

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA FERMENTACIÓN LÁCTICA Y
VERMICOMPOSTAJE PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS
RESIDUALES DE LA PTAR MAGOLLO – TACNA, 2025”**

PARA OPTAR:

TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. JIMENA CLAUDIA TABOADA ALANOCA

Bach. PAULA LESLIE FLORES HUICHI

TACNA – PERÚ

2025

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA FERMENTACIÓN LÁCTICA Y
VERMICOMPOSTAJE PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS
RESIDUALES DE LA PTAR MAGOLLO – TACNA, 2025”**

Tesis sustentada y aprobada el 30 de diciembre de 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Dr. RICHARD SABINO LAZO RAMOS

SECRETARIO : Mtro. RICARDO WILLIAM NAVARRO AYALA

VOCAL : Dr. GERMAN MAMANI AGUILAR

ASESOR : Dr. JUNIOR SOVIET MIRANDA GUTIERREZ

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Jimena Claudia Taboada Alanoca y Paula Leslie Flores Huichi, egresadas, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificadas con DNI 70879982 y 75091816 respectivamente, así como Junior Soviet Miranda Gutierrez con DNI 41175246; declaramos en calidad de autores y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulada: *“Evaluación de la fermentación láctica y vermicompostaje para el tratamiento de lodos residuales de la PTAR Magollo – Tacna, 2025”*, la cual presentamos para optar el *Título Profesional de Ingeniero Ambiental*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

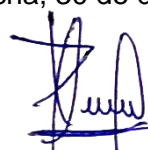
En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 30 de diciembre de 2025



Jimena Claudia Taboada Alanoca
DNI: 70879982



Paula Leslie Flores Huichi
DNI: 75091816



Junior Soviet Miranda Gutierrez
DNI: 41175246

DEDICATORIA

A mis padres, María y Miguel, por su apoyo desde el primer día, por ser mi ejemplo a seguir y por enseñarme a avanzar incluso cuando el camino parece difícil, siempre con esfuerzo y constancia.

A mis hermanos, Miguel y Paola, por sus consejos, su compañía y por motivarme siempre a perseguir mis objetivos y dar lo mejor de mí.

Y a mi fiel compañero Tobías, cuya presencia y cariño me acompañaron en tantas amanecidas, haciendo más ligeros incluso los días más difíciles.

A todos ustedes, con profundo amor y gratitud, les dedico este logro.

Jimena Claudia Taboada Alanoca

DEDICATORIA

A mis padres, Ludel y Lidia, por ser el ejemplo de valores, constancia y amor incondicional. Gracias por ser el motor fundamental de mi vida, por instruirme, guiarme y acompañarme en cada paso del camino.

A mis hermanos, Josue y Lia, por su apoyo fundamental y por estar siempre presentes en los momentos más importantes.

A Dios, por ser el pilar de mi fe y la fortaleza que me sostiene en todo momento.

A mis amigos, por sus ánimos, por creer en mí y por acompañarme con su energía y su confianza cuando más lo necesitaba.

Paula Leslie Flores Huichi

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarnos fortaleza, claridad y perseverancia en cada etapa de este camino académico, iluminando nuestras decisiones y sosteniéndonos en los momentos de mayor dificultad.

A la Universidad Privada de Tacna y a los docentes que nos acompañaron a lo largo de la carrera, por su dedicación, exigencia y compromiso con la enseñanza. Gracias por compartir su experiencia, orientarnos con paciencia e inspirarnos a seguir aprendiendo y esforzándonos cada día más.

Al Dr. Junior Soviet Miranda Gutiérrez, por darnos las pautas y guiarnos durante todo este proceso, ya que a través de su experiencia supo encaminar adecuadamente esta investigación.

A la Ing. Martha Gallegos Arata y al grupo Sacco System, por brindarnos el apoyo necesario para la obtención de las cepas de la bacteria *Lactobacillus paracasei*, aporte fundamental para el desarrollo del presente estudio.

A nuestros jurados, agradecemos el tiempo, la dedicación y las valiosas observaciones brindadas durante el proceso de evaluación. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido este trabajo y aportado significativamente a su calidad académica.

Jimena Claudia Taboada Alanoca

Paula Leslie Flores Huichi

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3 Justificación e Importancia	4
1.3.1 Importancia Social.....	4
1.3.2 Importancia Económica.....	4
1.3.3 Importancia Ambiental.....	5
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Hipótesis	5
1.5.1 Hipótesis General.....	5
1.5.2 Hipótesis Específicas	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes de la investigación	7
2.1.1 Antecedentes Internacionales	7
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	9
2.1.3 Antecedentes Locales	11
2.2 Bases Teóricas.....	11
2.2.1 Aguas Residuales	11
2.2.2 Características Físicas	12
2.2.3 Características Químicas	12

2.2.4	Características Biológicas	13
2.2.5	Clasificación de las Aguas Residuales	14
2.2.6	Tratamiento de Aguas Residuales.....	14
2.2.7	Lodos Residuales	16
2.2.8	Tipos de Lodos Residuales	17
2.2.9	Estabilización de Lodos.....	18
2.2.10	Fermentación Láctica	18
2.2.11	Biosólido.....	20
2.2.12	Vermicompostaje.....	20
2.2.13	Marco Normativo Aplicable en el Perú	22
2.3	Definición de Términos.....	23
2.3.1	Agentes Patógenos	23
2.3.2	Agua Residual	23
2.3.3	Agua Residual Tratada.....	23
2.3.4	Bacterias Lácticas	23
2.3.5	Biosólidos	23
2.3.6	Estabilización de Lodos.....	24
2.3.7	Higienización	24
2.3.8	Insumo de cultivo	24
2.3.9	Lodo Residual	24
2.3.10	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	24
2.3.11	Reaprovechamiento	24
2.3.12	Tratamiento de Aguas Residuales.....	25
	CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	26
3.1	Diseño de la investigación.....	26
3.2	Acciones y actividades	26
3.2.1	Acciones.....	26
3.2.2	Actividades	27
3.3	Materiales y/o instrumentos.....	29
3.4	Población y/o muestra de estudio.....	30
3.5	Operacionalización de variables	30
3.5.1	Variable Dependiente	30
3.5.2	Variable Independiente.....	31
3.6	Procesamiento y análisis de datos	32
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	33
4.1	Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales	33

4.1.1	Caracterización fisicoquímica	33
4.1.2	Caracterización microbiológica	33
4.2	Aplicar los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales, evaluando su efecto en la reducción de contaminantes y estabilización del material	34
4.2.1	Efecto en la estabilización fisicoquímica de los lodos residuales	34
4.2.2	Efecto en la reducción de contaminantes de los lodos residuales	38
4.3	Evaluar la eficiencia de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje aplicados a los lodos residuales de la PTAR Magollo	40
	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	50
5.1	Aplicación de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales y evaluación de su efecto en los lodos residuales	50
5.1.1	Análisis del efecto en la estabilización fisicoquímica de los lodos	50
5.1.2	Análisis del efecto en la reducción de contaminantes de los lodos	51
5.2	Evaluación de los Tratamientos en la Estabilización Fisicoquímica y Reducción de Contaminantes.....	52
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos y tipos de tratamiento de aguas residuales	15
Tabla 2. Parámetro de estabilización	22
Tabla 3. Parámetros de higienización	22
Tabla 4. Operacionalización de variables de investigación	31
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de los lodos residuales	33
Tabla 6. Caracterización microbiológica de los lodos residuales	33
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica final de los tratamientos	34
Tabla 8. Caracterización microbiológica final de los tratamientos	39
Tabla 9. Verificación de Varianza (Prueba de Levene) para el porcentaje de Materia Orgánica entre los tratamientos.....	41
Tabla 10. Análisis de Varianza (ANOVA) de un Factor para el porcentaje de Materia Orgánica de los tratamientos.....	41
Tabla 11. Prueba Post Hoc (LSD de Fisher) para la Comparación de Medias del porcentaje de Materia Orgánica de los tratamientos	42
Tabla 12. Estadísticos Descriptivos del porcentaje de Materia Orgánica por tratamiento	42
Tabla 13. Verificación de Varianza (Prueba de Levene's) para Escherichia coli entre los tratamientos.....	44
Tabla 14. Análisis de Varianza (ANOVA) de un Factor para reducción de E. Coli de los tratamientos.....	44
Tabla 15. Medias para E. Coli por tratamiento con intervalos de confianza del 95,0%	45
Tabla 16. Verificación de Varianza (Prueba de Levene's) para Huevos Viables de Helminetos entre los tratamientos	46
Tabla 17. Análisis de Varianza (ANOVA) para Huevos Viables de Helminetos por tratamientos.....	47
Tabla 18. Medias para Huevos Viables de Helminetos por tratamiento con intervalos de confianza del 95.0%	47
Tabla 19. Frecuencia de presencia de Salmonella sp. en los tratamientos.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. pH de los tratamientos	35
Figura 2. Conductividad de los tratamientos	36
Figura 3. Temperatura de los tratamientos	36
Figura 4. Humedad de los tratamientos	37
Figura 5. Materia Orgánica de los tratamientos	38
Figura 6. Escherichia coli en los tratamientos	39
Figura 7. Huevos viables de Helminthos en los tratamientos.....	40
Figura 8. Gráfico de ANOVA para el porcentaje de Materia Orgánica según el tratamiento aplicado	41
Figura 9. Gráfico de Caja y Bigotes para el porcentaje de Materia Orgánica según el tratamiento aplicado	43
Figura 10. Gráfico ANOVA para reducción de E. Coli de los tratamientos	44
Figura 11. Gráfico de Medias para E. Coli por tratamiento	45
Figura 12. Gráfico de Caja y Bigotes para E. Coli por tratamiento aplicado.....	46
Figura 13. Gráfico ANOVA para Huevos Viables de Helminthos por tratamientos.....	47
Figura 14. Gráfico de Medias para Huevos Viables de Helminthos por tratamiento	48
Figura 15. Gráfico de Caja y Bigotes para Huevos Viables de Helminthos por tratamiento aplicado	48
Figura 16. Diagrama de Sectores de presencia de Salmonella sp. en los tratamientos	49

RESUMEN

El presente estudio evaluó la eficiencia de la fermentación láctica (TFL) y el vermicompostaje (TVC) como tratamientos biológicos para la reducción de la carga contaminante microbiológica y la estabilización de la materia orgánica en los lodos residuales generados por la PTAR Magollo, ubicada en la ciudad de Tacna. La investigación surgió ante la creciente acumulación de lodos producto del sobrepaso de la capacidad operativa de la planta. Se empleó un diseño experimental, realizando la caracterización fisicoquímica y microbiológica inicial de los lodos y aplicando tratamientos con bacterias ácido-lácticas (*Lactobacillus paracasei*) y lombrices *Eisenia foetida*. Se monitorearon parámetros como pH, conductividad, temperatura y carga microbiana durante el proceso. Los resultados evidenciaron que el TVC fue más eficiente en la estabilización fisicoquímica, reduciendo la Materia Orgánica hasta un 43,0%. En contraste, el TFL demostró potencial sanitario (acidificación a pH de 5,40 y Ausencia de *Salmonella sp.* en una réplica). Sin embargo, el corto tiempo de tratamiento resultó insuficiente, pues el Análisis de Varianza (ANOVA) confirmó que no se logró una reducción significativa de *Escherichia coli* ni de *Huevos viables de Helminths*. Se concluye que, si bien ambos tratamientos son alternativas viables y complementarias, su eficiencia plena y el cumplimiento con los criterios de higienización (D.S. N° 015-2017-VIVIENDA) requieren la extensión del periodo de aplicación.

Palabras clave: biosólidos; fermentación láctica; lodos residuales; vermicompostaje

ABSTRACT

This study evaluated the efficiency of Lactic Fermentation (TFL) and Vermicomposting (TVC) as biological treatments for reducing the microbiological contaminant load and stabilizing the organic matter in residual sludge generated by the Magollo Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in the city of Tacna. The research was prompted by the increasing accumulation of sludge due to the plant's operational capacity being exceeded, necessitating sustainable alternatives for sludge management. An experimental design was employed, involving the initial physicochemical and microbiological characterization of the sludge, followed by the application of treatments using Lactic Acid Bacteria (*Lactobacillus paracasei*) and earthworms (*Eisenia foetida*). Parameters such as pH, conductivity, temperature, and microbial load were monitored during the process. The results evidenced that TVC was more efficient in physicochemical stabilization, reducing Organic Matter down to 43,0%. In contrast, TFL demonstrated sanitary potential (acidification to a pH of 5,40 and Absence of *Salmonella* sp. in one replicate). However, the short treatment time proved insufficient, as the Analysis of Variance (ANOVA) confirmed that a significant reduction of neither *Escherichia coli* nor *Viable Helminth Eggs* was achieved. It is concluded that, while both treatments are viable and complementary alternatives, their full efficiency and compliance with the sanitation criteria (D.S. N° 015-2017-VIVIENDA) require the extension of the application period or the implementation of combined processes.

Keywords: biosolids; lactic fermentation; residual sludge; vermicomposting

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales es un pilar fundamental para la salud pública y la protección del medio ambiente. Sin embargo, este proceso esencial genera un subproducto complejo y masivo: los lodos residuales. Estos lodos, ricos en materia orgánica y nutrientes, pero también con posibles componentes perjudiciales, representan un desafío logístico y económico para las plantas de tratamiento, ya que requieren procesos adicionales costosos para su estabilización y disposición final.

En ciudades con un crecimiento demográfico acelerado, como Tacna, este desafío se intensifica. La mayor demanda de servicios de saneamiento incrementa la carga sobre las infraestructuras existentes. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Magollo, diseñada para cubrir las necesidades de la población y proveer agua para agricultura, opera actualmente por encima de su capacidad. Esta sobrecarga no solo limita la eficiencia del tratamiento de agua, sino que también conduce a una generación y acumulación creciente de lodos, que carecen de una gestión integral y sostenible.

Paralelamente, existe una oportunidad desaprovechada. A nivel mundial, los lodos tratados adecuadamente, conocidos como biosólidos, se valorizan como excelentes enmiendas orgánicas para suelos agrícolas, mejorando su estructura y fertilidad. No obstante, en el contexto local, el aprovechamiento práctico de este recurso es aún limitado, lo que perpetúa un modelo lineal de "tratar y desechar".

Por lo tanto, es crucial investigar alternativas de tratamiento viables y eficaces. Este estudio se centra en evaluar la combinación de dos técnicas biológicas prometedoras: la fermentación láctica y el vermicompostaje. La primera actúa como un pre-tratamiento que acidifica y desinfecta el material, mientras que la segunda, mediante la acción de lombrices, estabiliza y enriquece el sustrato. El objetivo principal es determinar la factibilidad de este proceso combinado para transformar los lodos residuales de la PTAR Magollo en un biosólido seguro, estable y de calidad, apto para su uso en la agricultura de la región. De esta forma, la investigación busca proponer una solución concreta que permita transitar hacia una gestión circular de los residuos, transformando un pasivo ambiental en un recurso beneficioso para el desarrollo agrícola local sostenible. por lo que el presente estudio considera lo siguiente:

El capítulo I planteamiento del problema, que considera la descripción, formulación del problema, la justificación e importancia, los alcances y limitaciones, objetivos y las hipótesis.

El capítulo II Marco teórico, que considera los antecedentes del estudio, las bases teóricas y la definición de términos.

El Capítulo III: Marco Metodológico, que considera el tipo y diseño de investigación, la población y muestra, la operacionalización de variables, las técnicas e instrumentos para recolección de datos, procesamiento y análisis de datos.

Capítulo IV: Que considera los resultados de acuerdo con las variables de estudio.

Capítulo V: Que puntualiza la discusión de los resultados, considerando los antecedentes y bases teóricas de la investigación.

Finalmente, las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

Las plantas de tratamiento de aguas residuales permiten gestionar adecuadamente los efluentes domésticos e industriales, sin embargo, generan subproductos conocidos como lodos residuales, que presentan grandes cantidades de materia orgánica, nutrientes y agentes patógenos, por lo que su manejo requiere procesos adicionales para su estabilización y transporte hacia su disposición final, lo que representa costos adicionales para las plantas de tratamiento (Cupe y Juscamaita, 2018).

El crecimiento demográfico en la ciudad de Tacna ha sido bastante elevado, manifestándose una mayor demanda de servicios de agua y saneamiento (Muñante et al., 2022). Para cubrir esta brecha, se construyó la PTAR Magollo que además de satisfacer las necesidades de la población, también provee agua para riego a una extensión de un total de 1,952 ha de cultivos temporales, perennes y forestales paisajísticos (Ministerio del Ambiente del Perú, 2009). Sin embargo, la generación de aguas residuales viene sobrepasando la capacidad para la que fue construida la planta, por lo que no es posible que esta brinde un tratamiento eficiente (SUNASS, 2013). Es así que, actualmente, existe una mayor generación y acumulación de lodos residuales (More, 2015).

El uso beneficioso de los biosólidos (lodos) como fertilizantes o abonos en la agricultura ha sido objeto de numerosos estudios; sin embargo, su aplicación práctica en la región es algo limitada (Rodríguez et al., 2020). Dada esta situación, el presente estudio evaluará la fermentación láctica y el vermicompostaje para el tratamiento de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Magollo – Tacna. El objetivo es determinar su viabilidad como biosólido en la agricultura local, contribuyendo así a una gestión más sostenible y aprovechamiento de este residuo.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Qué eficiencia presentan la fermentación láctica y el vermicompostaje en la reducción de la carga contaminante microbiológica y estabilización de la materia orgánica de los lodos residuales de la PTAR Magollo?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales?
- b. ¿Cuál es el efecto de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje en la reducción de contaminantes y estabilización de los lodos residuales?
- c. ¿Cómo se diferencian los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje en la reducción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales?

1.3 Justificación e Importancia

Esta investigación se justifica ya que la gestión de lodos residuales en la PTAR Magollo representa un problema creciente debido al incremento en la demanda de servicios de agua y saneamiento en la ciudad de Tacna. Esta PTAR, construida para cubrir las necesidades de la población y proveer agua para riego, se ha visto sobrepasada en su capacidad para tratar eficientemente las aguas residuales, lo que ha ocasionado una mayor generación y acumulación de lodos residuales (Quispe y Rebaza, 2022). El reaprovechamiento de estos lodos como biosólido podría ser una alternativa sostenible para su gestión, ya que reduce los costos operativos y contribuye a una economía circular (Bluegold, 2021).

1.3.1 Importancia Social

El reaprovechamiento de los lodos residuales como biosólido tiene un impacto práctico y social significativo, ya que permite dar un uso beneficioso a estos residuos, reduciendo la contaminación y los focos infecciosos que podrían afectar la salud de poblaciones cercanas a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Además, la recuperación de suelos degradados y paisajes mediante el uso de estos biosólidos puede generar empleos y contribuir al desarrollo local (Zabotto et al., 2019).

1.3.2 Importancia Económica

Actualmente, el manejo adecuado de estos lodos implica costos adicionales para las PTAR, ya que requieren procesos adicionales para su estabilización y disposición final. Al utilizar los lodos tratados como insumos agrícolas, se puede disminuir la necesidad de comprar fertilizantes químicos, lo que representa un ahorro significativo para los agricultores. Asimismo, mediante convenios con entidades públicas, como gobiernos locales o regionales, se podría viabilizar su entrega a productores agrícolas, optimizando

la gestión de los residuos de la planta y contribuyendo a la sostenibilidad económica a largo plazo (Dunant, 2015).

1.3.3 Importancia Ambiental

Desde una perspectiva ambiental, el uso de estos biosólidos como enmiendas orgánicas mejora la calidad del suelo, aumentando su fertilidad y capacidad de retención de agua, lo que contribuye a una agricultura más sostenible (Martinez, 2023). Asimismo, al sustituir los fertilizantes químicos por lodos tratados, se reduce la huella de carbono asociada a la producción y transporte de estos productos, lo que contribuye a mitigar el cambio climático.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Reducir la carga contaminante microbiológica y estabilizar la materia orgánica mediante la aplicación de la fermentación láctica y el vermicompostaje en el tratamiento de lodos residuales de la PTAR Magollo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales
- b. Aplicar los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales, evaluando su efecto en la reducción de contaminantes y estabilización del material
- c. Evaluar la eficiencia de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje aplicados a los lodos residuales de la PTAR Magollo

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

La aplicación de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje reduce la carga contaminante microbiológica y estabiliza la materia orgánica de los lodos residuales de la PTAR Magollo.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- a. Los tratamientos biológicos aplicados reducen significativamente la carga contaminante y mejoran la estabilidad de los lodos residuales

- b. Existen diferencias significativas entre la fermentación láctica y el vermicompostaje en la reducción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales de la PTAR Magollo

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Segura (2018), en su estudio “Saneamiento y disposición de biosólidos provenientes de lodos sépticos residuales”, evaluó alternativas para el tratamiento y aprovechamiento de biosólidos generados a partir de lodos sépticos. Para lo cual, comparó dos métodos de higienización: la fermentación láctica, que empleó tres cepas de bacterias ácido-lácticas junto con tres fuentes de carbono, y el encalado, aplicado con distintos tipos de cal, ambos tratamientos se realizaron de manera simultánea y bajo condiciones ambientales controladas. La fermentación láctica se realizó en dos fases: el aislamiento de las bacterias y, posteriormente, su inoculación en los lodos, en este proceso se determinó las dosis óptimas correspondientes a 0,22 g de dextrosa/g de lodo y 0,20 g de melaza/g de lodo, alcanzando un pH igual o menor a 3,89 y la eliminación total de coliformes. Por otro lado, con el encalado, la adición de 0,12 g de CaO/g de lodo permitió alcanzar un pH superior a 12 y también una eliminación completa de coliformes. Segura concluyó que ambos tratamientos son efectivos en la eliminación de coliformes y que los biosólidos tienen un potencial beneficio como fertilizantes orgánicos, al contener una composición nutricional similar a la de otros abonos orgánicos como estiércol de vaca, vermicompost y gallinaza.

Andreev et al. (2018), en su revisión titulada “Fermentación láctica de excrementos humanos para aplicación agrícola”, evaluaron el potencial agronómico de excretas humanas separadas en origen tratadas mediante fermentación láctica. El estudio destaca que este tratamiento reduce patógenos significativamente (hasta 7 log CFU g⁻¹ en bacterias como *Enterobacteriaceae*, *Staphylococcus* y *Clostridium* en un periodo de 7 a 10 días), disminuye la pérdida de nutrientes y los compuestos malolientes, lo que eleva su valor agrícola. Sin embargo, reconocen que algunos patógenos más resistentes, como *Ascaris*, no siempre se eliminan por completo. La aplicación directa de heces lácticamente fermentadas puede enfrentarse a limitaciones como descomposición incompleta, alta concentración de ácidos orgánicos o higiene insuficiente. Por ello, proponen un postratamiento mediante biocarbón, vermicompostaje o compostaje termófilo, el cual estabiliza y sanitiza el material. Finalmente, los ensayos en macetas y campo, usando acondicionadores de suelo tratados con fermentación láctica y postratamiento, mostraron un crecimiento y rendimiento de cultivos mejorado, así como una mejor calidad del suelo al compararse con controles no fertilizados.

Belmeskine et al. (2020), llevaron a cabo un estudio en Argelia con el objetivo de evaluar la factibilidad del vermicompostaje como método de tratamiento para lodos municipales. Utilizaron la especie *Eisenia foetida* y un periodo experimental de 60 días, comparando los cambios en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lodo inicial y final. Los resultados demostraron una reducción del 90 % de coliformes fecales y *E. coli*, una disminución significativa de la materia orgánica volátil y un aumento del nitrógeno total, fósforo y potasio disponibles. Además, el pH final se estabilizó entre 6.8 y 7.2, con olor característico a tierra. Los autores concluyeron que el vermicompostaje permite obtener un producto biológicamente estable, apto para uso agrícola, cumpliendo con las normas internacionales de biosólidos clase B.

Domínguez et al. (2021), realizaron una investigación en España centrada en la evaluación del impacto de las lombrices sobre las comunidades microbianas durante el proceso de vermicompostaje de lodos de depuradora. A través de análisis metagenómicos, se evidenció que la actividad de las lombrices redujo en más del 95 % los microorganismos patógenos y favoreció el crecimiento de bacterias descomponedoras de materia orgánica y hongos beneficiosos. También se observó una disminución de la carga microbiana total y un aumento en la diversidad bacteriana asociada a procesos de nitrificación. Este estudio confirmó que las lombrices no solo descomponen el material orgánico, sino que también mejoran su calidad microbiológica, generando un sustrato seguro y de alta calidad agrícola.

Reyes et al. (2020), analizaron la *estabilización por vermicomposteo de lodos residuales aplicados a la productividad de albahaca (Ocimum basilicum L.)* en México. En este trabajo experimental de 60 días se emplearon lombrices *Eisenia foetida* y se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados mostraron una disminución completa de coliformes totales, *E. coli* y *Salmonella spp.* en los primeros 45 días, y una reducción de la relación C/N de 28:1 a 15:1, lo que evidencia una alta eficiencia de estabilización. Además, las plantas de albahaca cultivadas con el vermicompost producido presentaron un crecimiento 35 % superior y mayor contenido de clorofila en comparación con el control. Esto demostró que el vermicompostaje no solo estabiliza los lodos, sino que convierte un residuo en un recurso agrícola sostenible y bioseguro.

Lugo et al. (2017), desarrollaron un estudio en México sobre la producción de un abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino mediante vermicomposteo. Su propósito fue analizar la interacción entre ambos materiales para mejorar las condiciones del sustrato. Se observó que la mezcla equilibrada (70 % lodo – 30 % estiércol) permitió una relación C/N inicial adecuada para el desarrollo de *Eisenia*

foetida, logrando una reducción significativa de patógenos y la producción de un compost con mayor contenido de materia orgánica estable y nutrientes esenciales. Los autores concluyeron que la adición de estiércol favorece la aireación y la degradación, constituyendo una práctica recomendada para mejorar la eficiencia del vermicompostaje en lodos de PTAR.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Ayala et al. (2022), en su estudio titulado “Higienización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Manchay, y su uso como insumo de cultivo en el año 2021” tuvo como objetivo evaluar la higienización de los lodos provenientes de la PTARD Manchay y su efectividad como insumo en cultivos. Se identificaron y analizaron los lodos, luego se higienizaron aplicando cal viva al 20% y 30% durante 7 días. Mediante análisis de laboratorio, se determinó que los lodos tratados con 20% de cal viva se clasificaron como Clase B, mientras que los tratados con 30% como Clase A según normativas vigentes. Posteriormente, se aplicaron los lodos tratados (15%, 35% y 50%) como insumo en cultivos de zanahoria y betarraga, evaluando su germinación mediante la escala BBCH. Los resultados mostraron que los cultivos de zanahoria germinaron entre 15 y 30 días (siendo más rápido el tratamiento TH2Z2 con 16 días), mientras que las semillas de betarraga lo hicieron entre 10 y 15 días (siendo más rápido el placebo con 12 días). El análisis costo-beneficio reveló que la higienización de lodos es una alternativa rentable, al reducir costos de traslado a rellenos sanitarios. Se concluyó que es posible higienizar los lodos de la PTARD Manchay y utilizarlos como insumo en cultivos de zanahoria y betarraga, permitiendo además una reducción en los costos de traslado.

Pérez (2023), en su investigación titulada “Tratamiento de lodos residuales provenientes de la PTAR PROVISUR del departamento de Lima a través de fermentación láctica” determinó la efectividad del tratamiento por fermentación láctica en la disminución de contaminantes presentes en lodos residuales provenientes de la PTAR Provisur. Pérez empleó un diseño experimental de corte longitudinal con alcance explicativo y recolectó datos mediante la técnica de observación experimental. Para obtener bacterias *Lactobacillus*, utilizó un tratamiento a base de arroz, logrando concentraciones del 15% respecto a la masa del lodo tratado en un reactor anaeróbico de 20 L. Se estableció un diseño 2x2, con dos grupos de control y dos grupos experimentales que contenían bacterias activadas. Los resultados revelaron altas concentraciones de coliformes totales y fecales en el lodo inicial, superando los LMP, con concentraciones mínimas de metales. Se observó una remoción del 99.99% y 100%

de coliformes fecales y totales respectivamente durante un período de 4 semanas de tratamiento. Se concluye que la fermentación láctica es eficiente, especialmente en la remoción de contaminantes biológicos como coliformes, presentando diferencias significativas entre los grupos de control y experimentales con un nivel de confianza del 95%.

Avilés (2011), desarrolló una investigación sobre la efectividad del vermicompostaje como método de estabilización de lodos residuales en la ciudad de Guayaquil. Su objetivo fue determinar si el proceso permitía reducir los microorganismos patógenos y estabilizar la materia orgánica. Los resultados demostraron que después de 45 días de tratamiento con *Eisenia foetida*, los niveles de coliformes fecales y huevos de helmintos disminuyeron hasta en un 90 %, y la relación C/N final fue menor a 15, cumpliendo con los estándares internacionales de biosólidos tipo B. Este estudio confirmó la viabilidad técnica del vermicompostaje en condiciones tropicales y su potencial como alternativa sostenible para la gestión de lodos municipales.

Agüero (2019), evaluó el vermicompostaje de lodos residuales generados por la planta de tratamiento de la Compañía Minera Chungar, en un entorno altoandino (Huánuco, Perú). Se utilizaron lombrices *Eisenia foetida* y un periodo de 50 días. Los resultados demostraron una disminución de 88 % en coliformes fecales, 95 % en *E. coli* y una reducción significativa de la materia orgánica volátil. Asimismo, se logró mantener la humedad entre 65 y 75 % y una temperatura promedio de 26 °C, condiciones óptimas para el proceso. Agüero concluyó que el vermicompostaje puede aplicarse exitosamente en regiones con clima frío, siempre que se controle la humedad y aireación del sistema.

Tito (2022), en su investigación titulada "Influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021", evaluó la aplicación del vermicompostaje como alternativa de recuperación de lodos deshidratados, empleando la lombriz *Eisenia foetida*. La caracterización inicial de los lodos evidenció altas concentraciones de *Escherichia coli*, coliformes totales, sólidos totales, sólidos volátiles y presencia de metales pesados. A partir del séptimo día de tratamiento se observó una disminución significativa de los parámetros microbiológicos y de la concentración de metales pesados, mientras que a los catorce días se evidenciaron cambios físicos notables, como la reducción de olor y variación de color. Asimismo, se registraron descensos relevantes en cromo, sólidos totales y sólidos volátiles. El lodo tratado cumplió con los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA, siendo clasificado como biosólido de Clase B, lo que demuestra la viabilidad del vermicompostaje para el reaprovechamiento de lodos residuales.

Silvestre (2025), en su trabajo “Mejoramiento de la gestión del tratamiento de aguas residuales mediante compostaje y vermicompostaje de lodos residuales”, propuso integrar ambos procesos para optimizar la gestión de residuos en plantas de tratamiento municipales. Los resultados mostraron que la combinación de compostaje inicial y vermicompostaje posterior permitió obtener un producto con mayor estabilidad y menor carga microbiana en un tiempo reducido. Silvestre destacó que esta técnica combinada es viable económicamente y contribuye al cumplimiento de la normativa peruana sobre lodos residuales, favoreciendo la sostenibilidad de la gestión del saneamiento en municipios pequeños.

2.1.3 Antecedentes Locales

Muñante et al. (2022), en su artículo titulado “Aprovechamiento de estiércol vacuno y pasto seco en la vermiestabilización de lodos residuales de la PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) Magollo”, se centra en el uso de la vermiestabilización, utilizando lombrices californianas (*Eisenia foetida*) junto con estiércol vacuno y pasto seco, para tratar los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Magollo. Muñante et al. aplicó un diseño factorial multinivel 4 x 2 con tres repeticiones, evaluando diferentes cantidades de estiércol y pasto. Los resultados de su investigación demostraron que un aumento en la cantidad de material orgánico conllevó a un incremento en el pH y la conductividad eléctrica de los sustratos. Además, se observó que el tratamiento 8, que consistía en 1 kg de estiércol y 0,5 kg de pasto seco, tuvo el mayor índice de germinación al 5 % de extractos de lodo, evidenciando la efectividad de la vermiestabilización en la reducción de la toxicidad de los lodos residuales.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son una combinación de desechos líquidos procedentes de hogares, instituciones y establecimientos comerciales e industriales. Estas aguas son recolectadas y transportadas a una planta de tratamiento municipal a través de una red de tuberías y, en ocasiones, mediante el uso de bombas (Metcalf, 1995).

Romero (2004) define las aguas residuales como aguas negras, provenientes de los inodoros, y aguas grises, originadas en tinas, lavamanos, lavadoras y duchas. Estas aguas poseen diversas características físicas, químicas y biológicas.

2.2.2 Características Físicas

Estas aguas tienen diversas características físicas que son esenciales para su análisis y tratamiento como el color, olor, sólidos, temperatura y turbiedad. Se definen de la siguiente manera (Metcalf, 1995):

- *Color*: Generalmente, las aguas residuales son grisáceas, aunque pueden oscurecerse a gris oscuro o negro debido a procesos anaeróbicos durante su transporte en las redes de alcantarillado.
- *Olor*: Proviene de la liberación de gases durante la descomposición de materia orgánica, principalmente sulfuro de hidrógeno, que puede ser desagradable y peligroso en altas concentraciones.
- *Sólidos*: Las aguas contienen sólidos totales y suspendidos, los cuales se sedimentan en el fondo, formando lodos o fangos, que deben ser gestionados adecuadamente.
- *Temperatura*: Es un parámetro en la calidad del agua residual que influye en la vida acuática, la velocidad de las reacciones químicas, la concentración de oxígeno disuelto y la actividad bacteriana.
- *Turbidez*: Determinada por la cantidad de sólidos en suspensión, la turbidez reduce la transmisión de luz.

2.2.3 Características Químicas

Los lodos residuales presentan diversas características químicas, los cuales se definen de la siguiente manera (Ayala et al., 2022):

- *Materia orgánica*: está compuesta por material procedente de origen animal o vegetal y sustancias sintéticas como: proteínas, carbohidratos, grasas, pesticidas y productos químicos (Metcalf, 1995; Ayala et al., 2022).
- *Compuestos orgánicos*: aquellos que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y, en ocasiones, nitrógeno (Marín y Osés, 2013).
- *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)*: es la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos en el proceso de oxidación de materia orgánica, este parámetro es clave para diseñar y evaluar los tratamientos biológicos destinados a eliminar materia orgánica (Romero, 2004).
- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: se refiere a la cantidad de oxígeno que requiere un agente químico para oxidar la materia orgánica (Romero, 2004).

- *pH*: indica la concentración de iones de hidrógeno, siendo un parámetro esencial para evaluar el grado de acidez o alcalinidad, en valores extremos puede afectar la proliferación de especies biológicas (Metcalf, 1995).
- *Alcalinidad*: es la capacidad de neutralizar ácidos, importante en procesos biológicos de eliminación de nutrientes y tratamientos anaeróbicos (Romero, 2004).
- *Cloruros*: son producto de la disolución de suelos y rocas, aunque también se encuentran en las heces humanas (Metcalf, 1995).
- *Nitrógeno*: es primordial para el crecimiento de plantas, sin embargo, en exceso puede favorecer la eutrofización, por lo que requiere control (Metcalf, 1995).
- *Fósforo*: facilita el crecimiento de algas y otras plantas acuáticas, similar al nitrógeno (Metcalf, 1995).
- **Azufre**: es liberado al ambiente como resultado de la degradación de proteínas (Metcalf, 1995; Ayala et al., 2022).
- *Metales pesados*: se encuentran presentes en bajas concentraciones, su exceso impide el reúso de aguas residuales (Metcalf, 1995; Ayala et al., 2022).
- *Gases*: incluyen nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, y por descomposición orgánica, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano (Metcalf, 1995; Ayala et al., 2022).
- *Oxígeno disuelto*: es fundamental para la subsistencia de microorganismos aeróbicos (Metcalf, 1995; Ayala et al., 2022).
- *Contaminantes emergentes*: son aquellas sustancias que representan un riesgo potencial a la salud y el medio ambiente, como los fármacos, esteroides, hormonas, pesticidas, entre otros (Ryder, 2017).

2.2.4 Características Biológicas

- *Algas*: utilizan nutrientes y dióxido de carbono, proporcionando oxígeno en procesos aeróbicos. Su proliferación puede causar eutrofización y olores desagradables (Romero, 2004).
- *Organismos patógenos*: son aquellas bacterias, virus, protozoos y helmintos, presentes en aguas residuales por excreción humana, pueden causar enfermedades gastrointestinales (Metcalf, 1995).

2.2.5 Clasificación de las Aguas Residuales

Según su origen, las aguas residuales se clasifican de la siguiente manera:

a. Aguas residuales domésticas

Estas aguas provienen de áreas urbanas, comerciales, instituciones y similares (Metcalf, 1995).

b. Aguas residuales municipales

Estas aguas son recolectadas por el sistema de alcantarillado de una ciudad o población y transportadas a una planta de tratamiento (Romero, 2004).

c. Aguas residuales industriales

Proceden de áreas industriales y suelen contener diferentes tipos de contaminantes específicos a las actividades industriales (Metcalf, 1995).

d. Aguas pluviales

Proviene de la escorrentía superficial generada por las lluvias (Ayala et al., 2022). Idealmente, deberían ser recolectadas por un sistema de alcantarillado separado del utilizado para otros tipos de aguas residuales, permitiendo su vertido directo en cursos de agua naturales sin necesidad de tratamiento previo (Metcalf, 1995).

2.2.6 Tratamiento de Aguas Residuales

Antes de que las aguas residuales se viertan en cuerpos de agua como ríos o lagos, o se reutilicen, deben someterse a una serie de operaciones unitarias (procesos físicos) y procesos unitarios (procesos químicos y biológicos) para eliminar los sólidos suspendidos (Ayala et al., 2022). Estas etapas de tratamiento se agrupan en tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios (Metcalf, 1995), tal como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 1*Métodos y tipos de tratamiento de aguas residuales*

Métodos de tratamiento	Tipos de tratamiento	Tratamiento
Operaciones unitarias	Pretratamiento	Cribado Desbaste Desarenado Desengrasado Homogenización
	Tratamiento primario	Sedimentación Floculación Flotación Filtración Tamizado Fosas sépticas Tanques Imhoff
Procesos unitarios	Tratamiento secundario	Lodos activados Aireación prolongada Estabilización por contacto Lecho fijo Lagunaje con aireación Sedimentación
	Tratamiento terciario o avanzado	Osmosis inversa Electrocoagulación Cloración y ozonización Nitrificación y desnitrificación Adsorción Insolubilización Microfiltración

Nota. Tomado de Ayala et al. (2022).

2.2.6.1 Pretratamiento

El pretratamiento se enfoca en eliminar materiales gruesos que flotan en la superficie y pueden causar problemas en el procesamiento, mantenimiento y funcionamiento de las etapas posteriores del tratamiento (Bermeo, 2016).

2.2.6.2 Tratamiento Primario

El tratamiento primario utiliza operaciones físicas para disminuir los sólidos sedimentables y flotantes, reduciendo así la DBO y la carga bacteriológica del agua

residual (Ayala et al., 2022). Este proceso prepara el agua para el tratamiento secundario (Bermeo, 2016).

2.2.6.3 Tratamiento Secundario

Conocido también como tratamiento biológico, el tratamiento secundario emplea procesos químicos y biológicos para reducir la materia orgánica. Mediante la adición de microorganismos que consumen la materia orgánica (floculación) y un proceso de sedimentación posterior, se elimina el flóculo generado (Bermeo, 2016).

2.2.6.4 Tratamiento Terciario

Este tratamiento también conocido como tratamiento avanzado, se utiliza para eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos que no se hayan eliminado completamente durante el tratamiento secundario. Estos compuestos pueden variar desde simples, como calcio, potasio, nitratos y fosfatos, hasta complejos sintéticos (Bermeo, 2016).

2.2.7 Lodos Residuales

Amador et al. (2015) explican que los lodos provenientes de las PTAR son el resultado de la aglomeración de partículas sólidas presentes en los residuos líquidos o de la formación de nuevas partículas sólidas en suspensión. Estos lodos, también conocidos como biosólidos, pueden presentarse en forma líquida, sólida o semisólida y se producen a lo largo de los procesos biológicos, químicos y mecánicos de descontaminación en las PTAR.

Mancipie y Trivino (2018) indican que los lodos están compuestos por una combinación de agua y sólidos separados del agua residual durante los procesos de purificación en las plantas de tratamiento. Las características y propiedades de las aguas residuales determinan la composición de los lodos, así como de los procesos físicos o químicos utilizados para su tratamiento. Amador et al. (2015) señalan que los lodos residuales contienen una gran cantidad de nutrientes, microorganismos, materia orgánica, metales y agua, lo que resulta en una composición que incluye varios agentes contaminantes.

De La Cruz y Ventocilla (2019) en su estudio encontraron significativas concentraciones de coliformes totales y coliformes fecales, además de concentraciones de metales como cadmio (Cd) con 10.39 mg/kg y cobre (Cu) con 1,312.95 mg/kg, en lodos resultantes de una (PTAP) sin ser estabilizados; resultando estos valores superiores a los límites máximos en lodos para uso de suelos forestales según la

Normativa Internacional Chilena. Asimismo, la calidad del lodo en cuanto al nivel de estabilización, depende directamente del tipo de tratamiento que se les aplica. Es por ello que, su caracterización es fundamental, tanto para identificar la acumulación de nutrientes que favorecen su uso en suelos, como para determinar los contaminantes que deben ser eliminados; para un óptimo manejo, es necesario evaluar su composición química, incluido la aglomeración de metales, la cantidad de patógenos y parásitos que contienen.

2.2.8 Tipos de Lodos Residuales

La naturaleza del lodo dependerá del nivel de tratamiento que reciban las aguas residuales (Serpa, 2017):

- *Lodos de decantación primaria*: suelen presentar una consistencia limosa, con tonalidades entre marrón y gris. Tienen la particularidad de volverse sépticos con facilidad, lo que ocasiona olores intensos y desagradables.
- *Lodos de precipitación química*: se caracterizan por su coloración negra; aunque pueden emitir olores, estos son generalmente menos intensos que los de los de decantación primaria, además de que su descomposición ocurre de manera más lenta.
- *Lodos del tratamiento secundario*: normalmente son de color marrón, de textura relativamente ligera y, debido a la aireación que reciben, no generan olores de manera inmediata. Sin embargo, cuando la aireación es insuficiente, se oscurecen y producen olores fuertes, similares a los fangos primarios.
- *Lodos procedentes de lechos bacterianos*: presentan un color marrón y, cuando son frescos, no suelen desprender olores molestos. Su degradación es más lenta en comparación con los lodos del sistema secundario de lodos activados, salvo en situaciones donde predominen organismos superiores (como gusanos), lo que puede acelerar la generación de malos olores.
- *Lodos digeridos*: su color oscila entre marrón oscuro y negro, y contienen cantidades considerables de gas. Si la digestión es adecuada, no generan olores perceptibles o, en todo caso, emiten un olor leve y no desagradable.

2.2.9 Estabilización de Lodos

Saldaña y Castillo (2022) nos dicen que la estabilización de lodos es crucial dependiendo de su disposición o reutilización, y su propósito es eliminar olores, minimizar la capacidad de putrefacción y reducir la carga orgánica. De manera similar, Amador et al. (2015) señalan que la estabilización de lodos permite degradar la materia orgánica, eliminar olores, reducir el volumen y neutralizar organismos patógenos, facilitando así su reutilización o disposición final adecuada. Ambos autores describen diversos métodos de estabilización de lodos, incluyendo espesamiento, digestión anaerobia (biológica), digestión aerobia (biológica), tratamiento químico, incineración, pirolisis, ozonización, deshidratación, compostaje (biológica) y lombricultura (biológica). En particular, la digestión anaerobia, como mencionan Saldaña y Castillo (2022), es un proceso realizado sin presencia de oxígeno, mediante el cual se generan ácidos volátiles y gas metano gracias a la descomposición de materia orgánica.

Un estudio realizado por Cupe y Juscamaita (2018) sobre la estabilización de lodos residuales generados en una PTAR de una cervecería, menciona que estas industrias producen grandes volúmenes de lodos contaminantes. Tradicionalmente, estos lodos se disponen mediante entierro en rellenos sanitarios o incineración, en lugar de ser tratados adecuadamente para su estabilización y aprovechamiento. Por ello, los autores aplicaron la fermentación homoláctica para tratar estos lodos y producir un abono orgánico líquido acelerado (ALA), empleando bacterias probióticas y melaza. (De La Cruz y Ventocilla, 2019)

2.2.10 Fermentación Láctica

Según Faife et al. (2020), las bacterias lácticas, como los *Lactobacillus sp.*, son capaces de sintetizar ácido láctico a partir de azúcares y diversos carbohidratos obtenidos del metabolismo de levaduras y bacterias fotosintéticas. Este ácido láctico no solo posee propiedades bactericidas que eliminan microorganismos patógenos, sino que también contribuye a la descomposición de la materia orgánica. Durante el proceso de fermentación, los *lactobacillus* utilizan los productos resultantes de la hidrólisis de la materia orgánica para producir ácidos orgánicos. Además, la interacción con microorganismos fotosintéticos genera ácido sulfúrico, utilizado por bacterias reductoras de sulfatos, lo que resulta en la formación de sacáridos que se reciclan junto con otros derivados orgánicos para continuar el ciclo.

Camargo (2019) destaca que el empleo de *lactobacillus* para estabilizar lodos residuales es un proceso económico y sencillo que facilita la eliminación de patógenos

presentes en estos residuos. El cual se consigue mediante la fermentación láctica de glucosa y otros glúcidos, lo que reduce el pH a niveles entre 4 y 5, eliminando microorganismos como los coliformes termotolerantes o fecales incapaces de sobrevivir en este entorno. En su estudio, Camargo evaluó la efectividad de estas bacterias en un reactor UASB, logrando reducir en un 99% la concentración de estos microorganismos contaminantes, alcanzando niveles inferiores a 3 NMP/g (Camargo, 2019).

Además, De La Cruz y Ventocilla (2019) aplicaron la estabilización anaeróbica de lodos utilizando *Lactobacillus*, demostrando su capacidad para disminuir significativamente los niveles de coliformes totales y fecales, así como mitigar olores desagradables mediante la generación de medios ácidos con bajos niveles de pH.

2.2.10.1 Género *Lactobacillus*

El género *Lactobacillus* destaca por su gran capacidad para convertir azúcares en ácido láctico y por soportar concentraciones elevadas de este ácido. Estas bacterias tienen forma de bastones que con frecuencia se agrupan en cadenas y, por lo general, no son móviles. Hasta 2011 se reconocían unas 96 especies dentro de este género (Amarocho Cruz, 2011). Según su modo de fermentar carbohidratos, se clasifican en tres grandes subgrupos:

- *Lactobacilos estrictamente homofermentativos (Thermobacterium)*: incapaces de fermentar pentosas y gluconato. Presentan células alargadas y rectas, e incluyen especies como *Lactobacillus delbrueckii*, *L. acidophilus*, *L. gasseri* y *L. helveticus* (Leveau y Bouik, 2000), comunes en productos lácteos fermentados a temperaturas superiores a 40 °C. (Amarocho Cruz, 2011) (Quicazan De Cuenca, 2008).
- *Especies homofermentativas facultativas*: realizan homofermentación de hexosas, pero pueden fermentar pentosas y gluconato de forma heterofermentativa. En este grupo se encuentran especies como *Lactobacillus casei*, *L. plantarum* y *L. sake* (Quicazan De Cuenca, 2008) (Leveau y Bouik, 2000).
- *Especies heterofermentativas estrictas*: como *Lactobacillus fermentum*, *L. brevis*, *L. reuteri*, *L. kefir* y *L. sanfrancisco*, caracterizadas por su alta producción de dióxido de carbono a partir de glucosa (Amarocho Cruz, 2011) (Quicazan De Cuenca, 2008).

2.2.11 Biosólido

Los biosólidos son materiales biológicamente ricos obtenidos principalmente del tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, que han sido sometidos a procesos diseñados para reducir o eliminar organismos causantes de enfermedades (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2012). Estos productos pueden estar en forma sólida, semisólida o líquida y contienen compuestos naturales y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Representan una fuente potencialmente útil de nutrientes, ya que concentran la mayoría de los elementos consumidos por los humanos, que se encuentran en la orina y las heces. De esta manera, aportan recursos valiosos como agua, urea, minerales, sales y otros nutrientes (Kumar et al., 2017).

En su composición encuentran nutrientes importantes como el carbono orgánico (C), el nitrógeno (N), el fósforo (P), el potasio (K), el azufre (S), el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y varios microelementos útiles para las plantas y la fauna del suelo. Las concentraciones de estos nutrientes dependen de la fuente del agua cruda, de los productos químicos utilizados en la limpieza y de los procesos de tratamiento específicos. Es una fuente secundaria valiosa y renovable de fósforo y puede reemplazar los costosos fertilizantes inorgánicos, lo que ayuda a mantener los suministros limitados de rocas fosfatadas (Withers et al., 2016).

2.2.12 Vermicompostaje

El vermicompostaje es una biotecnología sostenible que utiliza la acción sinérgica de lombrices de tierra y microorganismos descomponedores para transformar materiales orgánicos biodegradables en un producto estable, humificado y con alto valor agronómico. Este proceso ocurre en condiciones mesofílicas (20–30 °C), permitiendo mantener la actividad microbiana sin generar olores desagradables ni pérdidas significativas de nutrientes (Belmeskine et al., 2020).

A diferencia del compostaje tradicional, que requiere temperaturas termofílicas, el vermicompostaje combina procesos físicos, químicos y biológicos que resultan en un producto con olor a tierra, textura fina y baja carga microbiana. (Domínguez et al., 2021) señalan que las lombrices actúan como biofiltros biológicos, modificando la estructura microbiana del material y reduciendo la presencia de patógenos.

2.2.12.1 Lombriz *Eisenia Foetida*

La especie más empleada en los procesos de vermicompostaje es *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana), debido a su alta tasa de reproducción, adaptabilidad a distintos tipos de residuos y tolerancia a variaciones ambientales (Avilés, 2011). Este anélido prospera a temperaturas entre 18–28 °C y con humedad del 60–80 %. Su sistema digestivo alberga bacterias, actinomicetos y enzimas que promueven la descomposición de compuestos orgánicos y la eliminación de *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* (Domínguez et al., 2021).

2.2.12.2 Procesos y Mecanismos de Estabilización

El vermicompostaje se desarrolla en tres fases principales:

- *Precomposteo*: degradación inicial de compuestos fácilmente biodegradables, reduciendo la toxicidad y temperatura del lodo.
- *Digestión activa*: las lombrices fragmentan e ingieren el material, aumentando la superficie de contacto y promoviendo la actividad microbiana.
- *Maduración*: estabilización de la materia orgánica, reducción de patógenos y neutralización del pH (Reyes et al., 2020).

Durante la digestión, las lombrices generan gránulos finos ricos en microorganismos benéficos. La respiración aerobia y la acción enzimática promueven la formación de sustancias húmicas que mejoran la capacidad de intercambio catiónico y la retención de agua (Aguero, 2019).

2.2.12.3 Parámetros de Control

El éxito del vermicompostaje depende de mantener condiciones adecuadas:

- *Temperatura*: 25–30 °C.
- *Humedad*: 70–80 %.
- *pH*: entre 6.5 y 7.5.
- *Relación C/N inicial*: 25–30:1.
- *Aireación*: para evitar condiciones anaerobias.

El control de estos parámetros asegura la supervivencia de las lombrices y la eficiencia del proceso. Un pH neutro y un olor terroso indican madurez (Reyes et al., 2020).

2.2.13 Marco normativo aplicable en el Perú

En el Perú, la gestión y disposición final de los lodos generados en plantas de tratamiento está regulada por el *Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA*, que aprueba el *Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)*.

Esta norma establece los parámetros microbiológicos, fisicoquímicos y de estabilización que deben cumplir los lodos para su uso o disposición. Véase tabla 2 y 3.

Tabla 2

Parámetro de estabilización

Estabilización de lodos
<u>Concentración de materia orgánica:</u> Materia orgánica (SV) ≤ 60% de Materia seca (ST)

Nota. Tomado de D.S. N°015-2017-VIVIENDA (2017).

Tabla 3

Parámetros de higienización

Parámetros de higienización de biosólidos		
Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	<i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/ 1g ST o <i>Salmonella sp.</i> < 1 NMP / 10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, o en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II del D.S. N° 015-2017-VIVIENDA.
Indicador de Huevos de Helmintos	<i>Huevos viables de Helmintos</i> < 1 / 4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

Nota. Tomado de D.S. N°015-2017-VIVIENDA (2017).

Según el *D.S. N° 015-2017-VIVIENDA*, los biosólidos se clasifican en (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017):

- *Clase A*: lodos estabilizados con reducida presencia de patógenos, aptos para uso agrícola directo en cultivos de consumo humano.
- *Clase B*: lodos tratados con reducción parcial de patógenos, aptos para suelos forestales o cultivos no destinados al consumo humano directo.

2.3 Definición de términos

2.3.1 Agentes patógenos

Son microorganismos y parásitos capaces de provocar enfermedades en los humanos, este grupo incluye bacterias, protozoarios, hongos y virus, así como los huevos de ciertos parásitos (helminetos) que se encuentran en lodos o biosólidos. Estos organismos pueden provocar desde enfermedades hasta brotes epidémicos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.2 Agua residual

Son los desechos líquidos proveniente de las descargas por el uso del agua en actividades domésticas o no domésticas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.3 Agua residual tratada

Es el agua residual que ha sido sometida a diferentes procesos para la eliminación de componentes físicos, químicos y microbiológicos para su disposición final o reúso (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.4 Bacterias lácticas

Son microorganismos grampositivos y anaerobios facultativos, cuya principal función es realizar la fermentación láctica mediante la transformación de azúcares en ácido láctico, generando la acidificación del medio y dificultando el desarrollo de los agentes patógenos.

2.3.5 Biosólidos

Son materiales obtenidos a partir de la estabilización de la materia orgánica presente en los lodos del tratamiento de aguas residuales. Sus características físicas, químicas y microbiológicas los hacen aptos para reutilizarse como acondicionadores de suelo,

favoreciendo las condiciones de las áreas en donde se aplican (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.6 Estabilización de Lodos

Es el proceso de estabilización de los lodos permite la reducción del contenido de materia orgánica con el fin de reducir los patógenos, eliminar los olores, y reducir o eliminar la capacidad de fermentación de la misma (Hernández J. , 2004).

2.3.7 Higienización

Es el procedimiento que reduce la concentración de patógenos y otros indicadores de contaminación fecal en los lodos, hasta alcanzar los niveles especificados en la normativa vigente para el “Reaprovechamiento de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.8 Insumo de cultivo

Es el conjunto de elementos que intervienen en la producción de otros bienes, en este caso, los recursos necesarios para el crecimiento y mantenimiento de cultivos de diversas especies (Ayala et al., 2022).

2.3.9 Lodo Residual

Este subproducto es generado del tratamiento primario, secundario y terciario de las aguas residuales domesticas e industriales (Onofre, 2018).

2.3.10 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Una PTAR es una instalación diseñada para procesar aguas contaminadas de origen doméstico e industrial. Su función principal es eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua antes de su descarga o reutilización (Ayala et al., 2022).

2.3.11 Reaprovechamiento

Es el procedimiento a través del cual se obtienen nuevamente beneficios de los biosólidos, permitiendo su reutilización en aplicaciones alternativas y maximizando su valor como recurso (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.3.12 Tratamiento de Aguas Residuales

Es el conjunto de procesos y operaciones físicas, químicas, y biológicas diseñado para reducir la concentración de los contaminantes no deseados (Donado, 2013).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diseño de la investigación

Experimental, ya que la variable independiente fue manipulada intencionalmente de manera controlada a fin de generar cambios en la variable dependiente a partir de los cuales se obtuvieron datos mediante la observación en varios períodos de estudio, que fueron analizados para determinar los comportamientos y causas del mismo sobre lo obtenido (Palomino Orizano et al., 2019).

3.2 Acciones y actividades

3.2.1 Acciones

- Se obtuvieron previamente las muestras de lodos residuales de la PTAR Magollo para análisis de laboratorio.
- Se caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente los lodos residuales previos al tratamiento.
- Se activaron las cepas de bacterias *Lactobacillus paracasei* para el tratamiento de fermentación láctica.
- Se obtuvieron las lombrices *Eisenia Foetida* para el tratamiento de vermicompostaje.
- Se elaboraron las composteras utilizando tres jabas de madera, acondicionadas con las condiciones óptimas para el vermicompostaje.
- Se ajustó el porcentaje de humedad (70% – 80%) y se precompostó (16 días) los lodos residuales para aplicación de los tratamientos.
- Se aplicaron los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a las muestras de lodos residuales.
- Se extrajeron muestras de los tratamientos para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.
- Se procesaron y analizaron estadísticamente los datos obtenidos durante los tratamientos.

3.2.2 Actividades

a. Obtención de las muestras

Las muestras de lodos residuales de la PTAR de Magollo fueron obtenidas previamente y puestas a disposición para el desarrollo de la investigación, considerando en todo momento las normas de seguridad e higiene, así como el uso de equipos de protección personal inocuos para no alterar la calidad del lodo; así como su adecuado transporte y conservación (Camargo, 2019).

Se contó con 80L de lodos residuales, los cuales fueron almacenados en recipientes plásticos limpios y desinfectados. Posteriormente, se registraron parámetros de temperatura, pH, humedad y conductividad.

Por último, las submuestras fueron homogeneizadas para conformar una sola muestra compuesta representativa.

b. Análisis Físicoquímico y Microbiológico de los lodos

Se enviaron las muestras para su caracterización físicoquímico y microbiológico a un laboratorio previo a la aplicación de los tratamientos, durante la aplicación y al finalizar los tratamientos.

c. Activación de Bacterias *Lactobacillus Paracasei*

Se empleó la cepa liofilizada de *Lactobacillus paracasei* (Lyofast BGP 1, Sacco System – Italia), con aproximadamente 10^{11} UFC por dosis. El procedimiento de activación se realizó siguiendo las recomendaciones de la ficha técnica del fabricante (Sacco System, 2020):

- Primero, se empleó 3 litros de agua destilada estéril como medio base, suplementada con 1 % de melaza como fuente de carbono para favorecer la recuperación metabólica de las bacterias ácido-lácticas.
- Luego, se adicionó 10 dosis del cultivo liofilizado (aprox. 1×10^{12} UFC) directamente sobre el medio, bajo condiciones asépticas.
- Se homogeneizó mediante agitación manual suave por un periodo de 5 a 10 minutos hasta lograr una dispersión completa del polvo.
- Finalmente, la suspensión inoculada se incubó en condiciones mesofílicas (36 ± 2 °C) durante 18 horas, hasta observar una leve turbidez y una disminución del

pH a valores aproximados de 4.5, lo que es un indicador de la activación del cultivo (España Patent No. 2 278 453, 2007).

d. Aplicación del tratamiento de fermentación láctica en los lodos y medición de parámetros

La metodología empleada fue adaptada de la investigación de Camargo (2019) y Pérez (2023):

- Se agregaron 6L de lodos (6 kg) en 6 envases herméticos, los cuales fueron rotulados adecuadamente. En 3 de ellos que se asignaron como grupos de control: TC – 01, TC – 02 y TC – 03, no se añadieron bacterias ni lombrices.
- Por otro lado, en los otros 3 envases, designados como unidades experimentales: TFL – 01, TFL – 02 y TFL – 03 se añadieron las bacterias previamente activadas, incorporando una cantidad de 1 L en cada grupo experimental.
- A cada unidad experimental se adicionó 0.5% de melaza diariamente, con el fin de proporcionar una fuente de carbono para crecimiento bacteriano.
- Finalmente, de cada unidad experimental se extrajo una muestra de 50 gr para los análisis microbiológicos y una muestra de 500 gr para los análisis fisicoquímicos correspondientes.
- Todas las muestras fueron codificadas de manera adecuada según su condición (control o experimental).

e. Aplicación del tratamiento de vermicompostaje en los lodos y medición de parámetros

Se siguió la metodología establecida por Tito (2022), implementando las recomendaciones del libro de Caballero et al. (2018) adaptando los procesos a las condiciones específicas del tratamiento de los lodos:

- El lodo previamente homogenizado fue incorporado directamente en las cajas de madera acondicionadas, que funcionaron como camas de vermicompostaje, garantizando la oscuridad, la ventilación y el drenaje adecuados para el desarrollo de *Eisenia foetida*.

- Se mantuvo la humedad del sustrato entre 60–80 %, mediante riegos ligeros y control del drenaje, siguiendo parámetros óptimos para la actividad biológica de las lombrices.
- Se incorporaron las lombrices *Eisenia foetida* (1 kg por 6 kg de lodo) en cada unidad experimental, cuidando que la temperatura interna permaneciera entre 20–30 °C, rango recomendado para evitar estrés térmico.
- Se realizó aireación semanal del sustrato para evitar compactaciones y favorecer la oxigenación del sistema.
- Se retiraron los lixiviados diariamente y se monitorearon parámetros como temperatura, humedad, olor, coloración del sustrato y sobrevivencia de las lombrices.
- Al finalizar el tratamiento se recolectaron muestras para análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

f. Diseño experimental

La investigación se realizó usando un Diseño Completamente al Azar (DCA) con un arreglo factorial de 3 x 3, donde se evaluó 2 tratamientos biológicos (Fermentación Láctica y Vermicompostaje) y se tuvo en cuenta 1 grupo de control (Sin tratamiento), con 3 repeticiones por tratamiento y grupo de control. El diseño total contempló 9 unidades experimentales.

3.3 Materiales y/o instrumentos

- Libreta de notas
- Bolsas Ziploc de 2 L
- 4 baldes plásticos de 20 L
- 6 baldes plásticos herméticos de 10 L
- 3 jabas de madera
- 9 envases estériles de 100 mL
- 3 bandejas de plástico
- Palas
- Cooler

- Gel refrigerante
- Guantes de nitrilo
- Mascarillas
- 4 metros de saquillo
- Plástico impermeable doble cara
- Tela gasa
- Cámara
- Medidor multiparámetro
- Balanza digital
- Laptop (procesador)
- Horno de secado
- Mufla
- Agua destilada
- Lombrices *Eisenia foetida*
- Cepas de *Lactobacillus paracasei*
- Melaza

3.4 Población y/o muestra de estudio

La población estuvo constituida por los lodos residuales provenientes de la PTAR Magollo de Tacna. La técnica empleada fue el muestreo no probabilístico o dirigido por conveniencia, en el cual, según Hernández et al. (2014), no se requiere una representatividad estadística de los elementos de la población, sino más bien una cuidadosa y controlada elección relacionada con el propósito de la investigación (Ayala et al., 2022). En este caso, se consideraron 54 litros de lodos, distribuidos en 9 unidades de estudio de 6 litros cada una, conformando 3 grupos de control y 6 grupos experimentales.

3.5 Operacionalización de variables

3.5.1 Variable Dependiente

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

3.5.2 Variable Independiente

Tratamientos de lodos residuales

En la Tabla 4 se muestra la operacionalización de variables.

Tabla 4

Operacionalización de variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas o métodos
Variable dependiente Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos	Conjunto de indicadores que permiten evaluar la calidad, estabilidad e inocuidad del biosólido para su aprovechamiento, conforme a lo establecido en el D.S. N.º 015 -2017- VIVIENDA	Fisicoquímicos	Materia Orgánica pH Humedad Temperatura C.E.	% % °C dS/m	Pérdida por ignición AASHTO T 267 Potenciómetro Medidor multiparamétrico
		Microbiológicos	<i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella sp.</i> <i>Huevos viables de Helmintos</i>	UFC/g Presencia /Ausencia 25g Nº/4g	Método del recuento de colonias
Variable independiente Tratamientos de lodos residuales	Proceso mediante el cual se busca reducir la carga contaminante y estabilizar la materia orgánica presente, a través de la fermentación láctica y el vermicompostaje	Fermentación láctica	% reducción de materia orgánica y factores microbiológicos	%	Variable numérica
			Cumplimiento de la normativa	%	Variable numérica
		Vermicompostaje	% reducción de materia orgánica y factores microbiológicos	%	Variable numérica
			Cumplimiento de la normativa		

3.6 Procesamiento y análisis de datos

Las técnicas de procesamiento de datos incluyeron métodos estadísticos descriptivos, como la creación de tablas y gráficos, para la cual se crearon base de datos en Excel y Word.

Los datos obtenidos se analizaron usando un Diseño Completamente al Azar (DCA). Dado que los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales pueden no presentar una distribución normal, se aplicó un enfoque estadístico paramétrico, tras verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La comparación entre los tratamientos se realizó mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor. En caso de encontrarse diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de Diferencias Mínimas Significativas (LSD) de Fisher para determinar las diferencias estadísticas entre las medias de los tratamientos. El procesamiento de los datos se realizó utilizando el programa Statgraphics Centurion (Ayala et al., 2022).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales

4.1.1 Caracterización fisicoquímica

En la tabla 5 se muestran la caracterización fisicoquímica de los lodos residuales

Tabla 5

Caracterización fisicoquímica de los lodos residuales

Tratamientos	Indicadores	pH	C.E.	T	Humedad	M.O.
			dS/m	°C	%	%
Lodo Inicial	LO – 0	7,66	2,744	21,1	70,7	61,5%

La caracterización fisicoquímica del Lodo Inicial (LO – 0), correspondiente a la muestra tomada en el día cero, es decir, antes de la aplicación de cualquier tratamiento, estableció las condiciones de partida. El potencial de hidrógeno (pH) del lodo se registró en 7,66, indicando una condición ligeramente alcalina. El contenido de materia orgánica (M.O.) fue alto, alcanzando el 61,5%. La humedad del lodo fue de 70,7%, valor que corresponde al nivel ajustado antes de iniciar el montaje experimental. Respecto a la concentración de sales, la Conductividad Eléctrica (C.E.) fue de 2,744 dS/m. Finalmente, se registraron condiciones operacionales mesofílicas, con una temperatura de 21,1 °C.

4.1.2 Caracterización microbiológica

En la tabla 5 se muestra la Caracterización microbiológica de los lodos residuales

Tabla 6

Caracterización microbiológica de los lodos residuales

Tratamientos	Indicadores	<i>Escherichia coli</i>	<i>Salmonella sp.</i>	<i>Huevos viables de Helminfos</i>
		UFC/g		N°/g
Lodo Inicial	LO – 0	$3,8 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	2,0 huevos/g

Con respecto a los resultados de caracterización microbiológica del Lodo Inicial (LO – 0), correspondiente a la muestra tomada en el día cero. El lodo inicial presentó

una carga contaminante de $3,8 \times 10^3$ UFC/g para *Escherichia coli*. Respecto a los patógenos, se confirmó la presencia de *Salmonella sp.* (Presente/25 g). Finalmente, el recuento de *Huevos viables de Helmintos* fue de 2,0 huevos/g.

4.2 Aplicar los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales, evaluando su efecto en la reducción de contaminantes y estabilización del material.

Luego de caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del lodo inicial (LO-0), estos valores fueron tomados como referencia para analizar el efecto de los tratamientos aplicados. De esta manera, los datos del lodo inicial se muestran sombreados en las Tabla 7 y Tabla 8, con el fin de facilitar una comparación clara entre el estado inicial del material y los cambios generados por la fermentación láctica, el vermicompostaje y el tratamiento control.

4.2.1 Efecto en la estabilización fisicoquímica de los lodos residuales

Como se puede apreciar en la Tabla 7 y la figura 1, el Potencial de Hidrógeno (pH) evidenció la capacidad acidificante del proceso frente al valor alcalino del Lodo Inicial (7,66). En los tratamientos de control (TC) el pH se mantuvo en un rango similar al inicial, registrándose valores de 7,4 en el TC – 01, 7,48 en el TC – 02 y 7,63 en TC – 03. Por su parte, los tratamientos de fermentación láctica lograron una acidificación de los lodos, resultando en un valor de 5,44 en el TFL – 01, 5,40 en el TFL – 02 y 5,80 en el TFL – 03. En contraste, los tratamientos de vermicompostaje presentaron un comportamiento distinto, con valores de pH más alcalinos, registrando 8,52 en TVC – 01, 7,99 en TVC – 02 y 8,07 en TVC – 03.

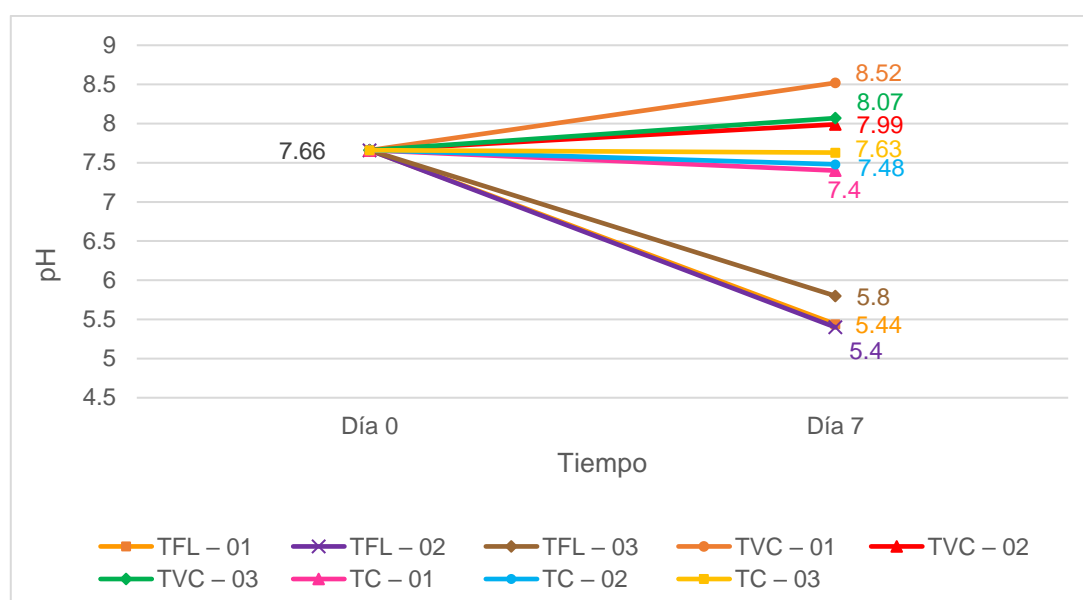
Tabla 7

Caracterización fisicoquímica final de los tratamientos

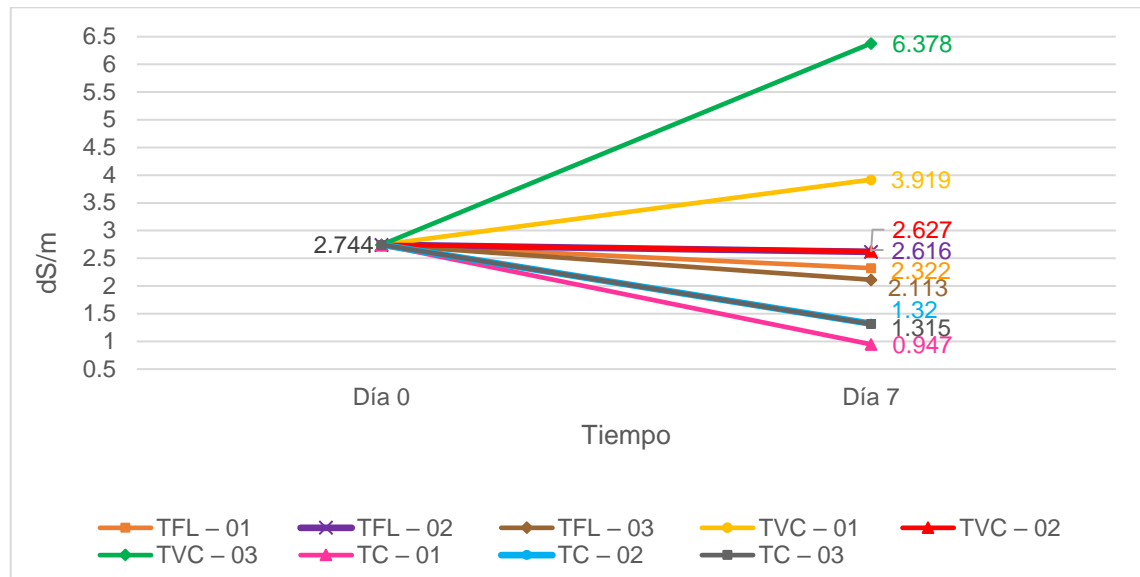
Indicadores		pH	C.E.	T	Humedad	M.O.
Tratamientos			dS/m	°C	%	%
Lodo Inicial	LO – 0	7,66	2,744	21,1	70,7	61,5%
	TFL – 01	5,44	2,322	21,4	69,2	66,0%
	TFL – 02	5,40	2,616	22,0	65,8	68,0%
	TFL – 03	5,80	2,113	21,7	70,4	60,0%
Vermicompostaje	TVC – 01	8,52	3,919	21,8	67,4	45,0%

Tabla 8 (continuación)

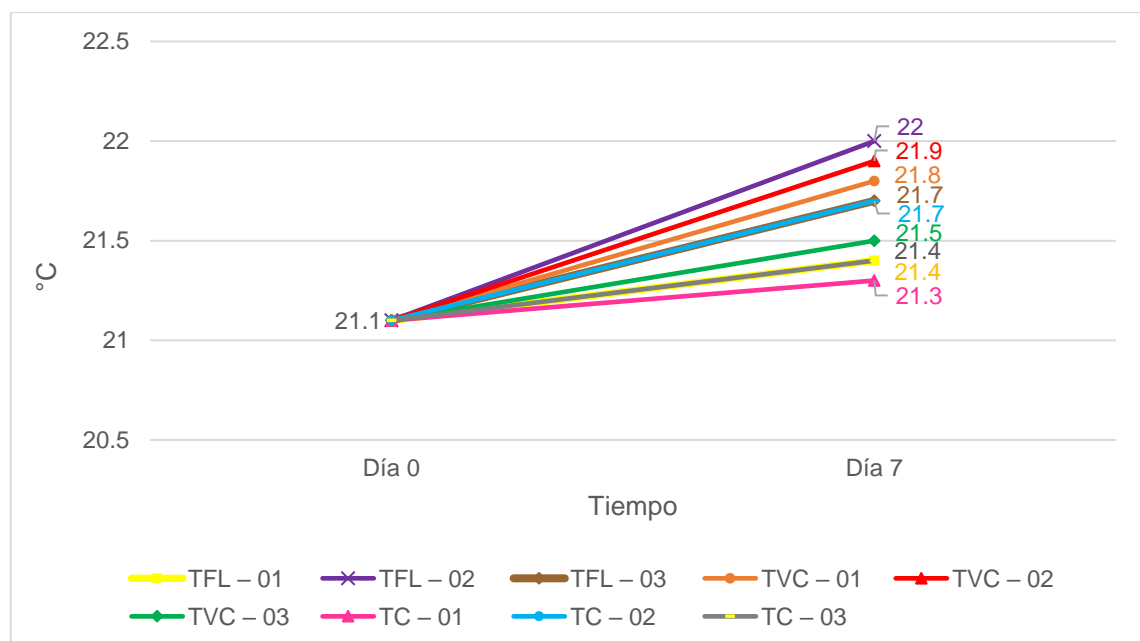
Tratamientos	Indicadores	pH	C.E.	T	Humedad	M.O.
			dS/m	°C	%	%
	TVC – 02	7,99	2,627	21,9	67,1	43,0%
	TVC – 03	8,07	6,378	21,5	67,6	49,0%
	TC – 01	7,4	0,947	21,3	70,2	47,0%
Control	TC – 02	7,48	1,320	21,7	70,4	46,0%
	TC – 03	7,63	1,315	21,4	70,0	53,0%

Figura 1*pH de los tratamientos*

En lo que respecta a la Conductividad Eléctrica (C.E.), observado en la figura 2, los niveles se mantuvieron estables o ligeramente inferiores en comparación con los 2,744 dS/m del lodo inicial. Específicamente, el tratamiento TFL – 01 presentó una conductividad de 2,322 dS/m, el TFL – 02 reportó 2,616 dS/m, y el TFL – 03 mostró el valor más bajo con 2,113 dS/m. Sin embargo, en los tratamientos de vermicompostaje se alcanzaron valores más altos con un 3,919 dS/m en TVC – 01, 2,627 dS/m en TVC – 02 y el valor más alto en TVC – 03 con 6,378 dS/m. Mientras que, en los tratamientos de control, se presentó una disminución notable, registrando 0,947 dS/m en el TC – 01, 1,320 dS/m en el TC – 02 y 1,315 en el TC – 03.

Figura 2*Conductividad de los tratamientos*

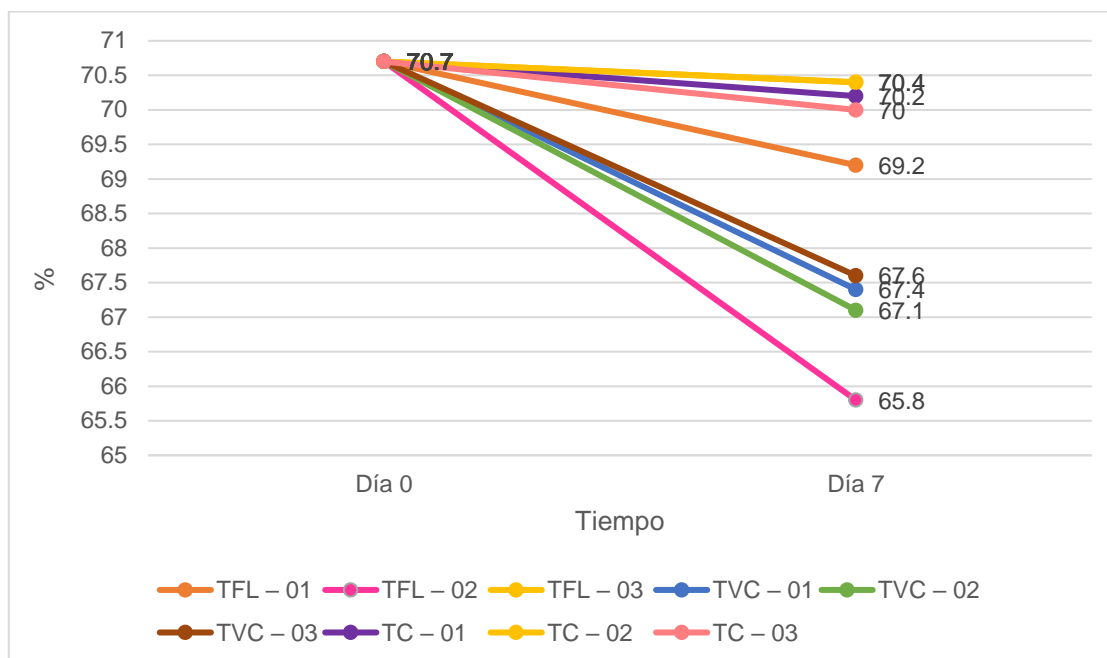
En cuanto a la Temperatura (figura 3), el comportamiento fue estable y mesofílico en todos los tratamientos. Los tratamientos control TC - 01, TC - 02 y TC - 03 registraron entre 21,3°C y 21,7 °C, valores muy similares al alcanzado por el tratamiento TFL - 03 (21,7 °C) y muy similar a los TFL - 01 (21,4 °C) y TFL - 02 (22,0 °C). Al igual que en los tratamientos de vermicompostaje variando ligeramente entre 21,5 °C y 21,9 °C.

Figura 3*Temperatura de los tratamientos*

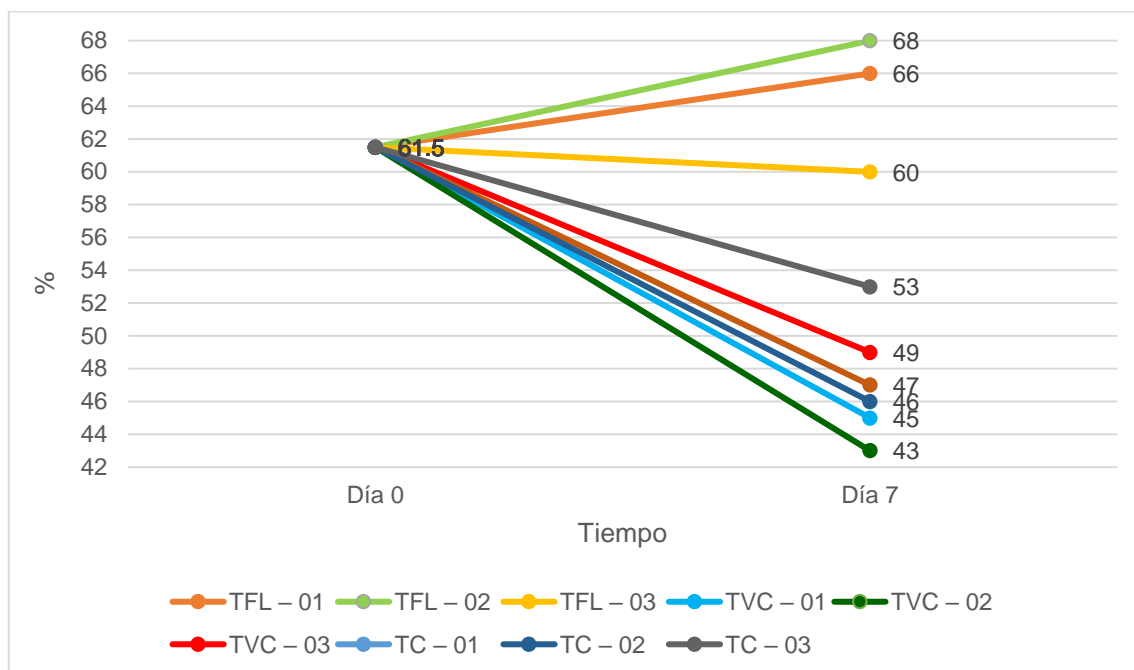
Respecto al porcentaje de Humedad (figura 4), los resultados mostraron una alta estabilidad del contenido de agua en la mayoría de tratamientos, en comparación con el valor inicial de 70,7%. Los tratamientos de Fermentación Láctica (TFL) mantuvieron valores cercanos a la línea base, registrando un 70,4% en TFL – 03, con reducciones ligeras a 69,2% en TFL – 01 y 65,8% en TFL – 02. De manera similar, los tratamientos de control (TC) fluctuaron mínimamente entre 70,0% (TC – 03) y 70,4% (TC – 02). Por su parte, el Vermicompostaje (TVC) registró una disminución ligera pero consistente de la humedad, con valores que oscilaron entre 67,1% (TVC – 02) y 67,6% (TVC – 03).

Figura 4

Humedad de los tratamientos



Finalmente, con respecto al contenido de Materia Orgánica (figura 5), los tratamientos de fermentación láctica evidenciaron un efecto de bioconservación en lugar de una degradación masiva respecto al 61,5% del lodo inicial. En ese sentido, el TFL – 01 presentó un valor de 66,0%, el TFL – 02 alcanzó un 68,0% y el TFL – 03 registró un 60,0%. Por otro lado, en los tratamientos de vermicompostaje y los tratamientos de control se observaron reducciones moderadas del contenido de materia orgánica, alcanzando valores de 45,0% en el TVC – 01, 43,0% en el TVC – 02 y 49,0% en el TVC – 03, mientras que en el TC – 01 se registró un 47,0%, en el TC – 02 un 46,0% y en el TC – 03 un 53,0%.

Figura 5*Materia Orgánica de los tratamientos*

4.2.2 Efecto en la reducción de contaminantes de los lodos residuales

En cuanto a *Escherichia coli*, el lodo inicial presentó una concentración de $3,8 \times 10^3$ UFC/g, valor que sirvió como referencia para los tratamientos. En la fermentación láctica, los recuentos mostraron cierta variabilidad: TFL-01 registró $2,8 \times 10^3$ UFC/g, TFL-02 alcanzó $4,4 \times 10^3$ UFC/g y TFL-03 presentó $6,0 \times 10^3$ UFC/g, valores que se mantuvieron dentro del mismo orden de magnitud que el lodo inicial. En el vermicompostaje, las concentraciones oscilaron entre $3,5 \times 10^3$ UFC/g (TVC-01), $5,2 \times 10^3$ UFC/g (TVC-02) y $1,9 \times 10^3$ UFC/g (TVC-03), mostrando también un comportamiento heterogéneo. En el tratamiento control los valores permanecieron cercanos a los iniciales, registrándose $3,2 \times 10^3$, $4,5 \times 10^3$ y $3,8 \times 10^3$ UFC/g en TC-01, TC-02 y TC-03, respectivamente, (Véase tabla 8 y figura 6).

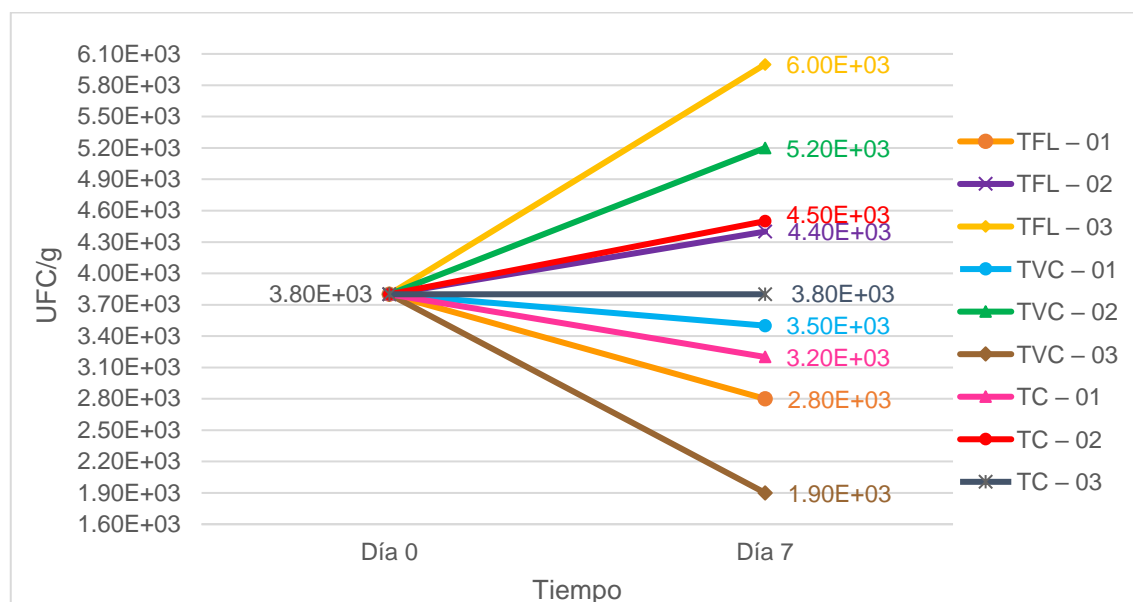
Respecto a *Salmonella sp.*, en el lodo inicial se detectó presencia por 25 g. En la fermentación láctica se observó un comportamiento diferenciado entre las réplicas, ya que en TFL-01 el patógeno estuvo ausente, mientras que en TFL-02 y TFL-03 se registró presencia, manteniéndose el resultado del día 0. En el vermicompostaje, *Salmonella sp.* se encontró presente en las tres réplicas evaluadas (TVC-01, TVC-02 y TVC-03). De manera similar, en los tratamientos control (TC-01, TC-02 y TC-03), la presencia del patógeno se mantuvo constante en todas las muestras.

Tabla 9

Caracterización microbiológica final de los tratamientos

Tratamientos	Indicadores	<i>Escherichia coli</i>	<i>Salmonella sp.</i>	Huevos viables de Helmintos
		UFC/g		N°/g
Lodo Inicial	LO - 0	$3,8 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	2,0 huevos/g
	TFL - 01	$2,8 \times 10^3$ UFC/g	Ausente/25 g	0,5 huevos/g
Fermentación Láctica	TFL - 02	$4,4 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	1,5 huevos/g
	TFL - 03	$6,0 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	3,0 huevos/g
	TVC - 01	$3,5 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	2,0 huevos/g
Vermicompostaje	TVC - 02	$5,2 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	3,5 huevos/g
	TVC - 03	$1,9 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	0,3 huevos/g
	TC - 01	$3,2 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	1,0 huevos/g
Control	TC - 02	$4,5 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	2,0 huevos/g
	TC - 03	$3,8 \times 10^3$ UFC/g	Presente/25 g	1,5 huevos/g

Figura 6

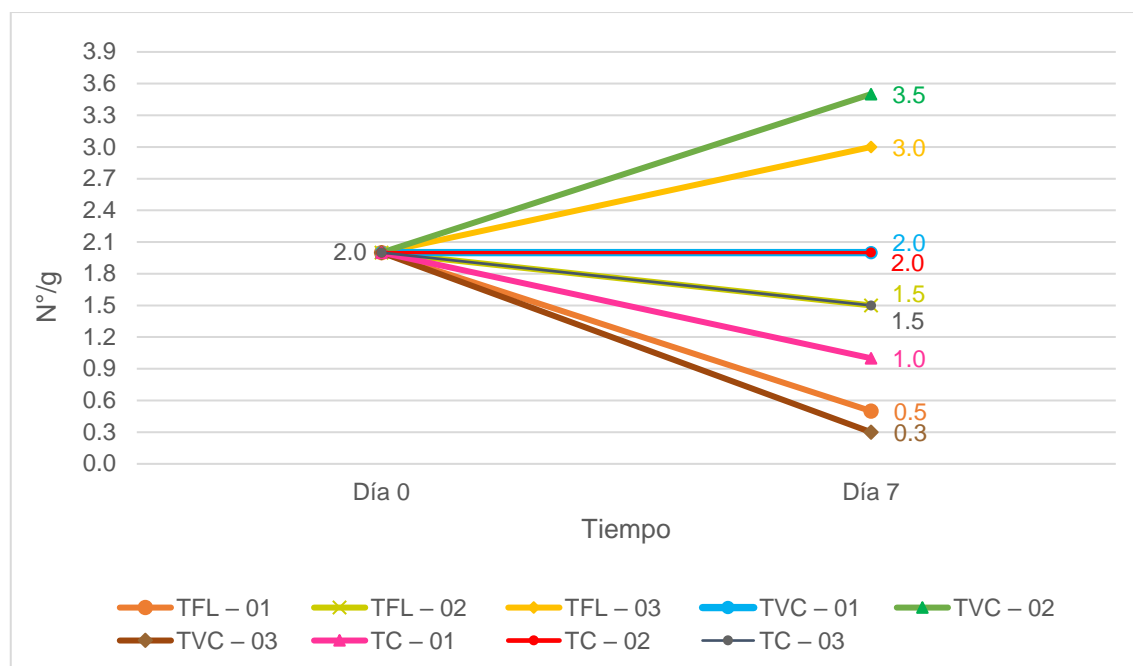
Escherichia coli en los tratamientos

En cuanto a los *huevos viables de helmintos*, el lodo inicial presentó 2,0 huevos/g. En los tratamientos de fermentación láctica los valores variaron entre 0,5

huevos/g (TFL-01), 1,5 huevos/g (TFL-02) y 3,0 huevos/g (TFL-03), mostrando diferencias entre réplicas. En el vermicompostaje se registraron 2,0 huevos/g (TVC-01), 3,5 huevos/g (TVC-02) y 0,3 huevos/g (TVC-03), valores que no siguieron un patrón uniforme. Por su parte, en los tratamientos control se obtuvieron 1,0, 2,0 y 1,5 huevos/g, evidenciando estabilidad respecto al material inicial (figura 7).

Figura 7

Huevos viables de Helminths en los tratamientos



4.3 Evaluar la eficiencia de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje aplicados a los lodos residuales de la PTAR Magollo

Previo a la aplicación del Análisis de Varianza, se evaluó el cumplimiento de los supuestos estadísticos. La Prueba de Levene (tabla 9) para la homogeneidad de varianzas resultó en un *Valor-P* de 0,9589 (mayor que 0,05), lo que indica que no existen diferencias significativas entre las desviaciones estándar de los tratamientos con un nivel del 95,0% de confianza. Por lo tanto, se cumple el supuesto de homogeneidad, validando el uso del ANOVA paramétrico para el análisis de los resultados de Materia Orgánica (tabla 10 y figura 8).

Tabla 10

Verificación de Varianza (Prueba de Levene) para el porcentaje de Materia Orgánica entre los tratamientos

Verificación de Varianza

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,0422535	0,958909

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
TC / TFL	3,78594	4,16333	0,826923	0,9053
TC / TVC	3,78594	3,05505	1,53571	0,7887
TFL / TVC	4,16333	3,05505	1,85714	0,7000

Tabla 11

Análisis de Varianza (ANOVA) de un Factor para el porcentaje de Materia Orgánica de los tratamientos

Tabla ANOVA para MO_Porcent por Tratamientos

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	626,0	2	313,0	22,90	0,0016
Intra grupos	82,0	6	13,6667		
Total (Corr.)	708,0	8			

Figura 8

Gráfico de ANOVA para el porcentaje de Materia Orgánica según el tratamiento aplicado



Para evaluar si existían diferencias en la eficiencia de estabilización entre los tratamientos, se aplicó un ANOVA de un factor al porcentaje de Materia Orgánica residual. Los resultados mostraron una diferencia altamente significativa entre los grupos experimentales, con un valor de $F = 22,90$ y un *Valor-P* de $0,0016$ (Tabla 10).

Este *P-Valor*, al ser inferior a 0,05, permite rechazar la igualdad de medias, confirmando que el tipo de tratamiento aplicado influye significativamente en el porcentaje final de Materia Orgánica.

Tabla 12

Prueba Post Hoc (LSD de Fisher) para la Comparación de Medias del porcentaje de Materia Orgánica de los tratamientos

Pruebas de Múltiple Rangos para MO_Porcent por Tratamientos

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tratamientos	Casos	Media	Grupos Homogéneos
TVC	3	45,6667	X
TC	3	48,6667	X
TFL	3	64,6667	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
TC - TFL	*	-16,0	7,38593
TC - TVC		3,0	7,38593
TFL - TVC	*	19,0	7,38593

* indica una diferencia significativa.

Luego de determinar la existencia de diferencias, se realizó la prueba post hoc de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher para identificar los grupos estadísticamente distinguibles (Tabla 11). Esta prueba reveló lo siguiente:

- El tratamiento de Vermicompostaje (TVC, 45,67%) y el Control (TC, 48,67%) no presentaron diferencias significativas entre sus medias de Materia Orgánica final, agrupándose en el nivel de mayor estabilización.
- El tratamiento de Fermentación Láctica (TFL, 64,67%) resultó ser significativamente diferente a TVC y TC, con una diferencia de 19,0% respecto al TVC.

Los estadísticos descriptivos del porcentaje final de Materia Orgánica se detallan en la Tabla 12. El tratamiento de Vermicompostaje (TVC) resultó en la menor media de M.O. residual, con 45,67%. Esto lo posiciona como el método de mayor eficiencia en la estabilización por mineralización de la materia orgánica, aunque su valor fue estadísticamente comparable al del Control (TC, 48,67%). Por su parte, la Fermentación Láctica (TFL) arrojó la media más alta (64,67%), lo que valida su función como un método de bioconservación que minimiza la pérdida de M.O.

Tabla 13

Estadísticos Descriptivos del porcentaje de Materia Orgánica por tratamiento

Resumen Estadístico para MO_Percent

Tratamientos	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
TC	3	48,6667	3,78594	7,77933%	46,0	53,0
TFL	3	64,6667	4,16333	6,43814%	60,0	68,0
TVC	3	45,6667	3,05505	6,68989%	43,0	49,0
Total	9	53,0	9,40744	17,7499%	43,0	68,0

Tratamientos	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
TC	7,0	1,12932	
TFL	8,0	-0,914531	
TVC	6,0	0,6613	
Total	25,0	0,89367	-0,712772

En términos de precisión experimental, los tratamientos mostraron una alta consistencia, reflejada en los bajos Coeficientes de Variación (CV), que oscilaron entre 6,44% (TFL) y 7,78% (TC). Las desviaciones estándar (Tabla 12) confirman que la variabilidad fue mínima en todas las réplicas, lo que incrementa la fiabilidad de las medias reportadas.

El comportamiento de los tratamientos se ilustra en la Figura 9, el cual representa la distribución de los porcentajes de Materia Orgánica. La separación notoria entre la caja del TFL y las de TVC/TC refuerza los hallazgos estadísticos, mostrando que TFL retuvo la mayor cantidad de Materia Orgánica, mientras que TVC alcanzó los valores más bajos y consistentes.

Figura 9

Gráfico de Caja y Bigotes para el porcentaje de Materia Orgánica según el tratamiento aplicado

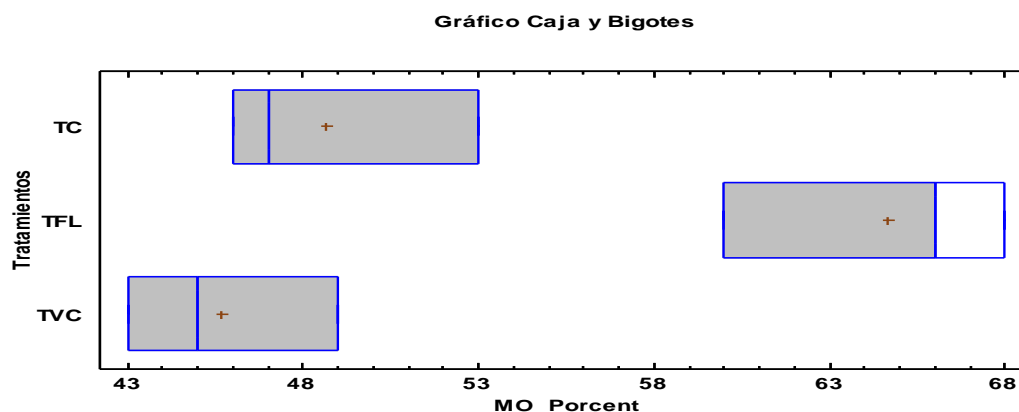


Tabla 14

Verificación de Varianza (Prueba de Levene's) para *Escherichia coli* entre los tratamientos

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,6752	0,5439

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
TC / TFL	650,641	1600,0	0,165365	0,2838
TC / TVC	650,641	1650,25	0,155447	0,2691
TFL / TVC	1600,0	1650,25	0,940024	0,9691

Previo a la aplicación del Análisis de Varianza (ANOVA), se evaluó el cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene para los niveles de *Escherichia coli* entre los tratamientos evaluados. Los resultados mostraron un valor-P de 0,5439, el cual es mayor al nivel de significancia de 0,05, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de los tratamientos con un nivel de confianza del 95%. En consecuencia, se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, lo que valida el uso del ANOVA paramétrico para el análisis comparativo de *Escherichia coli* entre los tratamientos de fermentación láctica, vermicompostaje y control.

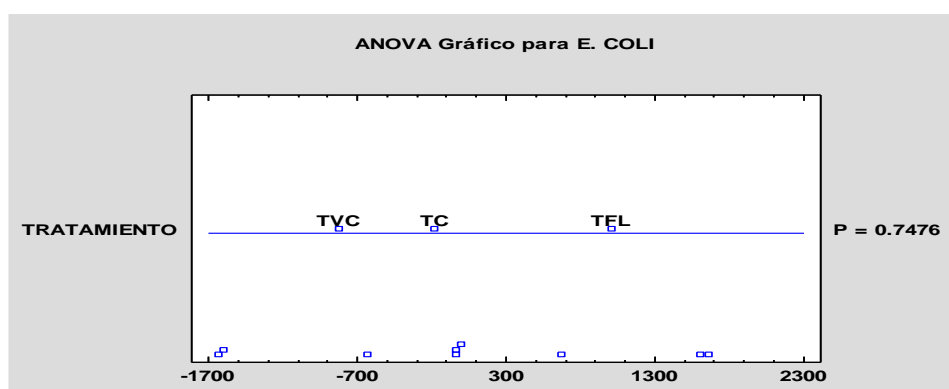
Tabla 15

Análisis de Varianza (ANOVA) de un Factor para reducción de *E. Coli* de los tratamientos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,16222E6	2	581111,	0,31	0,7476
Intra grupos	1,14133E7	6	1,90222E6		
Total (Corr.)	1,25756E7	8			

Figura 10

Gráfico ANOVA para reducción de *E. Coli* de los tratamientos



El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las concentraciones de *Escherichia coli* mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de control (TC), fermentación láctica (TFL) y vermicompostaje (TVC), obteniéndose un valor de $P = 0,7476$, mayor al nivel de significancia de 0,05. Las medias registradas fueron de 3833,33 UFC/g para el tratamiento control, 4400,00 UFC/g para el tratamiento de fermentación láctica y 3533,33 UFC/g para el tratamiento de vermicompostaje. Los intervalos de confianza al 95 % presentaron superposición entre los tratamientos, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Tabla 16

Medias para E. Coli por tratamiento con intervalos de confianza del 95,0%

Tratamiento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior
TC	3	1,5	0,698941	0,29067
TFL	3	1,66667	0,698941	0,457336
TVC	3	1,93333	0,698941	0,724003
Total	9	1,7		

Tratamiento	Límite Superior
TC	2,70933
TFL	2,876
TVC	3,14266
Total	

Figura 11

Gráfico de Medias para E. Coli por tratamiento

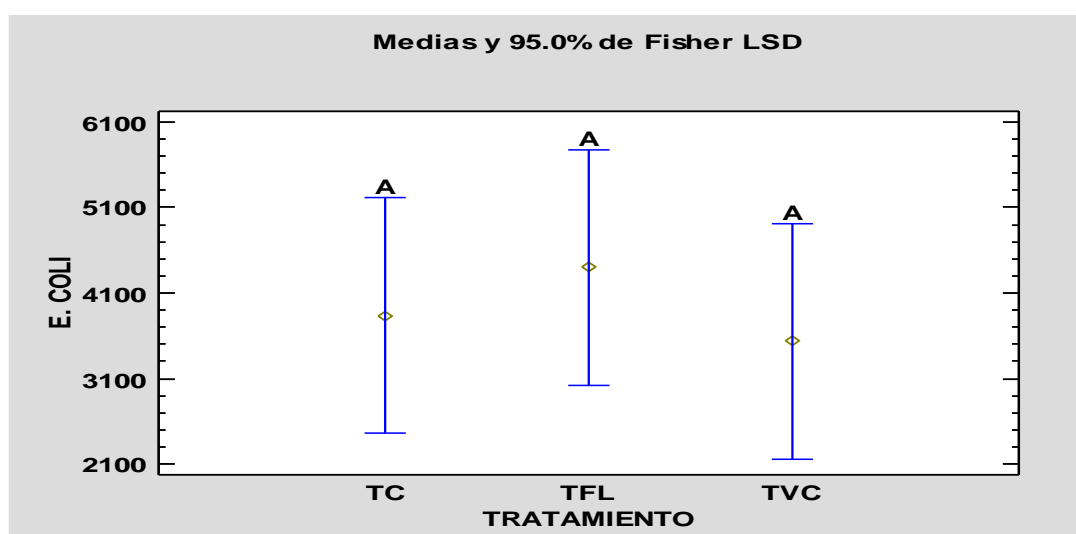
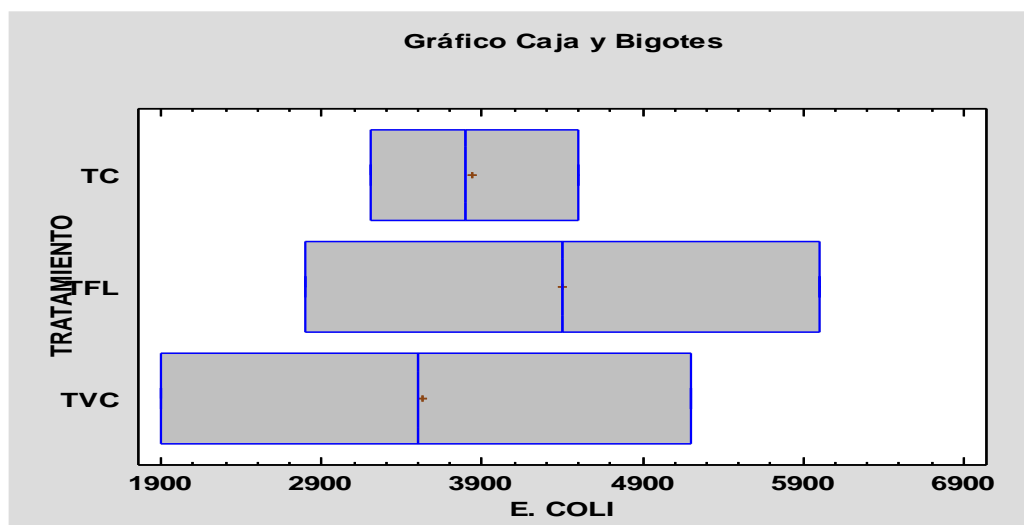


Figura 12

Gráfico de Caja y Bigotes para *E. Coli* por tratamiento aplicado

**Tabla 17**

Verificación de Varianza (Prueba de Levene's) para Huevos Viables de Helmintos entre los tratamientos

	Prueba	Valor-P
Levene's	1,08921	0,3949

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
TC / TFL	0,5	1,25831	0,157895	0,2727
TC / TVC	0,5	1,60104	0,0975293	0,1777
TFL / TVC	1,25831	1,60104	0,617685	0,7637

Antes de realizar el Análisis de Varianza, se verificó la homogeneidad de varianzas de los datos correspondientes a los huevos viables de helmintos mediante la prueba de Levene. El análisis arrojó un *valor-P* de 0,3949, superior al nivel de significancia de 0,05, lo que evidencia que *no existen diferencias significativas entre las desviaciones estándar* de los tratamientos evaluados con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, permitiendo la *aplicación del ANOVA paramétrico* para la comparación de los tratamientos en relación con los huevos viables de helmintos.

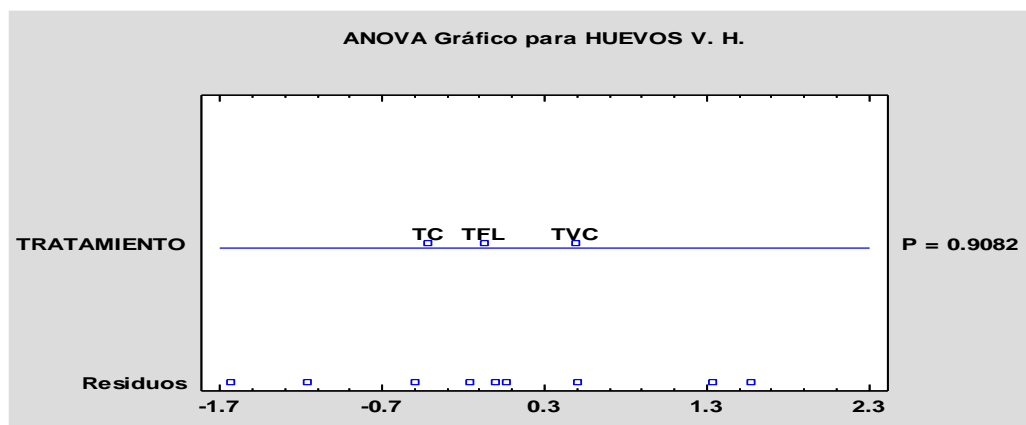
Tabla 18

Análisis de Varianza (ANOVA) para Huevos Viables de Helmintos por tratamientos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,286667	2	0,143333	0,10	0,9082
Intra grupos	8,79333	6	1,46556		
Total (Corr.)	9,08	8			

Figura 13

Gráfico ANOVA para Huevos Viables de Helmintos por tratamientos



El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la concentración de *huevo viables de helmintos* indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados (TC, TFL y TVC), obteniéndose un valor de $P = 0,9082$, superior al nivel de significancia de 0,05. Las medias registradas fueron de 1,50 huevos/g para el tratamiento control, 1,67 huevos/g para el tratamiento de fermentación láctica y 1,93 huevos/g para el tratamiento de vermicompostaje. Los intervalos de confianza al 95 % mostraron superposición entre los tratamientos, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas bajo las condiciones experimentales del estudio.

Tabla 19

Medias para Huevos Viables de Helmintos por tratamiento con intervalos de confianza del 95.0%

Tratamiento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior
TC	3	1,5	0,698941	0,29067
TFL	3	1,66667	0,698941	0,457336
TVC	3	1,93333	0,698941	0,724003
Total	9	1,7		
<i>Tratamiento</i>			<i>Límite Superior</i>	
TC			2,70933	
TFL			2,876	
TVC			3,14266	
Total				

Figura 14

Gráfico de Medias para Huevos Viables de Helmintos por tratamiento

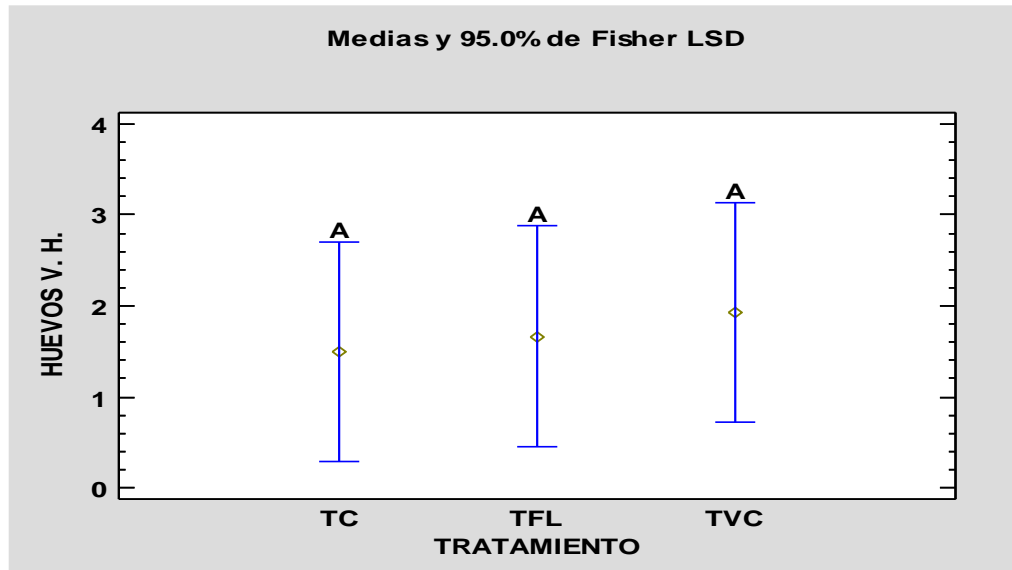
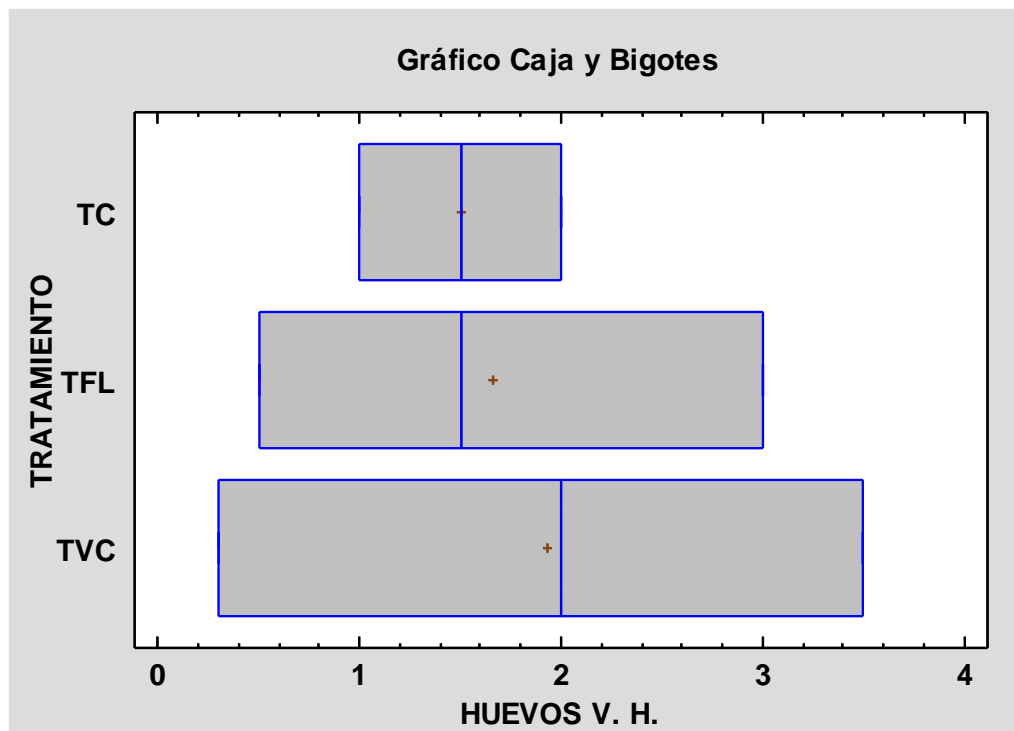


Figura 15

Gráfico de Caja y Bigotes para Huevos Viables de Helmintos por tratamiento aplicado



En la Tabla 19 se presentan los resultados de la presencia de *Salmonella* sp. en los lodos residuales evaluados. El lodo inicial (LO) presentó presencia de *Salmonella* sp. en 25 g de muestra. En los tratamientos de fermentación láctica (TFL), se observó

ausencia de *Salmonella* sp. únicamente en uno de los tratamientos (TFL 01), mientras que los demás registros evidenciaron presencia del patógeno. En el tratamiento de vermicompostaje (TVC) y en los tratamientos control (TC), se registró presencia de *Salmonella* sp. en la mayoría de las muestras analizadas.

La distribución de frecuencias se muestra en la Figura 16, donde se evidencia que la condición “Presente” predominó en los tratamientos evaluados.

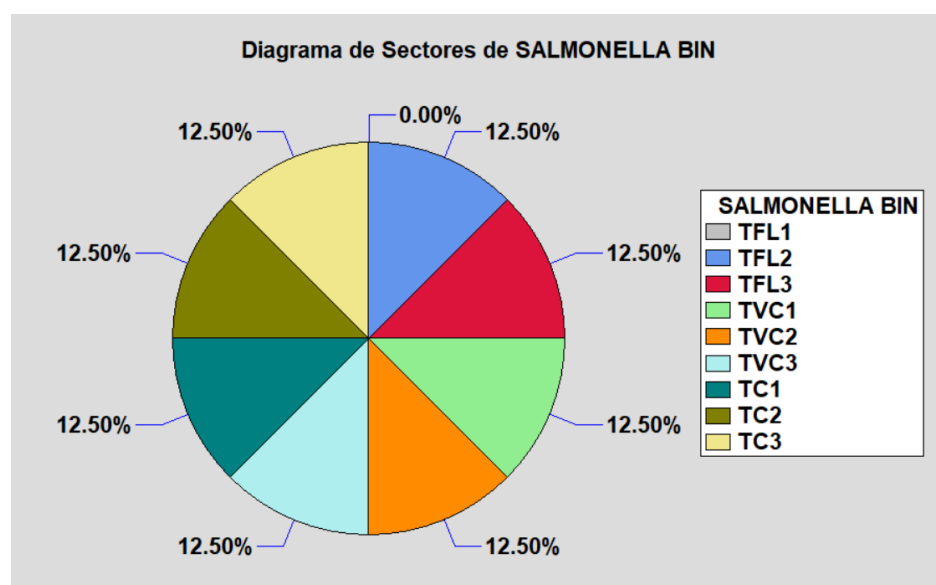
Tabla 20

Frecuencia de presencia de Salmonella sp. en los tratamientos

Clase	Valor	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. acum.
1	TFL	0	0,0000	0	0,0000
2	TFL	1	0,1250	1	0,1250
3	TFL	1	0,1250	2	0,2500
4	TVC	1	0,1250	3	0,3750
5	TVC	1	0,1250	4	0,5000
6	TVC	1	0,1250	5	0,6250
7	TC	1	0,1250	6	0,7500
8	TC	1	0,1250	7	0,8750
9	TC	1	0,1250	8	1,0000

Figura 16

Diagrama de Sectores de presencia de Salmonella sp. en los tratamientos



CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1 Aplicación de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales y evaluación de su efecto en los lodos residuales

5.1.1 Análisis del efecto en la estabilización fisicoquímica de los lodos

El parámetro que mostró la respuesta más diferenciada entre los tratamientos de estabilización fue el Potencial de Hidrógeno (pH). En el lodo inicial (7,66) y los controles mantuvieron una condición alcalina, mientras que la Fermentación Láctica (TFL) logró una acidificación marcada, con valores finales entre 5,80 (TFL – 03) y un mínimo de 5,40 (TFL – 02). Esta caída drástica confirma la producción efectiva de ácidos orgánicos por la bacteria *Lactobacillus paracasei*, generando la estabilización ácida necesaria para inhibir la proliferación de patógenos y reducir la carga contaminante (Camargo, 2019; Madigan et al., 2015; Pérez, 2023). En contraste, el Vermicompostaje (TVC) generó una tendencia opuesta, incrementando el pH hacia la alcalinidad con valores de 8,52 en TVC – 01, 7,99 en TVC-02 y 8,07 en TVC-03, lo cual se atribuye a la mineralización inicial de la M.O. (Tito, 2022). A pesar de la alcalinización del TVC, el rango se mantuvo dentro de las condiciones óptimas (6–8) para el desarrollo de *Eisenia foetida* (Silvestre, 2025).

En relación con la Conductividad Eléctrica (C.E.), el comportamiento del lodo reflejó directamente el grado de mineralización alcanzado. Los tratamientos de Fermentación Láctica (TFL) mantuvieron la C.E. estable, con valores entre 2,113 dS/m (TFL-03) y 2,616 dS/m (TFL-02), lo que es indicativo de una bioconservación que no implicó una mineralización agresiva. Los controles mostraron la mayor disminución (hasta 0,947 dS/m en TC-01), sugiriendo lixiviación de sales. Sin embargo, el Vermicompostaje (TVC) presentó el incremento más significativo respecto al lodo inicial (2,744 dS/m), alcanzando hasta 6,378 dS/m (TVC-03), con TVC-01 en 3,919 dS/m. Este aumento confirma que la mineralización de la materia orgánica y la liberación de sales solubles aumentan drásticamente la conductividad del sustrato (Quincho Perez, 2022); este resultado nos indica la intensa actividad degradativa alcanzada, aunque cercana al límite de tolerancia de las lombrices *Eisenia foetida* (> 8 dS/m) (Tito, 2022).

La evaluación de la Materia Orgánica (M.O.) permitió contrastar la eficiencia de la estabilización por bioconservación frente a la degradación. En la Fermentación Láctica (TFL), la M.O. fluctuó limitadamente entre 60,0% (TFL-03) y 68,0% (TFL-02), en comparación con el 63,0% inicial. Este patrón se interpreta como un efecto de bioconservación que prioriza la estabilidad biológica sobre la reducción de masa y la

mineralización del carbono (Madigan et al., 2015). Por el contrario, el Vermicompostaje (TVC) demostró ser el método más eficiente para la degradación estructural, alcanzando la mayor reducción con 43,0% (TVC-02), superando el 46,0% del control (TC-02). Esta reducción es coherente con la acción combinada de microorganismos y las lombrices *Eisenia foetida* (Silvestre, 2025). La variabilidad observada en TVC-03 (49.0%) se puede asociar a factores como la adaptación diferencial de las lombrices utilizadas, que influye en su eficiencia degradativa (Tito, 2022). Este contraste entre la mineralización del vermicompostaje y la bioconservación de la fermentación láctica permite aceptar parcialmente la hipótesis planteada, validando que ambos tratamientos poseen mecanismos diferenciados para modificar las características fisicoquímicas y favorecer la estabilidad del material.

Finalmente, los indicadores Temperatura (T) y Humedad (%) se mantuvieron consistentes con las condiciones operacionales esperadas. La Temperatura se mantuvo mesofílica y uniforme en todos los tratamientos (entre 21,3 °C y un máximo de 22,0 °C en TFL – 02), lo que demuestra la ausencia de calor exotérmico significativo, Respecto a la Humedad, la Fermentación Láctica (TFL) y los controles mantuvieron una alta estabilidad (TFL – 03 en 70,4%), lo cual es crucial para la difusión de metabolitos en el proceso anaerobio (Madigan et al., 2015). Por su parte, el Vermicompostaje (TVC) registró una ligera pero consistente disminución, con valores entre 67,1% (TVC – 02) y 67,6% (TVC – 03). Esta reducción de humedad es esencial para la aireación del sistema y para evitar niveles superiores al 80% que podrían generar condiciones anaerobias perjudiciales para la actividad biológica de las lombrices (Caballero y otros, 2018).

5.1.2 Análisis del efecto en la reducción de contaminantes de los lodos

Respecto a *Escherichia coli*, a pesar de que la Fermentación Láctica (TFL) logró acidificar el medio a niveles de pH 5,40–5,80, los recuentos finales ($2,8 - 6,0 \times 10^3$ UFC/g) no mostraron una reducción significativa respecto al lodo inicial ($3,8 \times 10^3$ UFC/g), Esto contradice parcialmente lo esperado teóricamente, ya que se asume que la acidez inhibe coliformes. Sin embargo, estudios indican que para una eliminación total de *E. coli* en tiempos cortos se requieren valores de pH inferiores a 4,0 o 4,2 (Madigan et al., 2015), o tiempos de exposición más prolongados que permitan el efecto bactericida de los ácidos orgánicos no disociados. En el caso del Vermicompostaje (TVC), la persistencia de *E. coli* ($1,9 - 5,2 \times 10^3$ UFC/g) se explica por las condiciones mesofílicas y el pH alcalino, los cuales son favorables para la supervivencia bacteriana si no existe una fase termófila previa o un tiempo de maduración extenso que fomente la competencia microbiana.

En cuanto a *Salmonella sp.*, se observó un resultado heterogéneo. El tratamiento TFL – 01 fue el único eficaz en eliminar el patógeno (Ausencia/25g), lo cual sugiere que en esa réplica específica se alcanzaron las condiciones de inhibición. No obstante, la presencia del patógeno en TFL – 02 y TFL – 03, aun con pH ácido, podría atribuirse a la presencia de micro–nichos dentro del lodo donde el ácido láctico no penetró completamente o a la resistencia de cepas específicas (Mancilla Silva, 2020). En el vermicompostaje, la presencia constante de *Salmonella sp.* confirma que la estabilización por lombrices, por sí sola y en corto tiempo, no garantiza la higienización del biosólido.

Finalmente, los *Huevos Viables de Helminthos* mostraron una variabilidad que no permite establecer una tendencia clara de eliminación. Aunque TVC – 03 logró la mayor reducción a 0,3 huevos/g y TFL – 01 bajó a 0,5 huevos/g, otros tratamientos mostraron valores similares o superiores a la inicial. Esto indica que la estructura física de los huevos les confiere resistencia tanto a la acidez moderada como a la digestión enzimática de las lombrices en el periodo evaluado. Este resultado es consistente con los hallazgos de Jiménez et al. (2002), quienes documentan que la alta resistencia de los *huevos de Ascaris* a la degradación en biosólidos requiere tratamientos termófilos o tiempos de residencia superiores a los aplicados (Alfaro Arrieta et al., 2024). Por consiguiente, en lo que respecta a la carga contaminante, la hipótesis se rechaza parcialmente, ya que la aplicación de los tratamientos no garantizó una reducción significativa ni homogénea de los indicadores microbiológicos, resultando los siete días de evaluación insuficientes para alcanzar la inocuidad del biosólido.

5.2 Evaluación de los Tratamientos en la Estabilización Físicoquímica y Reducción de Contaminantes

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que el tipo de tratamiento influye determinantemente en el porcentaje residual de Materia Orgánica (M.O.) ($P = 0,0016$), siendo el tratamiento de vermicompostaje (TVC) el método que logró la mayor mineralización en comparación con el tratamiento de fermentación láctica (TFL). No obstante, el análisis post hoc de las medias de M.O. reveló que la eficiencia del TVC no fue significativamente superior a la obtenida por el tratamiento control (TC) (degradación natural).

La reducción de la materia orgánica es un indicador crítico de la estabilidad biológica de los biosólidos. De acuerdo con el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las PTAR, aprobado mediante Decreto Supremo N° 015-

2017-VIVIENDA, los lodos tratados deben alcanzar una condición de estabilidad biológica que permita prevenir la atracción de vectores y la generación de olores ofensivos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017). En este contexto, el tratamiento TVC, con un valor promedio final de 45,67% de M.O., demostró un mayor grado de estabilización en comparación con el TFL, que retuvo un 64,67% de materia orgánica.

Esta diferencia de 19,0% entre ambos tratamientos se fundamenta en los distintos mecanismos bioquímicos. El vermicompostaje demostró ser un proceso oxidativo superior. Algunas investigaciones confirman que la interacción sinérgica entre las enzimas intestinales de las lombrices y la microbiota aerobia acelera la mineralización de polisacáridos y proteínas, transformando la materia orgánica lábil en sustancias húmicas estables mucho más rápido que otros procesos biológicos (Bhat et al., 2018).

Los resultados obtenidos para *Escherichia coli* indican que, tras una semana de aplicación de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje, no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($P > 0,05$). Este comportamiento puede atribuirse al corto tiempo de tratamiento, ya que la reducción efectiva de microorganismos indicadores como *E. coli* requiere períodos más prolongados de estabilización biológica. Tito Sánchez (2022), en su estudio sobre el tratamiento de lodos residuales mediante vermicompostaje con *Eisenia foetida*, reporta que la disminución significativa de coliformes fecales se logra después de varias semanas de proceso, debido a la competencia microbiana y a las transformaciones bioquímicas del sustrato. De manera similar, Quincho Perez (2022) señala que tratamientos biológicos de corta duración no generan reducciones marcadas de *E. coli*, recomendando tiempos superiores a 30 días para observar efectos sanitarios más notorios.

En cuanto a *Salmonella sp.*, la persistencia del patógeno en la mayoría de los tratamientos evaluados evidencia que una semana de tratamiento no es suficiente para garantizar su completa inactivación. La ausencia observada en un tratamiento de fermentación láctica podría estar relacionada con la producción localizada de ácidos orgánicos y la disminución del pH, factores que influyen negativamente en la supervivencia de este microorganismo. No obstante, diversos antecedentes indican que la eliminación de *Salmonella sp.* en lodos tratados mediante procesos biológicos suele requerir tiempos prolongados y condiciones de mayor estabilidad del sistema (Tito, 2022; Quincho Perez, 2022).

Respecto a los huevos viables de helmintos, los resultados muestran una reducción parcial en algunos tratamientos, especialmente en el vermicompostaje, donde se registraron valores mínimos de 0,3 huevos/g. Sin embargo, las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas ($P > 0,05$), lo cual concuerda con lo reportado por Quincho Perez (2022), quien señala que la inactivación de huevos de helmintos es un proceso lento y dependiente del tiempo de exposición, la actividad microbiana y las condiciones ambientales del sustrato. Asimismo, Tito Sánchez (2022) indica que la reducción efectiva de huevos viables de helmintos se observa generalmente después de varias semanas de vermicompostaje continuo.

Desde el punto de vista normativo, el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA establece que, para el reaprovechamiento de lodos como biosólidos, estos deben cumplir con parámetros estrictos de higienización, incluyendo límites para *Escherichia coli*, *Salmonella sp.* y *huevos viables de helmintos*. En este contexto, los resultados obtenidos evidencian que el tiempo de tratamiento evaluado no resulta suficiente para asegurar el cumplimiento de los estándares sanitarios exigidos por la normativa vigente, reforzando la necesidad de procesos de estabilización e higienización de mayor duración como lo señala Quincho Perez (2022).

En conjunto, los resultados permiten aceptar parcialmente la hipótesis planteada, ya que se demostró una influencia significativa del tipo de tratamiento sobre la estabilización de la materia orgánica, pero no sobre la reducción de la carga microbiológica. Esto confirma que el tiempo de tratamiento constituye un factor limitante y determinante en la eficiencia de los procesos de fermentación láctica y vermicompostaje para alcanzar la inocuidad total en lodos residuales.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye que la hipótesis general se acepta parcialmente, debido a que la aplicación de la fermentación láctica y el vermicompostaje permitió modificar las características fisicoquímicas de los lodos residuales de la PTAR Magollo y favorecer su proceso de estabilización, especialmente en relación con el contenido de materia orgánica. Sin embargo, la reducción de la carga contaminante microbiológica no fue consistente ni suficiente en todos los indicadores evaluados, por lo que no se logró el cumplimiento integral de los criterios requeridos para su aprovechamiento como biosólido.

La caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo inicial (LO-0) estableció las condiciones de partida del material. Se determinó que el lodo residual de la PTAR Magollo presentaba una condición ligeramente alcalina ($\text{pH} = 7,66$) y una alta carga de Materia Orgánica (M.O. = 61,5%). En cuanto a la carga microbiológica, se confirmó la presencia de patógenos e indicadores críticos como *Salmonella sp.* (Presente/25 g), *Escherichia coli* ($3,8 \times 10^3$ UFC/g), y Huevos viables de Helmintos (2,0 huevos/g), lo que confirma que el lodo de la PTAR no es apto para el reaprovechamiento directo y requiere la aplicación de tratamientos orientados a la estabilización del lodo residual y a la reducción de su carga contaminante.

La aplicación de los tratamientos evidenció dos mecanismos contrastantes que permiten aceptar parcialmente la hipótesis. Por un lado, el Tratamiento de Vermicompostaje (TVC) resultó ser el método más efectivo para la estabilización de la materia orgánica, logrando reducirla hasta un mínimo de 43,0% (TVC-02). Por otro lado, el Tratamiento de Fermentación Láctica (TFL) demostró un potencial significativo en la reducción de carga contaminante al ser el único tratamiento que logró la ausencia de *Salmonella sp.* en una de sus réplicas (TFL-01), lo cual se atribuye a la acidificación del entorno. No obstante, la persistencia de *Escherichia coli* y Huevos viables de Helmintos en la mayoría de las réplicas indica que el periodo de siete días fue insuficiente para generar una inactivación microbiológica efectiva.

Se concluye que la hipótesis planteada se acepta parcialmente, si bien el análisis estadístico confirmó diferencias significativas en la estabilización de parámetros fisicoquímicos, donde el vermicompostaje resultó más eficiente en la reducción de materia orgánica, no se hallaron diferencias significativas en la reducción de los

parámetros microbiológicos evaluados. Esto demuestra que ninguno de los tratamientos logró alcanzar los límites de inocuidad exigidos por el D.S. N° 015-2017-VIVIENDA en siete días, lo que se evidencia la necesidad de tiempos de tratamiento más prolongados para alcanzar una estabilización microbiológica adecuada.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que futuras investigaciones sobre la Fermentación Láctica (FL) establezcan un control más riguroso sobre la concentración y viabilidad del inóculo de *Lactobacillus paracasei*.

Se sugiere ampliar el periodo de aplicación de los tratamientos de Vermicompostaje y Fermentación Láctica a un mínimo de 60 a 90 días, para poder observar el grado máximo de reducción de patógenos y la estabilidad final de la Materia Orgánica.

Se recomienda evaluar el uso de un tratamiento combinado aplicando la TFL en una primera fase para aprovechar su capacidad de inactivación microbiana y su efecto acidificante. Posteriormente, el material estabilizado debe ser sometido al TVC para la reducción efectiva de Materia Orgánica.

Se sugiere que la evaluación de la eficiencia de los tratamientos se complemente con la medición de indicadores de estabilidad adicionales, como la Relación C/N y la Tasa de Respiración Específica (TME). Estos indicadores permitirán determinar con mayor precisión el grado de madurez del biosólido final y confirmar la idoneidad del producto para su uso agrícola.

Se sugiere incluir la medición de parámetros de toxicidad química (Metales Pesados y Compuestos Orgánicos) en las caracterizaciones finales. Esto asegurará la inocuidad ambiental y sanitaria del biosólido y permitirá su clasificación como Clase A o Clase B.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguero, A. (2019). *Tratamiento de lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con la aplicación de la lombricultura en la Compañía Minera Chungar – 2019*. [Tesis]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2045>
- Alania, J., & Inga, E. (2022). *Efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda sobre suelos agrícolas erosionados y su rendimiento en el cultivo de Raphanus Sativus (rabanito), en Carapongo-Luriganchu*. [Tesis]. Repositorio Institucional Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/5588>
- Alfaro Arrieta, E., Alfaro Lara, J., Méndez Araya, J., Solís Calderón, C., & Vega Guzmán, I. (2024). Huevecillos de Helminths: una validación para su determinación y cuantificación en aguas, aguas residuales y lodos de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 37(Especial), 121-128. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i8.7101>
- Amador Díaz, A., Veliz Lorenzo, E., & Bataller Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1-10. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434003>
- Amorocho Cruz, C. M. (2011). *Caracterización y potencial probiótico de bacterias lácticas aisladas de leche de oveja guirra*. [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València, Valencia. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/13830>
- Andreev, N., Ronteltap, M., Boincean, B., & Lens, P. (2018). Lactic acid fermentation of human excreta for agricultural application. *Journal of Environmental Management*, 206, 890–900.
- Avilés, E. (2011). *Determinación de la efectividad del proceso de lombricultura como tratamiento para la estabilización de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de aguas*. [Tesis]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1511>
- Ayala, S., Milla, D., & Montero, D. (2022). *Higienización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Manchay, y su uso como insumo de cultivo en el año 2021*. [Tesis]. Repositorio Institucional Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12235>

- Belmeskine, H., Ait Ouameur, W., Dilmi, N., & Aouabed, A. (2020). The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. *Heliyon*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04679>
- Bermeo, M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales. Técnicas convencionales*. Guayaquil: Grupo Compás.
- Bhat, S., Singh, J., & Vig, A. (2018). Earthworms as organic waste managers and biofertilizer producers. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 1073-1086.
- Bluegold. (2021). *Tratamiento de agua y reutilización en la agricultura de los lodos extraídos*. Bluegold.
- Caballero, J., Jiménez, M. d., García, C. E., Lucero, M., & Tello, A. F. (2018). Revalorización de lodos residuales: 2. Vermicompostaje. En M. d. Jiménez, J. L. Expósito, M. Hernández, & M. Á. Gómez, *CIENCIAS DEL AGUA: perspectiva desde la academia* (págs. 261–278). Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Camargo, C. E. (2019). *Evaluación De La Eficiencia Del Tratamiento Con Bacterias Ácido Lácticas Para La Remoción De Coliformes Termotolerantes De Lodos Residuales Del Cítrar*. [Tesis]. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6595876>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2012). *Guidance document for the beneficial use of municipal biosolids, municipal sludge and treated septage*.
- Cupe, B., & Juscamaita, J. (2018). Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada*, 17(1), 107-118. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1179>
- De La Cruz, K., & Ventocilla, E. (2019). *Aplicación de bacterias lactobacillus para la estabilización anaeróbica de lodos activados en una planta potabilizadora de agua, El Agustino 2019*. [Tesis]. Respositorio Institucional Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/54847>
- Domínguez, J., Aira, M., Crandall, K., & Pérez-Losada, M. (2021). Earthworms drastically change fungal and bacterial communities during vermicomposting of sewage sludge. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95099-z>

- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR –D de los Municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el Departamento del Meta*. [Tesis Magistral]. Repositorio Institucional Javeriano. <http://hdl.handle.net/10554/13496>
- Dunant, H. (6 de abril de 2015). *ism instituto superior del medio ambiente*. ism instituto superior del medio ambiente : <https://www.ismedioambiente.com/el-potencial-fertilizante-y-economico-de-los-lodos-de-depuradora-para-los-cultivos-agricolas/>
- Duwat, P., Sourice, S., & Gruss, A. (2007, Agosto 01). *España Patent No. 2 278 453*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/b0/16/85072c6c086c55/ES2278453T3.pdf>
- Faife Pérez, E., Roget Guevara, D., Fandiño Rodríguez, C. A., Pérez Bermúdez, I., Izquierdo, Y., Tortoló Cabañas, K., & Michelena Álvarez, G. (2020). *Empleo de microorganismos eficientes como alternativa para el tratamiento de residuales. Revisión bibliográfica*. Cuba: ICIDCA.
- Hernández, J. (2004). *Uso de lodos residuales procedentes de la Ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero (Sorghum vulgare pers)*. [Tesis Doctoral]. Colección Digital UANL. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020145852.PDF>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Mexico: McGraw Hill Education.
- Jiménez, B., Maya, C., Sánchez, E., Romero, A., Lira, L., & Barrios, J. (2002). Comparison of the quantity and quality of the microbiological content of sludge in countries with low and high content of pathogens. *Water Science and Technology*, 46(10), 17-24. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0278>
- Kumar, V., Chopra, A., & Kumar, A. (2017). A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 2(4), 340–347.
- Leveau, J., & Bouik, M. (2000). *Microbiología industrial: los microorganismos de*. Editorial acribia SA.
- Lugo, J., Del Aguila, P., Vaca, R., Casas-Hinojosa, I., & Yañez Ocampo, G. (2017). Abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino a través de vermicomposteo: Una propuesta como mejorador de suelos. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 475-484,.

- Madigan, M., Martinko, J., Bender, K., Buckley, D., & Stahl, D. (2015). *Brock Biología de los Microorganismos* (14 ed.). Madrid: Pearson Education.
- Mancilla Silva, M. (2020). *Efecto del compostaje en la supervivencia de indicadores microbianos y huevos de helmintos en lodos residuales. [Tesis de Maestría]*. Universidad de Chile.
- Mancipie Arias, L. M., & Trivino Restrepo, M. (2018). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiésel. *ION*, pp.71-79.
- Marín Ocampo, A., & Osés Pérez, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados. Manual de Procedimientos*. Jalisco: Comisión Estatal del Agua de Jalisco. Dirección de Operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Martinez, M. (27 de Septiembre de 2023). *Orozco Lab*. Orozco Lab: <https://www.orozolab.info/beneficios-de-lodos-residuales>
- Metcalf, E. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales*. España: McGraw Hill Education.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (26 de junio de 2017). D.S. N°015-2017-VIVIENDA. *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Lima, Perú: El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/07/DS-019-2017-VIVIENDA-1.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2009). *Manual de Municipios Ecoeficientes*. Ministerio del Ambiente.
- More, J. (2015). *Determinación del potencial agrícola de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Copare y Magollo, Tacna*. [Tesis Magistral]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Muñante, K., Perca, D., Juli, R., Quispe, J., Alarcón, G., & Tirado, L. (2022). Aprovechamiento de estiércol vacuno y pasto seco en la vermiestabilización de lodos residuales de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) Magollo. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 19(26), 163-178. <http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v20n26/2225-8787-rcti-20-26-161.pdf>
- Onofre, E. (2018). *Propuesta técnica de gestión ambiental sostenible para el aprovechamiento de lodos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas*

- residuales domésticas en campamentos mineros del Perú*. [Tesis Magistral]. Repositorio de Tesis PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13374>
- Palomino Orizano, J., Peña Corahua, J., Zevallos Ypanaqué, G., & Orizano Quedo, L. (2019). *Metodología de la investigación*. Lima: San Marcos.
- Pérez, G. (2023). *Tratamiento de lodos residuales provenientes de la PTAR PROVISUR del departamento de Lima a través de fermentación láctica*. [Tesis]. Repositorio Académico - Universidad Científica del Sur. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/3378>
- Quicazan De Cuenca, M. C. (2008). Evaluación de la fermentación láctica de bebida de soya empleando células inmovilizadas de un cultivo probiótico. *Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos - ICTA*.
- Quincho Perez, P. E. (2022). Influencia de la vermiestabilización de lodos residuales de la PTAR Sausa en la producción de vermicompost, Jauja-2022. *Universidad Continental*.
- Quispe, F. D., & Rebaza, L. U. (2022). Acción de dos macrófitas para el tratamiento del agua residual. *Ciencia & Desarrollo*, pp. 29-39.
- Reyes, D., Mora, M., Lugo, J., & del Águila, P. (2020). Estabilización por vermicomposteo de lodos residuales aplicados en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 371–381.
- Rodriguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *De Residuo a Recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Washington, DC: Banco Mundial.
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ryder, G. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Paris: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, LA.
- Sacco System. (Agosto de 2020). Lyofast BGP 1. *Technical Data Sheet*. Italia: Sacco S.r.l.
- Saldaña Escorcía, R., & Castillo Gámez, J. K. (2022). Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un

- enfoque sistémico: Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 175-194.
- Segura, F. (2018). *Saneamiento y disposición de biosólidos provenientes de lodos sépticos residuales*. Repositorio Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. <https://hdl.handle.net/2238/10299>
- Serpa, M. (2017). *Remoción de metales pesados Cd y Hg en lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar - Puno, utilizando vermicomposteo*. [Tesis]. Universidad Nacional del Altiplano, Puno. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3275871>
- Silvestre, A. K. (2025). *Mejoramiento de la gestión del tratamiento de aguas residuales mediante el compostaje y vermicompostaje de lodos residuales*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/7292>
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento del Perú. (2013). SUNASS. *Estudio Tarifario. Determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento Tacna Sociedad Anónima*.
- Tito, M. (2022). Influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima. *Universidad Continental*, 1-113.
- Withers, P., Flynn, N., Warren, G., Taylor, M., & Chambers, B. (2016). Sustainable management of biosolid phosphorus: a field study. *AGRIS*, 32, 54 - 63.
- Zabotto, A. R., Zuñiga, E. A., Machuca, L. M., Broetto, F., Tavares, A. R., & Kanashiro, S. (2019). Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto - diagnóstico de investigación. *Idesia (Arica)*, 37(2), 103-108. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000200103>

ANEXOS

Anexo 1. *Matriz de consistencia*

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicador	Metodología
<p>Problema general ¿Qué eficiencia presentan la fermentación láctica y el vermicompostaje en la reducción de la carga contaminante microbiológica y estabilización de la materia orgánica de los lodos residuales de la PTAR Magollo?</p>	<p>Objetivo general Reducir la carga contaminante microbiológica y estabilizar la materia orgánica mediante la aplicación de la fermentación láctica y el vermicompostaje en el tratamiento de lodos residuales de la PTAR Magollo.</p>	<p>Hipótesis general La aplicación de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje reduce la carga contaminante microbiológica y estabiliza la materia orgánica de los lodos residuales de la PTAR Magollo.</p>	<p>Variable dependiente - Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos</p>	<p>Fisicoquímico - Materia orgánica - pH - Humedad - Conductividad eléctrica - Temperatura</p> <p>Microbiológico - Escherichia coli - Salmonella - Huevos viables de Helminetos</p>	<p>Tipo de investigación - Investigación aplicada o tecnológica</p> <p>Nivel de investigación - Aplicativo</p>
<p>Problemas específicos ¿Cuáles son las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales? ¿Cuál es el efecto de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje en la reducción de contaminantes y estabilización de los lodos residuales? ¿Cómo se diferencian los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje en la reducción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales?</p>	<p>Objetivos específicos Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos residuales. Aplicar los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje a los lodos residuales, evaluando su efecto en la reducción de contaminantes y estabilización del material. Evaluar la eficiencia de los tratamientos de fermentación láctica y vermicompostaje aplicados a los lodos residuales de la PTAR Magollo.</p>	<p>Hipótesis específicas No aplica. Los tratamientos biológicos aplicados reducen significativamente la carga contaminante y mejoran la estabilidad de los lodos residuales. Existen diferencias significativas entre la fermentación láctica y el vermicompostaje en la reducción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales de la PTAR Magollo.</p>	<p>Variable dependiente - Tratamiento de los lodos</p> <p>Variable interviniente Condiciones ambientales (presión atmosférica, altitud, temperatura)</p>	<p>Fermentación láctica - % reducción de materia orgánica y factores microbiológicos - Cumplimiento de la normativa</p> <p>Vermicompostaje - % reducción de materia orgánica y factores microbiológicos - Cumplimiento de la normativa</p>	<p>Diseño de investigación - Aplicativo: Diseño Completamente al Azar (DCA) - Repeticiones: 3 por tratamiento de Control, Fermentación Láctica y Vermicompostaje. - Pruebas estadísticas: Paramétrica, ANOVA en función del Diseño Completo al Azar</p>