

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Calidad de abono orgánico obtenido a través de vermicomposteo de lodos residuales con lombriz (*Eisenia foetida*)

Quality of organic fertilizer obtained through vermicomposting of sewage sludge with earthworm (*Eisenia foetida*)

Yuly Mercedes Apaza Gomez , Reynaldo Salas Sucatona ,
Wile Mamani Navarro 

Universidad Nacional de Juliaca, Nueva Zelandia 631, Juliaca 21101, Puno, Perú

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 21/09/2021
Aceptado: 14/07/2022

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no existir conflicto de intereses.

CORRESPONDENCIA

Yuly Mercedes Apaza-Gomez
yulymercedes.apg@gmail.com;
reynaldosalassucatona@gmail.com;
wmamani@unaj.edu.pe



cag024222380

RESUMEN

La presente investigación tuvo como intención determinar la calidad de abono orgánico obtenido a través de vermicompostaje con la lombriz (*Eisenia foetida* Sav.) en lodos de lagunas de estabilización de la ciudad de Juliaca. Se recolectaron 31 muestras aleatoriamente en cada una de las 8 lagunas, divididas en 9 unidades experimentales y en tres grupos con tres repeticiones aleatorias, T1 (lodo + estiércol + lombriz), T2 (lodo + lombriz) y T3 (lodo). Consecutivamente, se analizó la biomasa, número de lombrices, y color como indicadores de transformación de lodo en abono orgánico, de forma mensual durante 3 meses. En T1 la biomasa incrementó en los tres meses, mientras que en T2 se mostró una ligera ganancia. Respecto al número de lombrices en T1 se duplicó la cantidad inicial y en T2 se presentó mortandad en el primer mes, pero en el último llegó a 130. El color en T1 fue el único que llegó a la tonalidad 10YR 2/1, seguido de T2. Además, se estimó el porcentaje de remoción de agentes patógenos y contenido de macronutrientes después de los 3 meses. En este sentido, los agentes patógenos reportaron diferencias significativas en el porcentaje de remoción para cada tratamiento, siendo T1 el mejor tratamiento, seguido de T2 y T3: En el contenido de macronutrientes también se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, donde T1 presentó mayor concentración en nitrógeno, potasio y calcio a diferencia del tratamiento T2 y T3. En el caso del fósforo el T2 presentó un mayor porcentaje. Se demostró que las lombrices en este tipo de lodo aceleran la remoción de agentes patógenos mejorando su calidad, convirtiéndolo en un abono orgánico de

calidad debido a la mejora en el contenido de agentes microbiológicos, incremento en los macronutrientes y adaptación positiva de las lombrices. Esto resulta beneficioso para el aprovechamiento del lodo con fines de jardinería, cultivos de tallo alto y reforestación tal como se recomienda en el reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: fertilizante natural, lagunas de estabilización, lombriz roja, tratamiento biológico

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the quality of organic fertilizer obtained through vermicomposting with earthworms (*Eisenia foetida* Sav.) in sludge from stabilization ponds in the city of Juliaca. Thirty-one samples were randomly collected in each of the eight lagoons, divided into nine experimental units and three groups with three random replicates, T1 (sludge + manure + earthworm), T2 (sludge + earthworm) and T3 (sludge). Consecutively, biomass, number of worms, and color were analyzed as indicators of transformation of sludge into compost, on a monthly basis for 3 months. In T1 the biomass increased in the three months, while in T2 a slight gain was shown. Regarding the number of worms, T1 doubled the initial amount and T2 showed mortality in the first month, but in the last month it reached 130. The color in T1 was the only one that reached the 10YR 2/1 shade, followed by T2. In addition, the percentage of pathogen removal and macronutrient content were estimated after 3 months. In this sense, pathogens reported significant differences in the percentage of removal for each treatment, with T1 being the best treatment, followed by T2 and T3: In the macronutrient content, significant differences were also observed between treatments, where T1 presented higher concentration in nitrogen, potassium and calcium as opposed to T2 and T3. In the case of phosphorus, T2 presented a higher percentage. It was demonstrated that earthworms in this type of sludge accelerate the removal of pathogenic agents improving its quality, turning it into a quality organic fertilizer due to the improvement in the content of microbiological agents, increase in macronutrients and positive adaptation of the earthworms. This is beneficial for the use of the sludge for gardening, tall stem crops and reforestation as recommended in regulations for the reuse of sludge generated in wastewater treatment plants.

Keywords: natural fertilizer, stabilization ponds, red worm, biological treatment

INTRODUCCIÓN

Por el incremento de la población y como consecuencia de sus actividades se generan gran cantidad de residuos; a nivel mundial una de las principales actividades contaminantes es la generación de aguas residuales que traen como consecuencia la producción de lodos residuales en grandes cantidades (Hu y Chen, 2018). En la ciudad de Juliaca, Perú, se tienen lagunas de estabilización con el propósito de mejorar las características sanitarias del agua residual a través de procesos de autodepuración físico, químico y biológico. Sin embargo, estas se encuentran colmatadas, por lo que mantienen más de 80 000 m³ de lodo (Seda Juliaca, 2017).

Este tipo de lodo es un potencial peligro para el ambiente y la salud de las poblaciones cercanas (Emamjomeh *et al.*, 2017), debido a que generalmente presentan altas concentraciones de contaminantes patógenos, compuestos orgánicos tóxicos, metales pesados, entre otros (Hu y Chen, 2018). Con el propósito de generar beneficios ambientales y de salud, se han realizado estudios que proponen que, con el tratamiento adecuado, el lodo puede ser convertido en un abono con elevado potencial orgánico que puede ser utilizado como fertilizante orgánico (Caldeira *et al.*, 2013).

Existen diferentes enmiendas para la aceptación de la lombriz (*Eisenia foetida* Sav.) en el lodo fresco como compost, aserrín, restos

de alimentos y estiércol. Este último resulta ser más eficiente debido a que se requiere solo del 20 al 30 % para la producción de lombrices y solo un 10 % para fertilizante en el suelo (Ludibeth *et al.*, 2012). Existen diferentes tipos de estiércol provenientes de ovino, aves, conejo y vaca. El estiércol de ovino requiere pre-compostaje para la utilización de la lombriz, mientras que el de aves y conejo contiene elevadas concentraciones de nitrógeno, requiriendo la mezcla con residuos orgánicos de alta relación de C: N. Por otra parte, el estiércol de vaca resulta ser un alimento nutricionalmente balanceado para las lombrices y no requiere pre-compostaje ni ser sometido a otros procesos (Villegas y Laines, 2017). Además, contiene de forma natural diferentes bacterias anaerobias, que conducen a la generación de hidrógeno (Taki *et al.*, 2019). Todo ello contribuye a la supervivencia, crecimiento y reproducción de la lombriz (Haynes y Zhou, 2016), generando un medio más óptimo para el proceso aeróbico y el desarrollo óptimo acelerando de la remoción de agentes patógenos (Hu y Chen, 2018).

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del vermicompostaje, debido a que mejora las características físicas, químicas y microbiológicas del lodo residual e incrementa los nutrientes en los lodos de lagunas de estabilización. De esta forma, se puede obtener un abono orgánico de calidad, considerando el contenido de agentes patógenos y macronutrientes y de esta forma, generar una alternativa para el aprovechamiento de los lodos residuales a través de una tecnología que permita el uso apropiado y racional de estos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó desde octubre de 2018 a marzo de 2019 en un área ubicada a 5

km de las lagunas de estabilización de Juliaca en la comunidad Chilla, Perú. Posteriormente, se trabajó en el laboratorio de microbiología ambiental de la Universidad Nacional de Juliaca, ubicada en la provincia de San Román, sobre 3 826 msnm (Seda Juliaca, 2017).

La población estuvo conformada por la cantidad total de lodos acumulados en las ocho lagunas de estabilización de Juliaca, las cuales conforman un total de 80 000 m³ de lodo provenientes de las lagunas primarias. Se tomaron un total de 31 muestras de 15 kg de lodos residuales para un total de 120 kg. Previo a la distribución de las muestras, se extrajeron manualmente materiales no biodegradables y se sometió a deshidratación solar directa. Las muestras fueron distribuidas en tres grupos con tres repeticiones.

Parámetros físico-químicos

Para el análisis de los parámetros físico-químicos y microbiológicos iniciales en suelos se utilizaron 2 kg de lodo para el análisis físico químico y 1 kg para el análisis microbiológico, según el protocolo del monitoreo de biosólidos (MVCS, 2018). Las muestras fueron distribuidas como se observa en la tabla 1.

Biomasa y conteo de lombrices

Se evaluó el efecto de las lombrices durante el proceso de vermicompostaje por medio del conteo del número de lombrices y la biomasa total mensual (Zhi-Wei *et al.*, 2019). Adicionalmente, se usó el color del lodo, como indicador de calidad en la obtención de un abono, a través de la tabla Munsell 10YR comparándola con la tonalidad 10 YR 2/1 para registrar el cambio de color del lodo, asociando el color negro como indicador de la degradación de la materia orgánica (Marquina y Martínez, 2016).

Tabla 1. Distribución de muestras de lodos residuales en lagunas en diferentes tratamientos

Tratamiento	Contenido	Lodo	Estiércol	Lombriz
Tratamiento 1 (T1)	lodo + estiércol + lombriz	7 kg	3 kg	75 g
Tratamiento 2 (T2)	lodo + lombriz	10 kg	-	75 g
Tratamiento 3 (T3)	lodo	10 kg	-	-

Remoción de agentes patógenos

Posterior al proceso de vermicompostaje, se extrajo una muestra de cada cama dentro de las primeras 24 h para el análisis microbiológico de las muestras a través del conocimiento de la concentración final de *Escherichia coli*, *Salmonella* sp. y huevos viables de helmintos. Para el análisis de estos parámetros se utilizaron diferentes métodos estandarizados que se detallan en la tabla 2 (Soobhany, 2018b).

La remoción de agentes patógenos (%) se determinó según la fórmula de Romero-Aguilar *et al.* (2009):

$$\% \text{ remoción} = (Ci - Cf) * 100 / Ci$$

Dónde:

Ci: Concentración inicial

Cf: Concentración final

Contenido de macronutrientes

Se emplearon nueve bandejas de 15 L para la preparación de camas de alimentación (Gupta *et al.*, 2007). El lodo fue previamente

deshidratado con radicación solar directa durante 21 días (Azizi *et al.*, 2013), y se extrajeron materiales no biodegradables; se realizó la distribución de los tratamientos con la proporción descrita en la tabla 1, y se introdujeron 75 g de *E. foetida*, equivalente a 100 lombrices juveniles en los tratamientos T1 y T2. Las camas se mantuvieron a temperatura ambiente (12 - 18 °C), humedad relativa 70 ± 10 %, empleando aspersión, y no se añadió ningún alimento adicional; el proceso de vermicompostaje tuvo una duración de tres meses (Vicencio *et al.*, 2011), en el que se monitorearon parámetros físico-químicos como: pH, temperatura, humedad y se realizó aireación manual de forma semanal (Azizi *et al.*, 2013; Vicencio *et al.*, 2011). Posterior a la aplicación de los tratamientos, se extrajo 1 kg de lodo para el análisis de la concentración de nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P) y calcio (Ca) por medio del método para la determinación de macronutrientes (Braga *et al.*, 2017).

Tabla 2. Métodos estandarizados utilizados en el análisis microbiológico

Parámetros microbiológicos	Método estandarizado	
	Preparación de la muestra	Análisis de la muestra
<i>Escherichia coli</i>	EPA/625/R-92/013	9221 C de APHA AWWA
<i>Salmonella</i> sp.	EPA/625/R-92/013	9260 D de APHA AWWA
Huevos viables de helminto	EPA/625/R-92/013	EPA/625/R-92/013

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físico-químicos

En el caso del pH, en el T1, inicialmente se observó un pH de 7,7, disminuyendo posteriormente hasta 7,14, reportando un ligero aumento durante las primeras semanas del estudio, disminuyendo finalmente a 6,6. Características similares se observaron en el tratamiento T2, donde el pH disminuyó hasta 6,87 en la última semana, valores más elevados que los obtenidos en el tratamiento T1. Por su parte, en el tratamiento T3 fue donde se reportó el mayor pH al final de las 12 semanas de tratamiento con un valor de 7,03, resultado

que contrastado con los demás demuestra estar íntimamente asociado con los que generalmente se observan en estudios de vermicompostaje con una disminución del pH durante el proceso. Taki *et al.* (2019) encontraron valores iniciales de pH entre 7 y 7,3 con una posterior disminución hasta 5,5. Gupta y Garg (2008) hallaron valores por debajo de 6, por lo que se puede decir que estos resultados están asociados a la presencia de procesos de mineralización del N y P en nitritos, nitratos y ortofosfatos, hecho fortalecido debido a que el pH normalmente disminuye durante el proceso de bioconversión del material orgánico durante procesos intermedios de ácidos orgánicos. De igual

manera, la diferencia entre los tratamientos T1 y T2 puede estar asociada a las camas de alimentación, y el uso de estiércol de vaca, pues en éste se encuentra una diversidad de bacterias anaerobias que tienen como función generar hidrógeno (Taki *et al.*, 2019).

Biomasa y conteo de lombrices

Durante el tiempo de estudio, se evidenciaron cambios de biomasa de las lombrices, registrándose durante el primer mes un peso promedio de 136,33 g para el tratamiento T1, mientras que para el T2 se registró el peso más bajo con 84,0 g, resultados superiores al peso inicial para ambos tratamientos. Durante el segundo mes se registró un peso promedio de 133,67 g para el tratamiento T1, y un menor peso para el tratamiento T2 con 82,0 g. Durante el tercer mes se observó un peso promedio de 160,67 g para el tratamiento T1, siendo el que generó un mayor aumento de peso promedio, y 90,0 g para el tratamiento T2.

Huerta-Muñoz *et al.* (2019) recomiendan el uso del estiércol como medio eficaz de reciclaje a través de la elaboración de abonos orgánicos como compost y lombri-compost, representando una alternativa valiosa con fines de mitigar las consecuencias de la contaminación y generar insumos que le aporten un valor agregado a los residuos con la intención de beneficiar a la agricultura. El estiércol de vaca es el más aceptado, seguido del ovino, conejo, porcino, aves, entre otros.

Para el vermicompostaje, el estiércol de vaca resultó ser la mejor opción debido a que no requiere pre-compostaje, ni adicionar otro material conocido como el alimento mejor balanceado para las lombrices. De forma contraria, otros estiércoles requieren pasar por otros procesos de pre-compostaje, lavado, etc., debido a que contienen altos niveles de N y amonio (Villegas y Laines, 2017).

En el tratamiento T1 no existió mortalidad, observándose un aumento de lombrices durante el primer mes con un aumento hasta 159, con posterior aumento a 177 para el segundo mes y finalmente el doble de

lombrices con respecto al número inicial. En el tratamiento T2, en cambio, existió una elevada mortalidad, para el primer mes murieron 2 lombrices, observándose un continuo incremento para el último mes con una mortalidad de hasta 130 lombrices. Con respecto a este tipo de resultados, varias investigaciones han demostrado que el tipo de sustrato de las lombrices repercute directamente sobre el proceso de reproducción y multiplicación de las mismas, reconociéndose, además, que el estiércol genera un aumento de la temperatura del medio, afectando la reproducción de la lombriz. Adicionalmente, el material de alimentación, al contener una mayor cantidad de lodo, disminuye la capacidad de asimilación por parte de la lombriz, debido a que ésta, no puede retener una cantidad suficiente de materia orgánica y carbohidratos metabolizables, lo cual es primordial para su crecimiento y reproducción (Gupta y Garg, 2008).

Según las comparaciones múltiples de las medias de la biomasa de la lombriz *E. foetida* en el análisis de varianza y la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$), en los diferentes tratamientos aplicados (T1 y T2), el valor de significancia en el primer mes fue de 0,003, en el segundo mes de 0,000, y en el tercero de 0,000, con una ganancia en biomasa después del proceso de vermicompostaje, número de lombrices en los tres meses y la ganancia en número de lombrices después del proceso de vermicompostaje; todos con valores menores a 0,05, por lo tanto, los tratamientos son significativamente diferentes. El tratamiento T1 (lodo + estiércol + lombriz) fue más óptimo para generar un incremento de la biomasa con respecto al tratamiento T2 (lodo + lombriz), demostrándose que la lombriz *E. foetida*, en presencia de estiércol, reacciona de forma positiva aumentando la tasa de supervivencia, crecimiento y reproducción (Murugavel *et al.*, 2020). De igual manera, se pudo observar que el color en los tres tratamientos varió, siendo el tratamiento T1 el único que llegó a la tonalidad 10YR 2/1, según la tabla de Munsell, seguido del tratamiento T2.

Remoción de agentes patógenos

Según los resultados obtenidos a través del estudio de la concentración inicial y final de *E. coli*, en los tratamientos, se encontraron concentraciones finales más bajas en los tratamientos con presencia de lombriz (T1, T2) con 423,317 NMP g⁻¹ ST y 598,199 NMP g⁻¹ ST, respectivamente, resultados que se encuentran por debajo del límite establecido en la normativa vigente, por lo tanto cumplen con los criterios de higienización establecidos, mientras que el tratamiento T3 presentó concentración final de 1844,727 NMP g⁻¹ ST, superando el límite establecido (Tabla 3).

La reducción de coliformes es causada por la presencia de lombrices, lo que genera mortandad selectiva de bacterias usando sus sistemas antioxidantes y funciones inmunes antimicrobianas (Liu et al., 2012). En el presente estudio, los tratamientos (T1 y T2) con presencia de lombrices tuvieron porcentajes de remoción mayores a 86 %. Esta reducción de *E. coli* durante el vermicompostaje puede atribuirse a diversas acciones de las lombrices como la acción enzimática intestinal y la secreción de fluidos celómicos que tienen propiedades antibacterianas. Hu y Chen (2018) observaron una remoción de 30,1 % hasta 85,4 %, lo que

indica que éstas son capaces de acelerar la mortalidad de *E. coli* en el lodo.

Según el análisis estadístico de varianza bajo comparaciones múltiples de las medias del porcentaje de remoción de *E. coli* en los tratamientos aplicados, el tratamiento T1 (lodo + estiércol + lombriz) es el más óptimo para la remoción de *E. coli* con 90,155 % seguido del tratamiento T2 (lodo + lombriz) con 86,088 % y finalmente, el tratamiento T3 (lodo) con 57,097 % de remoción, siendo estos tratamientos iguales, conformando un grupo A, mientras que el T3 difiere encontrándose en la agrupación B. Sin embargo, de acuerdo a los resultados reales obtenidos se infiere que los 3 tratamientos son diferentes, estos resultados pueden ser atribuidos a la presencia de las lombrices en los tratamientos T1 y T2, los mismos que tuvieron alto porcentaje de remoción, así como el tratamiento T3 que exhibió el porcentaje más alto de remoción, posiblemente debido al uso de estiércol de vaca como sustrato de alimentación, ya que es conocido que éste favorece la supervivencia, crecimiento y reproducción de la lombriz *E. foetida* (Villegas y Laines, 2017).

Los resultados obtenidos a través del estudio de la concentración inicial y final de *Salmonella* sp. muestran concentraciones finales más bajas en los tratamientos con presencia de lombriz

Tabla 3. Concentración de agentes patógenos en diferentes tratamientos de lodos residuales

Agente patógeno	Detalle	T1 (lodo + estiércol + lombriz)	T2 (lodo + lombriz)	T3 (lodo)
<i>Escherichia coli</i>	Inicial (NMP g ⁻¹ ST)	4299,754	4299,754	4299,754
	Final (NMP g ⁻¹ ST)	423,317	598,199	1844,727
	Remoción (%)	90,155	86,088	57,097
	Límite (NMP g ⁻¹ ST)	<1000	<1000	<1000
<i>Salmonella</i> sp.	Inicial (NMP 10 g ⁻¹ ST)	4,300	4,300	4,300
	Final (NMP 10 g ⁻¹ ST)	0,847	1,888	3,582
	Remoción (%)	80,310	56,097	16,696
	Límite (NMP 10 g ⁻¹ ST)	< 1	< 1	< 1
Huevos viables	Inicial (Nº 4 g ⁻¹ ST)	4,914	4,914	4,914
	Final (Nº 4 g ⁻¹ ST)	1,134	1,969	3,690
	Remoción (%)	76,933	59,923	24,920
	Límite (Nº 4 g ⁻¹ ST)	< 1	< 1	< 1

(T1, T2) con 0,847 NMP 10 g⁻¹ ST y 1,888 NMP 10 g⁻¹ ST, respectivamente, y la concentración más alta se presenta en el tratamiento T3 con 3,582 NMP 10 g⁻¹ ST. Además, el tratamiento T1 está por debajo del límite establecido en la normativa vigente, por lo tanto, cumple con el criterio de higienización, mientras que los tratamientos T2 y T3 superan el límite. Asimismo, el tratamiento T1 resultó ser más eficaz en la remoción de *Salmonella* sp. con 80,310 %, seguido del tratamiento T2 con 56,097 %, mientras que el tratamiento T3 mostró un bajo porcentaje de remoción de 16,969 % (Tabla 3).

Según las comparaciones múltiples de las medias ($p > 0,05$) del porcentaje de remoción de *Salmonella* sp. en los diferentes tratamientos, el tratamiento T1 (lodo + estiércol + lombriz) es el más óptimo para la remoción de *Salmonella* sp. con 80,310 %, encontrándose en el grupo A, seguido del tratamiento T2 (lodo + lombriz) con 56,097 %, en el grupo B, y finalmente el tratamiento T3 (lodo) con 16,696 % de remoción en el grupo C. Por lo tanto, estadísticamente, todos los tratamientos son diferentes, resultados que pueden ser atribuidos a la presencia de lombrices, debido a altos niveles de remoción en los tratamientos T1 y T2 en comparación con el tratamiento T3.

Las lombrices tienen la capacidad de reducir de forma acelerada agentes microbianos patógenos como el caso de la *Salmonella* sp. Según Soobhany (2018b), las lombrices causan una disminución máxima en *Salmonella* sp. en un 29 % en comparación con la disminución máxima de 14 % en ausencia de lombriz. En la presente investigación, el porcentaje de remoción con presencia de lombriz fue 80,315 % y 56,097 %, en los tratamientos T1 y T2, respectivamente, mientras que en ausencia de la lombriz se obtuvo 16,696 % de remoción, por lo que se puede inferir que la lombriz *E. foetida* acelera la remoción de *Salmonella* sp. en el lodo. Soobhany (2018b) obtuvo porcentajes de remoción de 99 % de *Salmonella* sp. en lodos, esto a causa de la temperatura superior a 30 °C. Sin embargo, en esta investigación se trabajó con temperatura ambiente de 12-18 °C, por lo tanto, se puede inferir que la

temperatura podría ser una variable determinante en la remoción de *Salmonella* sp.

Los resultados obtenidos a través del estudio de la concentración inicial y final de huevos viables de helminto mostraron concentraciones finales más bajas en los tratamientos con presencia de lombriz (T1, T2) con 1,134 N° 4 g⁻¹ ST y 1,969 N° 4 g⁻¹ ST, respectivamente, mientras que el tratamiento T3 se obtuvo 3,69 N° 4 g⁻¹ ST. Estos resultados superan el límite establecido por la normativa vigente, sin embargo, se obtuvieron altos porcentajes de remoción. El tratamiento T1 resultó ser más eficaz en la remoción de huevos viables de helminto con 76 %, seguido del tratamiento T2 con 59 %, mientras que el tratamiento T3 presentó bajo porcentaje de remoción de 24 %. Estos resultados pueden ser atribuidos a la temperatura, la cual no superó los 30 °C, puesto que para la remoción de huevos viables de helminto influye la temperatura, debido a que el proceso hemofílico (temperatura alta) puede ser capaz de la inactivación de huevos de helminto, incluso llegar a la eliminación de organismos patógenos. Se ha demostrado que estos agentes patógenos no sobreviven en el vermicompostaje (Martínez *et al.*, 2014), debido a que la lombriz por su efecto inhibitorio causa mortandad selectiva de agentes patógenos.

En el presente estudio se muestra que el mayor porcentaje de remoción de huevos de helminto se presenta en los tratamientos T1 y T2, con presencia de lombrices, mientras que en la ausencia de la lombriz se presentan los niveles más bajos de remoción. Por lo que se deduce que la lombriz *E. foetida* acelera el proceso de remoción de huevos viables de helminto en lodos (Tabla 3). Según los resultados estadísticos el nivel más alto de remoción se presenta en el tratamiento T2 con 61 %, seguido del tratamiento T1 con 50 %, mientras que el tratamiento T3 presenta la más baja remoción con 29 %, por lo que los tratamientos T1 y T2 se encuentran en la agrupación A, por lo tanto, son iguales. Sin embargo, de acuerdo a los datos reales se puede deducir que estos tratamientos difieren entre sí,

siendo el tratamiento T1 mejor que el tratamiento T2, así como el tratamiento T2 mejor que el tratamiento T3.

Contenido de macronutrientes

En relación con las concentraciones de N en los tratamientos T1, T2 y T3, el contenido más alto se presentó en el tratamiento T1 con $14,85 \text{ mg kg}^{-1}$, seguido del tratamiento T2 con $13,47 \text{ mg kg}^{-1}$, y finalmente T3 presentó la más baja concentración con $11,643 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 1). Estos resultados podrían estar asociados con la presencia de una mayor concentración de materia orgánica y carbohidratos fácilmente asimilados por *E. foetida* para su rápido crecimiento y como factor que favorece su ciclo reproductivo. En casos como el sustrato del tratamiento T1 con presencia de estiércol, se hace propicio para generar elevadas concentraciones de N como se observó en este estudio. Según Rodrigues *et al.* (2017),

sustratos con una alta concentración de nutrientes como el N se relacionan directamente con la mineralización de materia orgánica generada por la presencia de lombrices de tierra. Por su parte, Pérez *et al.* (2017) informaron bajas concentraciones en lodo con presencia de lombrices con respecto a lodo sin lombriz a efectos del pre-compostaje realizado en el estiércol durante un mes antes de ser sometido al proceso de vermicompostaje, a diferencia de esta investigación donde, en los tres tratamientos (T1, T2 y T3), se determinaron bajas concentraciones de este nutriente. De igual forma, Xie *et al.* (2016) encontraron una concentración hasta $2,86 \text{ mg kg}^{-1}$ cuando utilizaron 20 lombrices adultas en $0,2 \text{ kg}$ de lodo en el proceso de vermicompostaje durante 60 días, lo cual se atribuye a la nitrificación y desnitrificación causada por las bacterias presentes en el vermicompost.

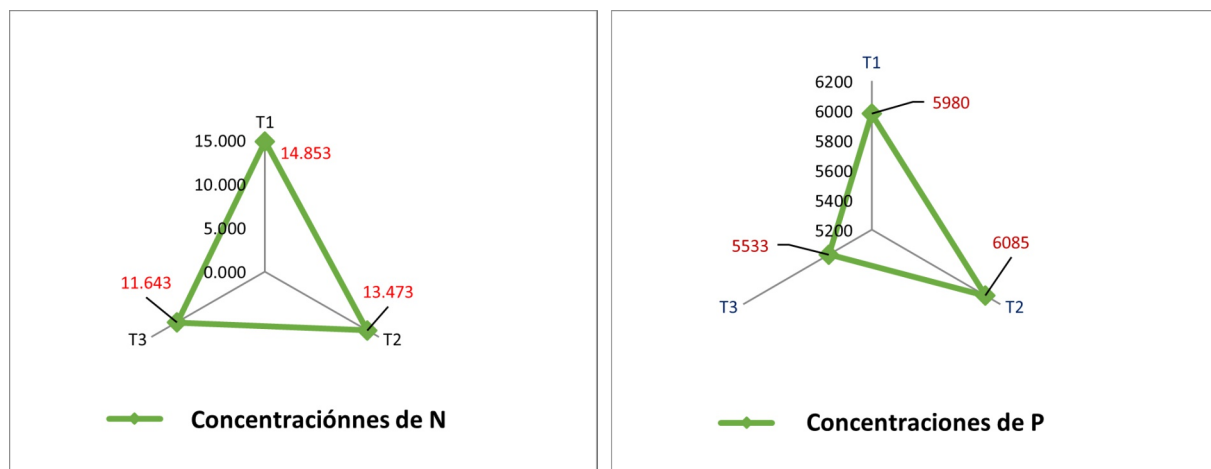


Figura 1. Concentraciones de los macronutrientes Nitrógeno (N) y Fósforo (P) (mg kg^{-1}) en diferentes tratamientos de lodos residuales

Leyenda: T1: lodo + estiércol + lombriz; T2: lodo + lombriz; T3: lodo

De acuerdo a las concentraciones de P en los diferentes tratamientos aplicados al lodo, se encontró que el T2 presentó la más alta concentración con $6\,085,33 \text{ mg kg}^{-1}$, seguido del tratamiento T1 con $5\,979,66 \text{ mg kg}^{-1}$, ambas con presencia de lombrices, mientras que el tratamiento T3, sin lombrices, presentó la más baja concentración con $5\,533,33 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 1). Este resultado que puede estar relacionado con la presencia de *E. foetida* como

factor que ayuda a optimizar la actividad de la fauna microbiana presente en el proceso de vermicompostaje, para acelerar la digestión del P, así como el aumento en la actividad de la fosfatasa fecal de las lombrices de tierra (Rodrigues *et al.*, 2017).

Los resultados mostraron niveles más altos en el contenido de P, que resultados obtenidos por otras investigaciones. Pérez *et al.* (2017) informaron $2\,860 \text{ mg kg}^{-1}$ de P, atribuido a un

proceso de pre-compostaje del estiércol durante un mes, lo que ocasionó agotamiento de los compuestos orgánicos que actúan como fuente de P debido a actividades microbianas. También, Rodrigues *et al.* (2017) reportó una concentración de $1\,800\text{ mg kg}^{-1}$ cuando utilizó una combinación de estiércol de vaca y polvo de roca ornamental durante 120 días con previo secado del lodo por 45 días, mientras que Xie *et al.* (2016) encontraron una concentración hasta $5\,500\text{ mg kg}^{-1}$ en una mezcla de estiércol de vaca al 50 %; sin embargo, utilizaron únicamente 20 lombrices adultas en el proceso de vermicompostaje durante 60 días. El alto contenido de P encontrado en esta investigación podría atribuirse al proceso de vermicompostaje por tres meses y el uso de 100 lombrices, lo cual podría haber favorecido el incremento de P, ya que las lombrices segregan un líquido viscoso contribuyendo a la redistribución de nutrientes en todo el perfil del suelo generando un mecanismo biogeoquímico para retener el P (Belmeskine *et al.*, 2020). Todo ello demuestra que el vermicompostaje puede considerarse eficaz para la transformación de P no disponible a formas más disponibles para las plantas.

Según la prueba Tukey ($p \leq 0,05$) de comparaciones múltiples de las medias de la concentración de P se apreció que el tratamiento T1 y el tratamiento T2 se encuentran en una misma categoría A, ambos con valores mayores al tratamiento T3,

considerándose estadísticamente iguales. Por su parte el tratamiento T3, forma parte de otra categoría siendo diferente estadísticamente a los demás: Sin embargo, según los datos reales se puede deducir que los tratamientos presentan diferencias entre sí, con el tratamiento T2 como el mejor de todos.

En cuanto a la concentración de K, se encontró la más alta en el tratamiento T1 con $8\,799,33\text{ mg kg}^{-1}$, donde se combinó estiércol, lombriz y lodo, por lo que se deduce que este sustrato resulta ser el más óptimo para la obtención de K, seguido del tratamiento T2 con $6\,986,66\text{ mg kg}^{-1}$, mientras que el tratamiento T3 presentó la concentración más baja con $5\,734,667\text{ mg kg}^{-1}$. Los resultados demuestran que el K fue mayor en sustratos con presencia de lombriz (Figura 2), lo que puede atribuirse al proceso de mineralización de la materia orgánica donde la presencia de *E. foetida* favorece la activación de microorganismos que transforman al K en forma más disponible. Valores similares fueron obtenidos por Rodrigues *et al.* (2017), con un equivalente a $63\,180,0\text{ mg kg}^{-1}$, el cual está atribuido directamente con la degradabilidad de los residuos que componen los sustratos durante el proceso de vermicompostaje durante 120 días. Según la prueba Tukey ($p \leq 0,05$) de comparaciones múltiples de las medias de la concentración de K, en los tratamientos T1, T2 y T3 aplicados al lodo, se demuestra que los tratamientos son estadísticamente diferentes agrupados en categorías diferentes.

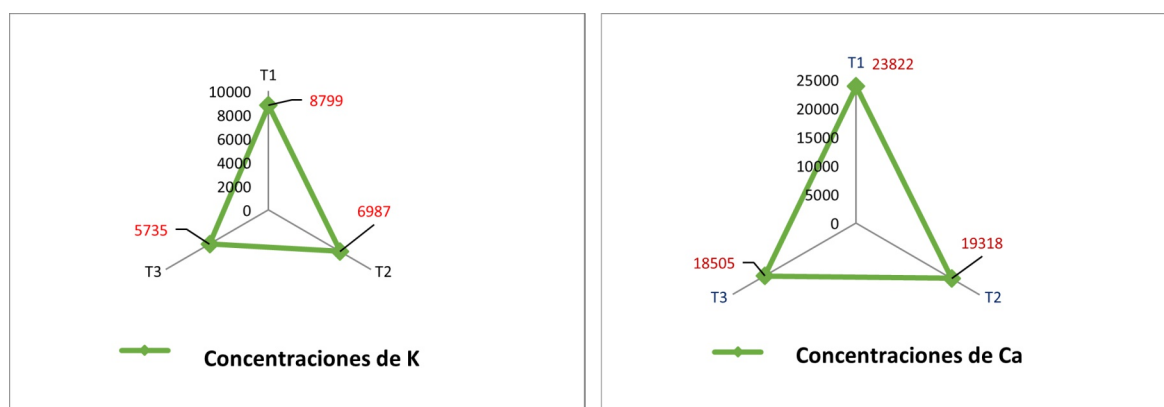


Figura 2. Concentraciones de los macronutrientes Potasio (K) y Calcio (Ca) (mg kg^{-1}) en diferentes tratamientos de lodos residuales

Leyenda: T1: lodo + estiércol + lombriz; T2: lodo + lombriz; T3: lodo

En relación con las concentraciones de calcio Ca, en los tratamientos T1, T2 y T3, se encontró el valor más alto en el tratamiento T1 con 23 821,667 mg kg⁻¹, seguido del tratamiento T2 con 19 317,667 mg kg⁻¹, mientras que el tratamiento T3 presentó la más baja concentración con 18 505,000 mg kg⁻¹ (Figura 2). Estos resultados pueden atribuirse a la combinación con estiércol, lodo y lombriz, debido a que las interacciones entre las lombrices y los microorganismos que activan la degradación de la materia orgánica y a su vez la liberación de nutrientes esenciales (Rodrigues et al., 2017). Por su parte, Soobhany (2018a) obtuvo resultados similares a los obtenidos en este estudio con mayor contenido de Ca en lodo combinado con estiércol, con valores que van desde 10 800 mg kg⁻¹ hasta 13 500 mg kg⁻¹. La prueba Tukey ($p \leq 0,05$) de comparaciones múltiples de las medias de la concentración de Ca, en los tratamientos T1, T2 y T3 aplicados al lodo, mostró que el tratamiento T2 y T3 se encuentran en la agrupación B, lo que refleja que estos son estadísticamente iguales, mientras que el tratamiento T1 se encuentra en la agrupación A, que es diferente a los otros tratamientos siendo el mejor tratamiento aplicado. A pesar de ello, según los datos reales se infiere que todos los tratamientos difieren entre sí, siendo el tratamiento T1 mejor que el tratamiento T2 y estos a su vez mejor que el tratamiento T3.

CONCLUSIONES

La lombriz *E. foetida* favorece la producción de abono orgánico en lodos residuales y mejora su calidad en términos de estabilización, higienización y nutrientes transformando el lodo residual en un abono orgánico de calidad. El tratamiento óptimo fue la combinación del lodo, estiércol y lombriz (T1) obteniendo 58,67 g de ganancia en masa de lombriz y un incremento durante el estudio de 209 lombrices según el indicador de degradación y transformación del lodo en abono. *E. foetida* acelera la remoción de *E. coli* en un 90 % y 86 %, *Salmonella* sp. en 80 % y 56 %, y entre un 77 % y 59 % la remoción de huevos de helminto en los tratamientos T1 y T2, siendo este tipo de

tratamiento una tecnología biológica eficaz para reducir los agentes patógenos que se pueden encontrar en lodos de lagunas de estabilización de la ciudad de Juliaca. En el tratamiento T1 se presenta una mayor concentración en N, K, Mg, y Ca a diferencia de los tratamientos T2 y T3, en los cuales el contenido de P es superior en el tratamiento T2. El vermicompostaje favorece el aumento de la concentración de macronutrientes en lodos provenientes de lagunas estabilizadoras.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yuly M. Apaza Gomez: Conceptualizó y formuló los objetivos generales de la investigación. Interpretó los resultados del análisis estadístico y redactó el borrador del manuscrito. Diseñó la investigación, evaluó y recopiló los datos obtenidos en las pruebas de los experimentos. Desarrolló y diseñó las metodologías seguidas en la ejecución del experimento.

Reynaldo Salas Sucaticona: Contribuyó en la preparación, creación y presentación del trabajo publicado. Contribuyó con la redacción del manuscrito publicado, específicamente, la redacción del borrador (incluida la rectificación de los señalamientos realizados al mismo por los árbitros y Consejo Editorial).

Wile Mamani Navarro: Contribuyó con la tutoría de la investigación. Hizo la revisión crítica del borrador y recomendó modificaciones, supresiones y adiciones en el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España, 1830 p.
- AZIZI, S., VALIPOUR, A. and SITHEBE, T. 2013. Evaluation of different wastewater treatment processes and development of a

- modified attached growth bioreactor as a decentralized approach for small communities. *The Scientific World Journal*, 2013: 156870.
- BELMESKINE, H., AIT OUAMEUR, W., DILMI, N., *et al.* 2020. The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. *Heliyon*, 6 (8): e04679.
- BRAGA, F., CARDOSO, P., BARBOSA, M., *et al.* 2017. Chemical characterization of vermicompost of sewage sludge with different proportions of diatomaceous material. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21 (8): 519-523.
- CALDEIRA, M., DELARMELINA, W., PERONI, L., *et al.* 2013. Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43 (2): 155-163.
- EMAMJOMEH, M. M., TAHERGORABI, M. and FARZADKIA, M. 2017. A Review of the use of earthworms and aquatic worms for reducing sludge produced: An Innovative Ecotechnology. *Waste and Biomass Valorization*, 9: 1543-1557.
- GUPTA, R. and GARG, V. 2008. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials*, 153: 1023-1030.
- GUPTA, R., KUMAR MUTIYAR, P., KUMAR RAWAT, N., *et al.* 2007. Development of a water hyacinth based vermireactor using an epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology*, 98 (13): 2605-2610.
- HAYNES, R. and ZHOU, Y. 2016. Comparison of the chemical, physical and microbial properties of composts produced by conventional composting or vermicomposting using the same feedstocks. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23: 10763-10772.
- HU, S. and CHEN, Z. 2018. Earthworm effects on biosolids characteristics in sludge treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 118: 12-18.
- HUERTA-MUÑOZ, E., HERNÁNDEZ, J. C. y ÁLVAREZ, L. A. 2019. La apreciación de abonos orgánicos para la gestión local comunitaria de estiércoles en los traspatios. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29 (53): 1-24.
- LIU, F., ZHU, P. and XUE, J. 2012. Comparative study on physical and chemical characteristics of sludge vermicomposted by *Eisenia foetida*. *Procedia Environmental Sciences*, 16: 418-423.
- LUDIBETH, S., MARINA, I. and VICENTA, E. M. 2012. Vermicomposting of sewage sludge: Earthworm population and agronomic advantages. *Compost Science & Utilization*, 20 (1): 11-17.
- MARQUINA, L. y MARTÍNEZ, J. 2016. Obtención de abonos orgánicos por medio de las lombrices "*Eisenia foetida*" a partir de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de aguas residuales San Antonio de Carapongo Lima - Perú. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú, 156 p.
- MARTÍNEZ, N., GONZÁLEZ, L. P. y TORRES, A. 2014. *Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 85 p.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO. 2018. Resolución Ministerial que aprueba el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos.

- Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-el-protocolo-de-monitoreo-de-biosolidos-resolucion-ministerial-no-093-2018-vivienda-1625694-1/>. Consultado 13/03/2021.
- MURUGAVEL, S., VASANTHY, M. and JEGANATHAN M. 2020. A study on vermicomposting from different proportion of leaf waste using earth worm species (*Eisenia foetida*). *Journal of Xidian University*, 14 (7): 908-922.
- PÉREZ, E. A., LAGUNES, J., CORONA, J., *et al.* 2017. Growth and reproductive potential of *Eisenia foetida* (Sav.) on various zoo animal dung after two methods of pre-composting followed by vermicomposting. *Waste Management*, 64: 67-78.
- RODRIGUES, A., MESAK, C., SILVA, M., *et al.* 2017. Organic waste vermicomposting through the addition of rock dust inoculated with domestic sewage wastewater. *Journal of Environmental Management*, 196: 651-658.
- ROMERO-AGUILAR, M., COLÍN-CRUZ, A., SÁNCHEZ-SALINAS, E., *et al.* 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25 (3): 157-167.
- SEDA JULIACA. 2017. Especialistas del Ministerio de Vivienda visitan las lagunas de estabilización de Seda Juliaca para evaluar y financiar el mantenimiento de su infraestructura. Disponible en: <http://www.sedajuliaca.com/index.php/71-especialistas-del-ministerio-de-vivienda-visitlan-las-lagunas-de-estabilizacion-de-sedajuliaca-para-evaluar-y-financiar-el-mantenimiento-de-su-infraestructura>. Consultado 26/07/2018.
- SOOBHANY, N. 2018a. Remediation potential of metalliferous soil by using extracts of composts and vermicomposts from Municipal Solid Waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 118: 285-295.
- SOOBHANY, N. 2018b. Preliminary evaluation of pathogenic bacteria loading on organic Municipal Solid Waste compost and vermicompost. *Journal of Environmental Management*, 206: 763-767.
- TAKI, K., GOGOI, A., MAZUMDER, P., *et al.* 2019. Efficacy of vermitechnology integration with Up flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and activated sludge for metal stabilization: A compliance study on fractionation and biosorption. *Journal of Environmental Management*, 236: 603-612.
- VICENCIO, M. G., PÉREZ-LÓPEZ, M. E., MEDINA-HERRERA, E., *et al.* 2011. Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27 (3): 263-270.
- VILLEGAS, V. and LAINES, J. 2017. Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (2): 393-406.
- XIE, D., WU, W., HAO, X., *et al.* Vermicomposting of sludge from animal wastewater treatment plant mixed with cow dung or swine manure using *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 7767-7775.
- ZHI-WEI, S., TAO, S., WEN-JING, D., *et al.* 2019. Investigation of rice straw and kitchen waste degradation through vermicomposting. *Journal of Environmental Management*, 243: 269-272.

