽¹⁾. Por tal motivo, y como ocurre a nivel nacional, la población que no cuenta con servicios de saneamiento vierte sus aguas residuales sin tratamiento a los cuerpos de agua natural, quebradas y terrenos baldíos, o las emplea para el riego de cultivos, lo que representa un riesgo para la salud y el ambiente ⁽²⁾.

Ante esta situación, y conociendo que los sistemas convencionales actuales de tratamiento de aguas residuales, a pesar de su eficacia, implican altos costos de construcción, operación y mantenimiento, requieren de personal calificado y generan subproductos no deseables (lodos), es que se propone la presente investigación, cuyo objetivo es evaluar la eficiencia de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La lombriz roja californiana es la especie que más se cultiva actualmente en el mundo, no solo porque se adecúa mejor al cautiverio sin fugarse ⁽³⁾, sino también debido a su «rusticidad, tolerancia a los factores ambientales (humedad, temperatura y pH), potencial reproductor y capacidad de apiñamiento»⁽⁴⁾. La temperatura óptima para su desarrollo fluctúa entre 15 y 25 °C ⁽³⁾, y el pH deseable en el sustrato en el que se desarrolla debe oscilar entre 6,0 y 8,0 ⁽⁵⁾.

Este anélido fotofóbico se alimenta de todo tipo de materia orgánica, sea de origen animal o vegetal (poca selectividad), parcial o totalmente

descompuesta ⁽⁴⁾. Es capaz de producir deyecciones ricas en flora bacteriana (2×10^{12} bacterias/g de humus), consideradas como un excelente abono orgánico ⁽⁶⁾. Además, no adquiere ni transmite enfermedades, debido a que los organismos patógenos (hongos, bacterias y protozoos) forman parte de su dieta alimenticia, destruyéndolos al digerirlos y convirtiéndolos en componentes de sus deyecciones ⁽⁷⁾.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales con lombricultura son sistemas biológicos de flujo vertical basados en la aplicación de lombrices para el tratamiento de aguas residuales. A través de este proceso, el agua residual percola por los distintos estratos del medio filtrante, quedando retenida en las capas superiores la materia orgánica, la cual luego es consumida por las lombrices y organismos asociados ⁽⁸⁾. Estos constituyen sistemas globales, pues no separan los procesos en tratamientos primarios, secundarios o terciarios, sino que las funciones que estas tecnologías realizan en forma separada son cumplidas por un único proceso ⁽⁹⁾.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de la investigación

El agua residual que ingresó a este sistema, al cual se denominó afluente, pasó por un proceso de tratamiento preliminar consistente en una cámara de rejillas, cuya finalidad fue la de retener los sólidos gruesos; siguiendo hacia un *proceso de presedimentación*, para retener sólidos suspendidos de menor tamaño, factibles de decantar, como material fino, arena u otro elemento no retenido en la cámara de rejillas.

Previo a la presedimentación, se realizó el análisis del afluente, considerando los siguientes parámetros:

- Análisis físico: temperatura y sólidos totales en suspensión (STS).
- Análisis químico: pH y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).
- Análisis microbiológico: coliformes termotolerantes.

A la salida del proceso de presedimentación, el agua residual fue sometida a un tratamiento con la lombriz roja californiana, siendo evaluado en función de diferentes tasas de riego: A_1 : $0,5 \text{ (m}^3/\text{día)/m}^2$, A_2 : $1 \text{ (m}^3/\text{día)/m}^2$ y A_0 : grupo control (agua residual sin tratamiento).

Según se puede apreciar en la Figura 1, el agua residual pasó de forma paralela a dos lombrifiltros de un área total de $0,15 \text{ m}^2$ (50 cm de largo por 30 cm de ancho), superficie equivalente a una escala 1:4 del modelo presentado por Jordán ⁽¹⁰⁾; los cuales estuvieron conformados por un lecho donde habitaron en mancomunidad microorganismos y lombrices, en un soporte constituido por tres capas: la primera de aserrín y viruta, la segunda de grava, y la tercera de bolones ⁽¹⁰⁾. Adicionalmente, se añadió una capa de arena gruesa entre la capa de aserrín y viruta, y la capa de grava, quedando conformado de la siguiente manera, en orden descendente:

- 01 estrato con sustrato y lombrices rojas californianas (2 cm).
- 01 estrato de viruta con aserrín, ambos de madera blanca (25 cm de espesor).
- 01 estrato de arena gruesa (10 cm de espesor).
- 01 estrato de piedra triturada de río (\varnothing 6,4 - 9,5 mm) (15 cm de espesor).
- 01 estrato de bolones (piedra de río) (de 10 cm de espesor).

Asimismo, se instaló un doble fondo, ductos de ventilación, y un sistema de riego por goteo que distribuyó el agua residual diariamente sobre la superficie del lombrifiltro, a un caudal continuo de 0,10 L/min en A_1 y 0,05 L/min en A_2 ; basados en Guzmán (2004), que afirma que para tratar 1 m^3 de agua residual se necesita 1 m^2 efectivo de biofiltro, así como en la investigación realizada por Ramón *et al.* (2015) que mostró buenos índices de eficiencia a 0,050 L/min (equivalente para este caso a $0,5 \text{ [m}^3/\text{día)/m}^2$).

Luego de 7 días de haber alimentado diariamente los lombrifiltros, se analizaron los efluentes a la salida de cada tratamiento, considerando los mismos parámetros analizados en el afluente.



Figura 1. Vista general del sistema de tratamiento (izquierda); estratos conformantes de cada lombrifiltro (derecha).

Población y muestra

La población de este estudio estuvo conformada por las aguas residuales generadas en el distrito de Moquegua. La muestra fue extraída de las lagunas de estabilización San Antonio, en horas de máxima y mínima producción para su posterior homogeneización.

Técnica e instrumentos de recolección de datos

Como técnica de recolección de datos se utilizó el monitoreo de aguas residuales, tanto para el afluente como para los efluentes a la salida de cada lombrifiltro. Para lo cual se empleó la ficha de registro de datos de campo y la ficha de registro de resultados del monitoreo, como instrumentos de recolección, las cuales se elaboraron en base a la Resolución Ministerial 273-2013-VIVIENDA - Aprueban el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

Análisis de muestras

Con la finalidad de caracterizar el afluente y evaluar los efectos del tratamiento con la lombriz roja californiana, se seleccionaron parámetros físicos, químicos y microbiológico del Decreto Supremo 003-2010-MINAM - Aprueba los límites máximos permisibles para efluentes de las plantas

de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales ⁽¹¹⁾, y las directrices sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La toma y preservación de muestras, al igual que la medición de los parámetros de campo (temperatura y pH) se ejecutaron considerando las recomendaciones de la Resolución Ministerial 273-2013-VIVIENDA.

RESULTADOS

Características físicas, químicas y microbiológicas del afluente

Los resultados del análisis de los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos del afluente, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización física, química y microbiológica del afluente

Parámetro	Unidad	Valor obtenido
Parámetros físicos		

Parámetro	Unidad	Valor obtenido
Temperatura	°C	25,50
STS	mg/L	99,00
Parámetros químicos		
pH	unidad	7,38
DBO ₅	mg/L	188,13
Parámetros microbiológicos		
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de investigación y servicios [LABINVSERV], 2018; Laboratorio de Salud Ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

Características físicas, químicas y microbiológicas de los efluentes

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos luego del análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente a la salida del tratamiento con lombrices, en función de distintas tasas de riego (A₁ y A₂).

Tabla 2. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con lombrices

Parámetro	Unidad	Efluente 1 A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²		Efluente 1 A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²		Efluente 1 A ₀ : Grupo control	
		r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	25,20	25,30	23,90	24,30	25,50	25,50
STS	mg/L	34,00	32,00	46,00	42,00	99,00	99,00
Parámetros químicos							
pH	unidad	8,35	8,27	8,21	8,25	7,38	7,38
DBO ₅	mg/L	95,77	90,98	96,64	91,81	188,13	188,13
Parámetros microbiológicos							
Coliformes termotolerantes	NMP/100.mL	1,1x10 ⁵	1,0x10 ⁵	3,5x10 ⁴	3,3x10 ⁴	2,4x10 ⁷	2,4x10 ⁷

Nota: r₁ = primera repetición; r₂ = segunda repetición.

Fuente: LABINVSERV, 2018; Laboratorio de Salud Ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018(11)

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA), aplicado a los parámetros físicos (temperatura y STS), químicos (pH y DBO₅) y microbiológicos (coliformes termotolerantes) a la salida de cada uno de los tratamientos, permitieron observar que la diferencia de medias de estos fue altamente significativa, según se muestra en las tablas 3, 5 y 7. Por lo tanto, con un nivel de confianza

del 99%, se tuvo como resultado que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre los parámetros de estudio fue distinto en todos los casos, por lo cual se procedió a realizar la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5%.

Análisis físico

Tabla 3. ANOVA para los indicadores temperatura y STS, entre tratamientos, a los 7 días

Fuentes de variación	GL	Temperatura					STS				
		SC	CM	F _{cal.}	p-valor	Sig	SC	CM	F _{cal.}	p-valor	Sig
Tratamientos	2	2,23	1,12	39,353	0,007	**	5001,33	2500,67	750,200	0,000	**
E. experimental	3	0,09	0,03				10,00	3,33			
Total	5	2,32					5011,33				

** = altamente significativo.

Tabla 4. Prueba de Tukey (0,05) para los indicadores temperatura y STS, entre tratamientos, a los 7 días

N.º	Tratamientos	Temperatura			Tratamientos	STS		
		\bar{X} (°C)	Sig	Mérito		\bar{X} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	24,10	a	1º	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	33,00	a	1º
2	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	25,25	b	2º	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	44,00	b	2º
3	A ₀ : Grupo control	25,50	b	2º	A ₀ : Grupo control	99,00	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey, mostrados en la Tabla 4, expresan que el tratamiento más efectivo en la reducción del parámetro temperatura a los 7 días fue A₂, con un promedio de 24,10 °C; seguido en segundo y último lugar por A₁ y A₀, (Figura 2).

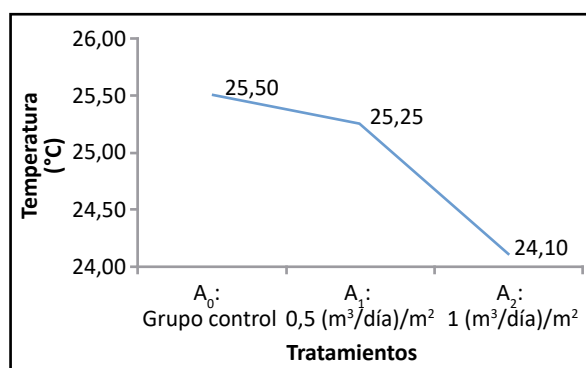


Figura 2. Prueba de Tukey (0,05) del indicador temperatura, entre tratamientos, a los 7 días

Respecto a los STS, los resultados de la prueba de Tukey (Tabla 4), revelan que el tratamiento más efectivo en la remoción de STS a los 7 días fue A₁, con un promedio de 33,00 mg/L, seguido por A₂, y en tercer y último lugar por A₀ (Figura 3).

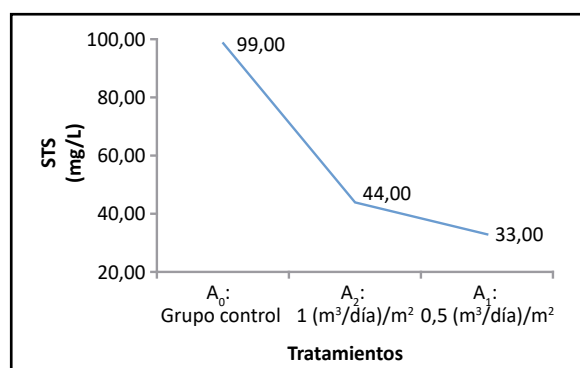


Figura 3. Prueba de Tukey (0,05) del indicador STS, entre tratamientos, a los 7 días

Análisis químico

Tabla 5. ANOVA para los indicadores pH y DBO₅, entre tratamientos, a los 7 días

Fuentes de variación	GL	pH					DBO ₅				
		SC	CM	F _{cal.}	p-valor	Sig	SC	CM	F _{cal.}	p-valor	Sig
Tratamientos	2	1,06	0,53	398,450	0,000	**	11864,92	5932,46	769,234	0,000	**
E. experimental	3	0,00	0,00				23,14	7,71			
Total	5	1,07					11 888,06				

** = altamente significativo.

Tabla 6. Prueba de Tukey (0,05) para los indicadores pH y DBO₅, entre tratamientos, a los 7 días

N.º	Tratamientos	pH			DBO ₅			
		\bar{X} (unidad)	Sig	Mérito	Tratamientos	\bar{X} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₀ : Grupo control	7,38	a	1º	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	93,38	a	1º
2	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	8,23	b	2º	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	94,23	a	1º
3	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	8,31	b	2º	A ₀ : Grupo control	188,13	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey, expuestos en la Tabla 6, muestran que el tratamiento que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad a los 7 días fue A₀, con un promedio de 7,38 unidades, seguido en segundo y último lugar por A₂ y A₁, respectivamente (Figura 4).

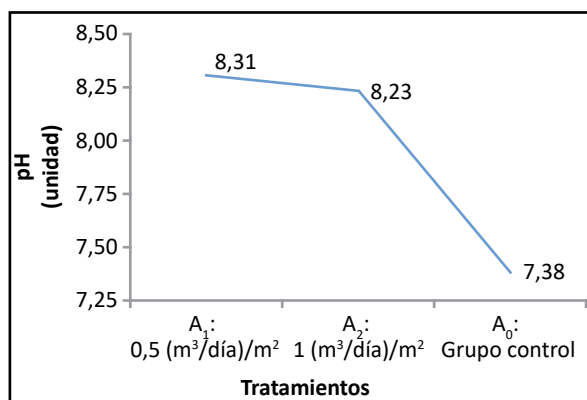


Figura 4. Prueba de Tukey (0,05) del indicador pH, entre tratamientos, a los 7 días

Con relación a la DBO₅, los resultados de la prueba de Tukey (Tabla 6), expresan que los tratamientos evaluados: A₁ y A₂ fueron los más efectivos en la remoción de la DBO₅ a los 7 días, con promedios de 93,38 y 94,23 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por A₀ (Figura 5).

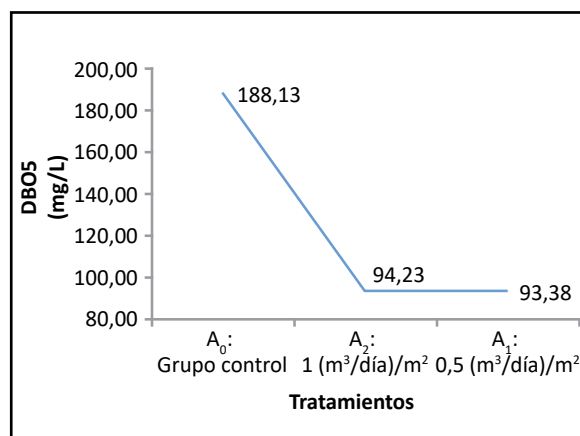


Figura 5. Prueba de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, entre tratamientos, a los 7 días

Análisis microbiológico

Tabla 7. ANOVA para el indicador coliformes termotolerantes, entre tratamientos, a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	F _{cal.}	p-valor	Sig
Tratamientos	2	7,64 x 10 ¹⁴	3,82 x 10 ¹⁴	2,20 x 10 ⁷	0,000	**
E. experimental	3	5,20 x 10 ⁷	1,70 x 10 ⁷			
Total	5	7,64 x 10 ¹⁴				

** = altamente significativo.

Tabla 8. Prueba de Tukey (0,05) para el indicador coliformes termotolerantes, entre tratamientos, a los 7 días

N.º	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	34 000,00	a	1º
2	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	105 000,00	b	2º
3	A ₀ : Grupo control	24 000 000,00	c	3º

La prueba de Tukey (Tabla 8), muestra que el mejor tratamiento para la remoción de coliformes termotolerantes a los 7 días fue A₂, con un promedio de 3,40 x 10⁴ NMP/100 mL; seguido en segundo y último lugar por A₁ y A₀, (Figura 6).

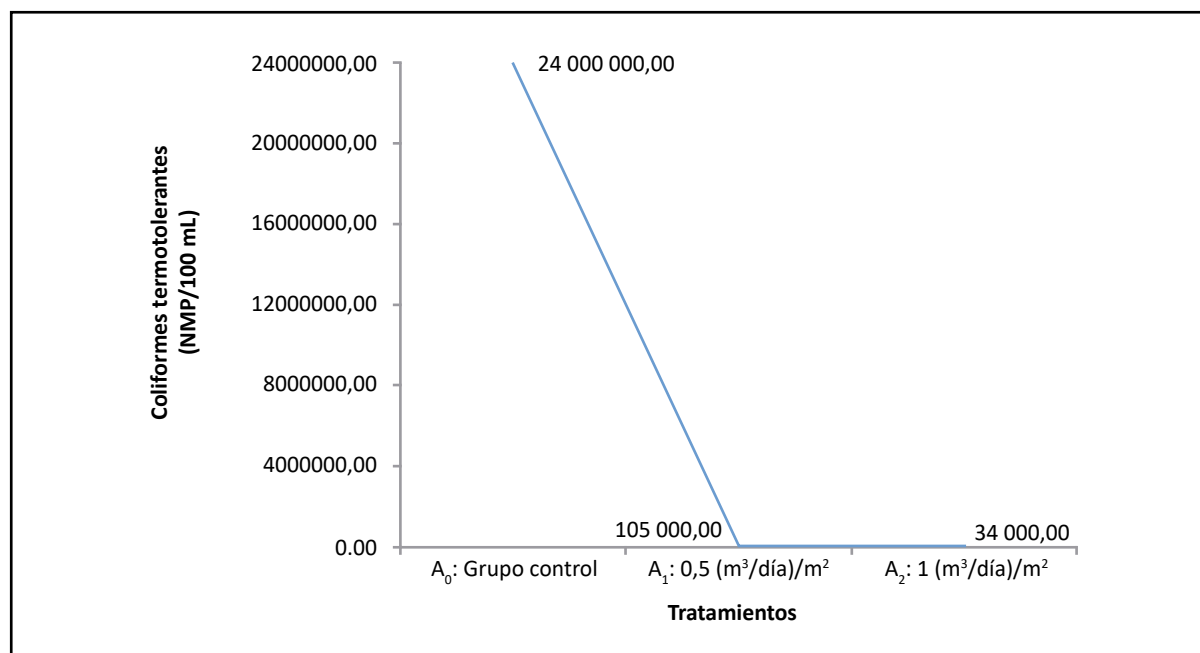


Figura 6. Prueba de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, entre tratamientos, a los 7 días

Grado de reducción por parámetro de evaluación

En las tablas 9 y 10 se muestra el grado de reducción, respecto al afluente, de cada uno de los parámetros

evaluados a la salida de los tratamientos con lombrices.

Tabla 9. Grado de reducción de la temperatura, STS y pH a la salida de cada tratamiento

Tratamientos	Temperatura			STS		pH	
	\bar{x} (°C)	Reducción media ^a (°C)	\bar{x} (mg/L)	Remoción media ^b (%)	\bar{x} (unidad)	Incremento medio ^c (unidad)	
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	25,25	0,25	33,00	66,67	8,31	0,93	
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	24,10	1,40	44,00	55,56	8,23	0,85	
A ₀ : Grupo control	25,50	0,00	99,00	0,00	7,38	0,00	

^aReducción media respecto al afluente. ^bRemoción media respecto al afluente. ^cIncremento medio respecto al afluente.

Fuente: Adaptado de LABINVSERV, 2018

Tabla 10. Grado de reducción de la DBO₅ y coliformes termotolerantes a la salida de cada tratamiento

Tratamientos	DBO ₅		Coliformes termotolerantes	
	\bar{x} (mg/L)	Remoción media ^a (%)	\bar{x} (NMP/100 mL)	Remoción media ^a (%)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	93,38	50,36	105 000,00	99,56
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	94,23	49,91	34 000,00	99,86
A ₀ : Grupo control	188,13	0,00	24 000 000,00	0,00

^aRemoción media respecto al afluente.

Fuente: Adaptado de LABINVSERV, 2018; Laboratorio de Salud Ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018 (12)

Tal como se observa en las tablas 9 y 10, los efluentes del tratamiento A₂, considerados como los más efectivos en la reducción de la temperatura y coliformes termotolerantes, presentaron un descenso medio de la temperatura de 1,40 °C, así como una remoción media de coliformes termotolerantes de 99,86%, respectivamente.

Por otro lado, los efluentes del tratamiento A₁, considerados como los más efectivos en la remoción de STS, experimentaron una reducción media de 66,67% de este parámetro.

Respecto al pH, fue A₀ el que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad.

Finalmente, los tratamientos A₁ y A₂, considerados como los más efectivos en la remoción de la DBO₅, presentaron una remoción media de 50,36 y 49,91%, respectivamente.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la caracterización física, química y microbiológica del afluente (Tabla 2) indicaron que éste presentaba valores típicos de las aguas residuales domésticas. Así, dentro de los parámetros físicos, presentó una temperatura situada dentro del rango óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana ⁽¹³⁾, así como una concentración «débil» de STS ⁽¹⁴⁾. Por otro lado, dentro de los parámetros químicos, presentó un pH neutro y una concentración «media» de DBO₅ ⁽¹⁴⁾. En cuanto al parámetro microbiológico, se obtuvo una concentración ubicada dentro de las concentraciones típicas del agua residual bruta ⁽¹⁴⁾.

Los resultados del ANOVA y la prueba de Tukey aplicados entre los tratamientos evaluados: A₁: 0,5 (m³/día)/m² y A₂: 1 (m³/día)/m², y A₀: grupo control, mostraron que existen diferencias significativas entre

ellos. Los indicadores de la variable dependiente considerados, tales como STS mostraron un mejor comportamiento para A_1 , mientras la temperatura y coliformes termotolerantes mostraron mejores resultados para A_2 . Por otro lado, los valores obtenidos de DBO_5 y pH mostraron diferencia estadística únicamente con el grupo control.

En primer lugar, la temperatura tuvo un descenso medio de $0,25\text{ }^\circ\text{C}$ en A_1 y de $1,40\text{ }^\circ\text{C}$ en A_2 . Ni Ramón *et al.*, ni Coronel en 2015 consideraron claramente los efectos del tratamiento con la lombriz sobre este parámetro en sus investigaciones. Metcalf & Eddy, por otro lado, indican que la temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los $35\text{ }^\circ\text{C}$, lo cual fue reafirmado por Crites y Tchobanoglous en el 2000, citados por Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade en el 2010. Por lo tanto, con base en esta relación, consideramos a A_1 como el tratamiento que tuvo mejores resultados para este parámetro en el presente caso, debido a que presentó valores más alejados del rango de temperaturas reconocidas como ideales para la actividad bacteriana ⁽¹⁵⁾.

Por otro lado, los STS fueron removidos hasta una media de $33,00\text{ mg/L}$ ($66,67\%$ de remoción) en A_1 y $44,00\text{ mg/L}$ ($55,56\%$ de remoción) en A_2 , existiendo diferencias estadísticas entre sí. Sin embargo, esta remoción fue menor a la mostrada en la investigación de Ramón *et al.*, cuyo efluente presentó propiedades libres de sólidos suspendidos ($<20\text{ mg/L}$); empero, cabe destacar que, en aquel estudio, este porcentaje de reducción fue observado a más de 33 días después del arranque del lombrifiltro, y trabajándose con un lecho adicional de antracita, en lugar de arena gruesa ⁽⁸⁾.

El pH del afluente experimentó un incremento de $0,93$ y $0,85$ unidades en A_1 y en A_2 , respectivamente. Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Coronel ⁽¹⁶⁾, quien también obtuvo un incremento del pH en su efluente a los 7 días, en este caso de $0,06$ unidades. Esta situación podría estar relacionada con la actividad de las glándulas calcíferas o glándulas de Morren de las lombrices, las cuales son órganos especiales encargados de controlar el pH de las sustancias que pasan por su esófago, elevándolo hasta niveles adecuados para su digestión, a través de la segregación y descarga de carbonato cálcico al alimento ⁽¹⁷⁾.

La DBO_5 fue removida en un $50,36\%$ en A_1 y en un $49,91\%$ en A_2 ; no existiendo diferencia estadística entre estos. Sin embargo, ambos niveles de remoción fueron menores a los observados por Coronel en 2015 quien consiguió un porcentaje de reducción promedio del $84,38\%$ de la DBO_5 de su afluente en la primera semana de experimentación, el cual tuvo un valor inicial de 448 mg/L ⁽¹⁶⁾.

Asimismo, se experimentó una reducción importante de coliformes termotolerantes, de $99,56\%$ en A_1 y $99,86\%$ en A_2 , existiendo diferencias estadísticas entre sí y considerándose a A_2 como el tratamiento que obtuvo mejores resultados para este parámetro. Al respecto, ni Ramón *et al.*, ni Coronel consideraron los efectos del tratamiento con la lombriz roja californiana sobre este parámetro en sus investigaciones; sin embargo, en 2014, Vicente obtuvo resultados similares a los de este estudio, notándose en este caso la disminución del mencionado parámetro en un $98,90\%$ ⁽¹⁸⁾.

CONCLUSIONES

Se evaluaron dos tratamientos de depuración con la lombriz roja californiana, en función de dos tasas de riego, considerando, además, un grupo control; los cuales, a pesar de mostrar efectos similares, presentaron mejores resultados para A_2 , determinándose este como el más eficiente, con un descenso medio de $1,40\text{ }^\circ\text{C}$ y $55,56\%$ de STS, $49,91\%$ de DBO_5 , $99,86\%$ de coliformes termotolerantes, y un pH final medio de $8,23$.

A través del análisis de los parámetros considerados, se determinaron las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente, conociéndose que el agua residual presentó una temperatura de $25,50\text{ }^\circ\text{C}$, un pH neutro de $7,38$, y concentraciones típicas de $99,00\text{ mg/L}$ de STS, $188,13\text{ mg/L}$ de DBO_5 , y $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL de coliformes termotolerantes.

Se analizaron las características físicas, químicas y microbiológicas de los efluentes, determinándose que el tratamiento más eficiente fue A_2 : $1\text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$, presentando una reducción mayor de la temperatura y coliformes termotolerantes; seguido por A_1 : $0,5\text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$, el cual presentó mayor eficiencia en la remoción de STS. Por otro lado, ambos tratamientos evaluados presentaron efectos similares sobre la DBO_5 y pH.

RECOMENDACIONES

Efectuar la investigación propuesta durante los meses de otoño, invierno y primavera con la finalidad de conocer el desarrollo de la lombriz roja californiana bajo estas condiciones, así como su eficiencia en el tratamiento. Asimismo, se recomienda realizar el análisis de los efluentes considerando otros parámetros de la normatividad vigente.

Realizar la medición de caudales y muestreo del afluente considerando lo establecido en la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones, para determinar un diseño a escala que se ajuste a las condiciones reales en campo.

Aplicar *in situ* el tratamiento que presentó mejores resultados, para determinar su eficiencia en condiciones de campo, a fin de realizar los ajustes y mejoras pertinentes. Asimismo, realizar el análisis

del humus de la lombriz roja californiana, a fin de determinar las necesidades de cambio de sustrato, retiro y disposición postratamiento del mismo.

Agradecimientos: al Laboratorio de Procesos Agroindustriales y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad José Carlos Mariátegui, por permitir el uso de sus instalaciones, equipos y materiales; al Laboratorio de la Dirección de Salud Ambiental de la GERESA Moquegua y al Laboratorio SERVILAB de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, por el servicio de análisis de las muestras de agua residual y al Dr. Luis Herrera, quien compartió sus valiosos conocimientos en el manejo de la lombriz roja californiana, proporcionándonos, además, las especies utilizadas en el presente estudio.

Conflictos de interés: los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gobierno Regional Moquegua. (s. f.). Plan regional de saneamiento 2013-2021. Moquegua, Perú: Autor. Recuperado de <http://es.slideshare.net/MaritzaRamosChicalla/plan-regional-de-saneamiento-2013-2021>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). Fiscalización ambiental en aguas residuales [versión PDF]. Lima, Perú: Autor. Recuperado de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- García, M. y Solano, V. (2005). Manual cría de la lombriz de tierra: una alternativa ecológica y rentable. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?isbn=9588233321>
- Rodríguez, F. (2005). Lombricultura para pequeños emprendedores: manual teórico práctico para el manejo comercial de la lombriz roja californiana. Recuperado de books.google.com/books?id=F00Ky06O-2qwC
- Schuldt, M. (2006). Lombricultura: teoría y práctica. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?isbn=8484764648>
- Loza, M., Choque, B., Pillco, H., Huayta, D., Chambi, I. y Cutili, B. (2010, octubre-diciembre). 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. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000400008
- Hernández, P. (2005). Anteproyecto de construcción para aplicación de lombricultura al tratamiento de planta Llaullao de Salmonera Invertec S.A. (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Ramón, J., León, J. y Castillo, N. (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. doi: <https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
- Guzmán, M. (2004). Estudio de factibilidad de la aplicación del Sistema Toha en la planta de tratamiento de aguas servidas de Valdivia (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile.
- Salazar, P. (2005). Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile.
- Metcalf & Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización (Juan de Dios Trujillo, trad.). España: Interamericana de España, S.A.U. (Obra original publicada en 1991).
- Déniz, F. (2010). Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO₅ y SS de las aguas residuales urbanas en el ensu-

- ciamiento de las membranas de ósmosis inversa (tesis doctoral). Universidad Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.
13. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales [versión PDF]. Cochabamba, Bolivia: Centro andino para la gestión y uso del agua (Centro AGUA). Recuperado de http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
 14. Coronel, N. (2015). Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá en la ESPOCH para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Lagos La Nube (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
 15. Somarriba, R. y Guzmán, F. (2004). Guía de lombricultura [versión PDF]. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. Recuperado de <http://repositorio.una.edu.ni/2409/1/nf04s693.pdf>
 16. Vicente, J. (2014). Propuesta de diseño de un sistema de biofiltro para el tratamiento de aguas residuales producidas en la central termoeléctrica Sacha de la unidad de negocio Termopichincha - CELEC EP (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
 17. Laboratorio de investigación y servicios. (2018). Informe de ensayo físico químico (Reportes N° 19142-18, N° 19143-18 y N° 19144-18). Moquegua, Perú.
 18. Laboratorio de Salud Ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua. (2018). Informe de ensayo (Informes N° 061.18 y N° 065.18). Moquegua, Perú.

Correspondencia

Deybi Karín Cáceres Poma

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad José Carlos Mariátegui. Moquegua, Perú, Ciudad Universitaria - C.P. San Antonio S/N, Moquegua 18001 – Perú
 dkacacresp86@gmail.com