
**“PRODUCCIÓN DE LIXIVIADO DE LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA A
PARTIR DE TRES SUSTRATOS ORGÁNICOS”**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERÍA EN INNOVACION AGRICOLA SUSTENTABLE

ESPECIALIDAD:

SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

PRESENTA:

MARINTYA CONCEPCION HERRERA KANTUN

DIRECTOR: DR. FELIPE DE JESÚS GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

CO-DIRECTOR: DR. MARIO BEN-HUR CHUC ARMENDÁRIZ

MARZO 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Subdirección de Planeación y Desarrollo

Instituto Tecnológico Superior de Calkiní
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante

Calkiní, Campeche 06/03/2025
P/03/25/609

INGENIERIA EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

CONSTANCIA DE NO INCONVENIENCIA

MODALIDAD: TESIS

C. MARINTYA CONCEPCIÓN HERRERA KANTUN 7267
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERIA EN INNOVACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE.
PRESENTE

Con relación a lo establecido en el Reglamento de Estudios de Licenciatura, capítulo VII, fracción I, vigente en este Instituto, y una vez emitido el fallo favorable por el director DR. FELIPE DE JESUS CONZALEZ RODRIGUEZ, y el co-director DR. MARIO BEN-HUR CHUC ARMENDARIZ, respectivamente, este Instituto consta de no tener inconveniencia para la realización del acto protocolario de titulación integral de su trabajo profesional titulado: **"PRODUCCIÓN DE LIXIVIADO DE LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA A PARTIR DE TRES SUSTRATOS ORGÁNICOS"**.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Sabiduría, Fortaleza de Nuestra Cultura®

Dr. Jorge Alfonso Hau Puc.
Departamento de Administración y
Apoyo al Estudiante.

C.c.p. Archivo



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE CALKINÍ

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR Y APOYO A
ESTUDIANTES

CLAVE: DMSU0013P
CALKINÍ, CAMPECHE, MÉXICO



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Ah Canul S/N por Carretera Federal, Calkiní, Campeche,
C.P. 24900 Tel. 996-8134870,
e-mail: se_dcalkini@tecnm.mx | itescam.edu.mx



AGRADECIMIENTO

No encuentro las palabras suficientes para agradecer todo el apoyo que he recibido de las personas que han sido parte de este largo camino. Aunque el trayecto ha sido extenso y desafiante, hoy sé que siempre han estado a mi lado. Algunos se unieron en el camino, pero la esencia y el apoyo de todos sigue aquí, constante y firme.

Primero que nada, quiero agradecer a mi madre. Mamá, sin ti este logro no hubiera sido posible. Desde que tengo uso de razón, te he visto como mi ejemplo, mi motor. Gracias a ti, hoy soy una mujer con la firme convicción de seguir adelante y de buscar una vida mejor. Gracias a ti, hoy puedo decir que seré profesionista. Eres la mujer más ejemplar que conozco, y no tengo dudas de que quiero ser como tú.

También quiero agradecer a mis hermanos, por siempre estar para mí, en cada momento. En especial a Cuauhtémoc, quien ha sido mi sustento y apoyo incondicional. A mi hermana Neldy, gracias por estar siempre ahí, con tu respaldo y cariño inquebrantables.

A una ser especial, a quien también le debo gran parte de este logro, Charitin, por ser mi compañera incondicional desde el principio. Por estar a mi lado en mis desvelos, por darme tu apoyo en cada paso. Este logro es tuyo.

A Eduardo Paredes y a Yamile Cervantes, por ser mis amigos siempre, al sol de hoy, los quiero mucho.

Una parte esencial de mi formación académica la debo a mis compañeros de clase y de trabajo. A esos cinco compañeros que estuvieron conmigo durante todo este proceso, Fernando, Mario, Carlos, Eduin. En especial a Diego Gonzalez por ser un buen compañero de clases y un buen amigo, sin tu ayuda en las tareas, estuviéramos en otro lado.

Quiero también expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos asesores, quienes han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Gracias, Dr. Felipe González Rodríguez, por ser un ejemplo académico y profesional. Su apoyo, sabiduría y motivación constante me han inspirado a seguir adelante, siempre con la confianza de que podía lograrlo. Su disposición y orientación fueron cruciales para alcanzar este logro. Y gracias, Dr. Mario Ben-hur Chuc Armendariz, por su apoyo constante. Estoy profundamente agradecida por su orientación y por el tiempo dedicado a este proyecto

DEDICATORIA

A Dios.

A mi madre hermosa, Rita María.

A mis hermanos.

A Charitin, mi compañera de vida.

A Cristina Chuc, que desde el cielo me acompaña.

Índice

Capítulo I.....	9
Introducción.....	9
1. Identificación del problema.....	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.1.1 Uso de la lombriz roja californiana en el vermicompostaje para producir lixiviados ricos en nutrientes.....	11
1.1.2 Producción de lixiviado con diferentes sustratos orgánicos: restos alimenticios, estiércol de ganado y gallinaza.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo general.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificación.....	16
1.4 Hipótesis.....	16
Capítulo II.....	18
Marco teórico.....	18
2. La Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia fetida</i>).....	18
2.1.1 Características biológicas y ecológicas	18
2.1.2 Papel en la producción de compost y lixiviado	20
2.1.3 Ventajas del uso de <i>Eisenia fetida</i> en procesos de vermicompostaje	22
2.2 El Lixiviado de Lombriz.....	22
2.1.1 Definición de lixiviado: Diferencias con el vermicompost líquido.....	22
2.1.2 Composición química del lixiviado (nutrientes, microorganismos, pH).....	24
2.1.3 Propiedades del lixiviado como biofertilizante	26
2.2 Limitaciones y riesgos potenciales (e.g., salinidad, patógenos)	27
2.2.1 Variabilidad en la calidad y composición del lixiviado.....	27
2.3 Sustratos Orgánicos para Vermicompostaje	28
2.3.1 Características de los sustratos ideales	28
2.3.2 Tipos comunes de sustratos: gallinaza, estiércol de ganado, restos alimenticios	29
2.3.3 Efecto de diferentes sustratos en la calidad del vermicompost y lixiviado.	29
2.4 Los Tres Sustratos Orgánicos Evaluados en la Investigación.....	29
2.4.1 Sustrato A, gallinaza: Composición y características relevantes.....	29
2.4.2 Sustrato B, estiércol de ganado: Composición y características relevantes	30
2.4.3 Sustrato C, residuos alimenticios: Composición y características relevantes	30

2.4.4	Criterios para la selección de estos sustratos.....	30
2.5	Factores que Afectan la Producción de Lixiviado	30
2.5.1	Relación C/N (carbono/nitrógeno) en los sustratos	30
2.5.2	Temperatura, humedad y aireación	31
2.5.3	pH del medio	31
2.5.4	Tiempo de procesamiento y frecuencia de riego	31
2.5.5	Densidad de lombrices por unidad de sustrato	31
2.6	Metodologías para la Medición del Lixiviado	32
2.6.1	Métodos para la recolección del lixiviado.....	32
2.6.2	Análisis físico-químico del lixiviado.....	32
2.6.3	Variables de respuesta: Rendimiento y calidad del lixiviado.....	32
2.7	Estudios Previos y Evidencia Empírica	33
2.7.1	Comparación de investigaciones que evalúan sustratos diversos.....	33
2.7.2	Resultados sobre la eficiencia de diferentes sustratos en la producción de lixiviado..	33
2.7.3	Casos de éxito en producción comercial de lixiviado de lombriz	33
2.8	Impacto Ambiental y Económico del Uso del Lixiviado.....	34
2.8.1	Reducción de residuos mediante vermicompostaje.....	34
2.8.2	Ahorro de insumos químicos en agricultura.....	34
2.8.3	Rentabilidad del lixiviado como biofertilizante	34
Capítulo III.		35
Metodología		35
3	Materiales y métodos	35
3.1	Ubicación.....	35
3.2	Macrolocalización.....	35
3.3	Microlocalización	35
3.4	Tipo de Lombriz	35
3.5	Tipos de sustratos orgánicos	35
3.6	Selección y fuente de obtencion	35
3.7	Diagrama de la secuencia experimental.....	37
3.8	Materiales	38
3.9	Métodos	38
3.10	Variables	40
3.11	Muestreos.....	40

3.12	Diseño experimental	40
3.13	Análisis estadístico	41
3.14	Resultados esperados	41
Capítulo IV.		42
Resultados y discusión		42
4.	Resultados y discusión en sustrato bovino	42
4.1	Análisis detallado de los datos de nitratos en sustrato de estiércol de bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas).....	42
4.1.1	Interpretación de los valores de nitratos	43
4.1.2	Discusión de las causas del descenso de nitratos	43
4.2	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de fósforo en lixiviados de sustrato de estiércol bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas)	45
4.2.1	Interpretación de los valores de fósforo	46
4.2.2	Discusión de la dinámica del fósforo	47
4.2.3	Implicaciones para la producción de vermicompost y el uso de lixiviados.....	47
4.3	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de sustrato de estiércol bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas).....	48
4.3.1	Interpretación de los valores de potasio	49
4.3.2	Discusión de la dinámica del potasio en vermicultura	50
4.3.3	Conclusiones generales de NPK en sustrato de estiercol bovino	51
5.	Resultados y discusión en sustrato de gallinaza.....	55
5.1	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de nitratos en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)	55
5.1.1	Interpretación de los valores de nitratos	56
5.1.2	Discusión de la dinámica del nitrógeno en gallinaza de traspatio	57
5.2	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de fósforo (P) en sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)	58
5.2.1	Interpretación de los valores de fósforo.....	59
5.2.2	Discusión de la dinámica del fósforo en gallinaza de traspatio.....	60
5.3	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)	62
5.3.1	Interpretación de los valores de potasio	63
5.3.2	Discusión de la dinámica del potasio en gallinaza de traspatio.....	64
5.3.3	Conclusiones generales de NPK en sustrato gallinaza	65
6.	Resultado y discusion de sustrato Residuos.....	69

6.1	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de nitratos (ppm) en lixiviados de un sustrato de residuos domésticos para vermicultura (lombrices rojas californianas).....	69
6.1.2	Interpretación de los valores de nitratos	69
6.1.3	Discusión de la dinámica del nitrógeno en residuos domésticos.....	71
6.2.2	Discusión sobre la dinámica del fósforo en residuos domésticos.....	74
6.3	Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de un sustrato de residuos domésticos para vermicultura (lombrices rojas californianas).....	76
6.3.1	Interpretación de los valores de potasio	76
7.	Comparación, análisis, interpretación, discusión y conclusiones globales	78
7.1	Nitratos (NO_3^-).....	79
7.1.1	Estiércol bovino.....	79
7.1.2	Gallinaza de traspatio	79
7.1.3	Residuos domésticos	80
7.2	Fósforo (P).....	80
7.2.1	Estiércol bovino.....	80
7.2.2	Gallinaza de traspatio	81
7.2.3	Residuos domésticos	81
7.3	Potasio (K).....	82
7.3.1	Estiércol bovino.....	82
7.3.2	Gallinaza de traspatio	82
7.3.3	Residuos domésticos	82
8.	Discusión Integral: Comparación entre Sustratos	83
	Capítulo v	84
	Conclusiones generales	84
	Referencias.....	86

Índice de ilustración

Ilustración 1. Diagrama de secuencia experimental	37
Tabla 1. Distribución de tratamientos.....	40
Tabla 2. Nitratos en partes por millón (ppm) obtenidos de 6 muestreos mensuales de los refrigeradores 1 y 2 (T1R1 y T1R2) con sustrato bovino de Becál	42
Tabla 3. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviados de estiércol bovino para vermicultura (primer conjunto de datos)	45
Tabla 4. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviados de estiércol bovino para vermicultura (segundo conjunto de datos)	45
Tabla 5. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de estiércol bovino para vermicultura – Tratamiento 1.	49
Tabla 6. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de estiércol bovino para vermicultura – Tratamiento 2.	49
Tabla 7. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.	55
Tabla 8. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.	55
Tabla 9. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.	58
Tabla 10. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.	59
Tabla 11. Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)	62
Tabla 12. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura	62
Tabla 13. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.	69
Tabla 14. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.	72
Tabla 15. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.	76

Capítulo I

Introducción

1. Identificación del problema

1.1 Antecedentes

La producción sostenible de fertilizantes orgánicos ha ganado relevancia en los últimos años debido a la creciente preocupación por el impacto ambiental de los fertilizantes químicos y

la necesidad de gestionar eficientemente los residuos orgánicos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022). En este contexto, el uso de lombrices para la vermicompostaje se presenta como una alternativa viable y ecológica para transformar residuos orgánicos en productos de alto valor agrícola, como el lixiviado de lombriz (Rodríguez & Pérez, 2021).

El presente estudio se enfoca en la producción de lixiviado de lombriz utilizando la especie *Eisenia foetida*, conocida por su alta eficiencia en la descomposición de materia orgánica y su adaptabilidad a diferentes sustratos (López et al., 2023). Se seleccionaron tres sustratos orgánicos comunes: gallinaza, residuos de cocina y estiércol de ganado, debido a su disponibilidad y composición nutricional adecuada para el proceso de vermicompostaje (Martínez & Torres, 2020).

Para evaluar la efectividad de los sustratos seleccionados, se diseñaron tres tratamientos distribuidos en un diseño completamente al azar con dos repeticiones. Este diseño experimental permite minimizar las variaciones y obtener resultados más precisos sobre la influencia de cada sustrato en la producción y calidad del lixiviado (Fernández et al., 2022). El enfoque principal del análisis se centró en las propiedades físico-químicas del lixiviado de lombriz, tales como el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y la presencia de compuestos orgánicos solubles, los cuales son indicadores clave de la calidad del producto final (Gómez & Ramírez, 2023).

Estudios recientes han demostrado que la combinación de diferentes sustratos puede optimizar la producción de lixiviado de lombriz, mejorando tanto la eficiencia del proceso como la calidad del producto (Hernández et al., 2021). Además, la caracterización físico-química del lixiviado es esencial para su aplicación como fertilizante líquido, ya que garantiza su efectividad y minimiza posibles impactos negativos en el suelo y las plantas (Sánchez & Díaz, 2022).

a) Importancia del lixiviado en la agricultura orgánica.

El lixiviado, también conocido como "té de compost" o "extracto de lombriz", desempeña un papel crucial en la agricultura orgánica debido a su alta concentración de nutrientes esenciales. Este líquido se obtiene a partir del proceso de vermicompostaje, donde *Eisenia*

foetida descompone materia orgánica, liberando compuestos solubles que son fácilmente asimilables por las plantas (Pérez et al., 2022). La composición química del lixiviado incluye nitrógeno, fósforo, potasio y una variedad de micronutrientes que son vitales para el crecimiento vegetal (Gómez & Martínez, 2021).

Uno de los beneficios más significativos del lixiviado es su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo. Al incrementar la disponibilidad de nutrientes, el lixiviado favorece un desarrollo radicular más robusto y una mayor resistencia de las plantas a enfermedades (Gómez & Martínez, 2021). Además, las fitohormonas presentes en el lixiviado estimulan el crecimiento de las plantas, promoviendo una mayor producción y calidad de los cultivos (Hernández et al., 2020).

Desde una perspectiva ambiental, el uso de lixiviados contribuye a la sostenibilidad al reducir la cantidad de residuos orgánicos que de otro modo podrían generar problemas de gestión de desechos. Además, al disminuir la dependencia de fertilizantes químicos, se mitiga la contaminación del agua y del suelo, promoviendo un entorno agrícola más saludable (López et al., 2019).

b) Gestión de residuos mediante vermicompostaje y producción de lixiviado.

1.1.1 Uso de la lombriz roja californiana en el vermicompostaje para producir lixiviados ricos en nutrientes.

La lombriz roja californiana es una de las especies más utilizadas en sistemas de vermicompostaje debido a su alta capacidad para descomponer materia orgánica, rápida reproducción, y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales (Edwards & Arancon, 2004). Esta especie, originaria de Europa, se ha distribuido ampliamente por el mundo, encontrando usos en agricultura, gestión de residuos y proyectos ecológicos. A diferencia de otras lombrices, *Eisenia foetida* puede consumir grandes volúmenes de materia orgánica en descomposición, transformándola en productos con alto valor agrícola, como humus y lixiviado líquido.

a) Características de *Eisenia foetida* y su papel en la producción de lixiviados.

Eisenia foetida, conocida comúnmente como la lombriz roja californiana, es una especie de lombriz de tierra ampliamente utilizada en el vermicompostaje debido a sus características biológicas favorables. Estas lombrices presentan una alta tasa de reproducción y una notable eficiencia en la descomposición de materia orgánica, lo que las hace ideales para la producción de compost y lixiviados (González & Ramírez, 2022). Además, *Eisenia foetida* demuestra una notable adaptabilidad a diversas condiciones ambientales, tolerando variaciones en temperatura y humedad, lo que facilita su uso en diferentes sistemas de compostaje (Torres & Velázquez, 2023).

El mecanismo por el cual *Eisenia foetida* produce lixiviados involucra la digestión de materia orgánica, donde las lombrices descomponen los residuos y liberan nutrientes en forma líquida. La calidad del lixiviado está influenciada por factores como la dieta de las lombrices y las condiciones del compostaje, lo que significa que la elección del sustrato orgánico es fundamental para obtener un lixiviado nutritivo y balanceado (Fernández et al., 2021).

Una de las principales ventajas de utilizar *Eisenia foetida* en el vermicompostaje es su capacidad para producir subproductos de alta calidad. El compost resultante es rico en materia orgánica y microorganismos beneficiosos, mientras que el lixiviado obtenido es un fertilizante líquido eficiente y sostenible (Castillo & Morales, 2022). Comparado con otras especies de lombrices, *Eisenia foetida* ofrece una mayor concentración de nutrientes en el lixiviado, lo que optimiza su uso en aplicaciones agrícolas (Castillo & Morales, 2022).

b) Uso del vermicompostaje en la gestión de residuos y la agricultura sostenible, produciendo lixiviado

El vermicompostaje se ha consolidado como una estrategia eficaz para la gestión de residuos orgánicos y la promoción de la agricultura sostenible. Este proceso utiliza lombrices, principalmente de la especie *Eisenia foetida*, para descomponer materia orgánica y transformarla en productos valiosos como el vermicompost y el lixiviado (González et al., 2023).

La implementación del vermicompostaje contribuye significativamente a la reducción de residuos sólidos urbanos y agrícolas, disminuyendo así la presión sobre los vertederos y

mitigando los impactos ambientales asociados a la disposición inadecuada de residuos (López & Martínez, 2021).

Además de la gestión de residuos, el vermicompostaje mejora la calidad del suelo al aumentar su contenido de materia orgánica, mejorar la estructura del suelo y fomentar la actividad biológica beneficiosa. El lixiviado de lombriz, un subproducto líquido del proceso es particularmente valioso como fertilizante orgánico debido a su alto contenido de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son fundamentales para el crecimiento vegetal (Ramírez et al., 2022). Este lixiviado no solo proporciona nutrientes de manera eficiente, sino que también mejora la retención de agua en el suelo y promueve una mayor disponibilidad de micronutrientes para las plantas (Sánchez & Torres, 2023).

La aplicación del lixiviado de lombriz en la agricultura sostenible ofrece múltiples beneficios. En primer lugar, reduce la dependencia de fertilizantes químicos, cuyos excesos pueden causar contaminación de fuentes hídricas y deterioro de la calidad del suelo (Hernández et al., 2020). Además, el uso de lixiviado promueve prácticas agrícolas más ecológicas, alineadas con los principios de la agricultura regenerativa, que buscan restaurar la salud del suelo y aumentar la biodiversidad (Martínez & Pérez, 2024). Estudios recientes han demostrado que el uso de lixiviado de lombriz puede incrementar el rendimiento de cultivos y mejorar la resistencia de las plantas a enfermedades y estrés abiótico (Gómez et al., 2023).

Asimismo, el vermicompostaje y la producción de lixiviado contribuyen a la economía circular al transformar desechos en recursos valiosos, generando oportunidades económicas para comunidades rurales y urbanas. La adopción de estas prácticas sostenibles puede fomentar el desarrollo de pequeñas y medianas empresas dedicadas al procesamiento de residuos orgánicos y la comercialización de productos derivados del vermicompostaje (Fernández & Díaz, 2022).

1.1.2 Producción de lixiviado con diferentes sustratos orgánicos: restos alimenticios, estiércol de ganado y gallinaza.

La producción de lixiviado de lombriz a partir de distintos sustratos orgánicos es una práctica esencial en el vermicompostaje, ya que la selección adecuada de los materiales influye directamente en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final. En este estudio,

se utilizaron tres sustratos principales: restos alimenticios, estiércol de ganado y gallinaza, cada uno con características específicas que afectan la producción y composición del lixiviado (González et al., 2023).

a) Restos alimenticios.

Los restos de cocina son una fuente abundante de materia orgánica y nutrientes esenciales, lo que los convierte en un sustrato óptimo para el vermicompostaje. Su alto contenido de carbono y nitrógeno facilita la actividad de las lombrices, promoviendo una descomposición rápida y eficiente (Martínez & López, 2022). Además, los restos alimenticios son fácilmente disponibles y contribuyen significativamente a la producción de lixiviado de alta calidad. Sin embargo, es crucial mantener un equilibrio adecuado en la mezcla de estos residuos para evitar problemas como la generación de olores desagradables o la proliferación de patógenos (Hernández et al., 2021).

b) Estiércol de ganado.

El estiércol bovino es ampliamente utilizado en el vermicompostaje debido a su composición equilibrada de nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio. Este sustrato no solo mejora la estructura del compost, aumentando su capacidad de retención de agua, sino que también aporta microorganismos beneficiosos que potencian el proceso de descomposición (Ramírez & Torres, 2022). Además, el uso de estiércol de ganado contribuye a la reducción de residuos agrícolas, promoviendo una gestión más sostenible de los recursos y disminuyendo la dependencia de fertilizantes químicos (López et al., 2020).

c) Gallinaza.

La gallinaza, o estiércol de aves de corral, es otro sustrato efectivo en el vermicompostaje debido a su elevado contenido de nitrógeno y fósforo, aunque es más concentrado y, por lo tanto, requiere un manejo cuidadoso para evitar la sobrecarga de nutrientes en el lixiviado. Este sustrato genera lixiviados de alta calidad con una fuerte concentración de nutrientes y una elevada actividad bacteriana, ideal para su uso en cultivos con alta demanda nutricional (Gómez-Brandón et al., 2013). No obstante, su alta concentración de nutrientes puede resultar en lixiviados que requieren dilución antes de su aplicación en cultivos sensibles, para evitar problemas de toxicidad en las plantas.

Comparación y efectos combinados de los sustratos: La combinación de estos sustratos, como restos alimenticios con estiércol o gallinaza, ha demostrado ser una estrategia prometedora para obtener lixiviados equilibrados y de mayor estabilidad. Mezclar diferentes sustratos puede optimizar la relación de nutrientes y mejorar la diversidad microbiana del lixiviado resultante, proporcionando un fertilizante orgánico de alta calidad adecuado para diversos tipos de suelos y condiciones agrícolas (Lazcano & Domínguez, 2011).

Parámetros de evaluación: La calidad del lixiviado se evalúa mediante diversos parámetros físico-químicos, tales como el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de nutrientes (N, P, K). Un pH adecuado asegura la disponibilidad de nutrientes para las plantas, mientras que una conductividad eléctrica óptima indica una buena concentración de sales nutritivas sin exceder los niveles que podrían causar toxicidad (Fernández et al., 2021). Además, la presencia de sólidos totales disueltos es un indicador clave de la eficiencia del proceso de vermicompostaje y de la calidad del lixiviado producido (Vargas & Díaz, 2023).

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

Evaluar la producción de lixiviado de lombriz a partir de tres sustratos orgánicos estiércol de ganado, gallinaza y residuos alimenticios y analizar la cinética del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio durante el proceso de vermicompostaje.

1.2.2 Objetivos específicos.

- a) Comparar la producción de lixiviado de lombriz utilizando tres sustratos orgánicos (estiércol de ganado, gallinaza y residuos alimenticios).
- b) Determinar la cinética del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el lixiviado producido por cada sustrato durante el proceso de vermicompostaje.
- c) Analizar la influencia de los diferentes sustratos en la calidad del lixiviado, en términos de su contenido de N, P y K.
- d) Proponer recomendaciones para optimizar la producción de lixiviado con base en los resultados obtenidos.

1.3 Justificación.

El vermicompostaje es una técnica sostenible y eficiente para el manejo de residuos orgánicos, contribuyendo a la reducción de desechos y al mejoramiento de los recursos del suelo. En este contexto, el lixiviado de lombriz se presenta como un subproducto valioso por su alto contenido de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), esenciales para el desarrollo de las plantas y la mejora de la calidad del suelo. Sin embargo, la cantidad y calidad del lixiviado pueden variar dependiendo de los sustratos utilizados en el proceso, lo que subraya la necesidad de un análisis detallado para identificar las mejores prácticas de producción.

El objetivo de este estudio se justifica en la importancia de evaluar cómo diferentes sustratos orgánicos (estiércol de ganado, gallinaza y residuos alimenticios) influyen en la producción y calidad del lixiviado, en términos de su contenido de N, P y K. Este conocimiento es crucial para optimizar el proceso de vermicompostaje y maximizar los beneficios agronómicos y ambientales del lixiviado.

Además, la determinación de la cinética de los nutrientes en el lixiviado permitirá comprender los cambios en la concentración de N, P y K durante el proceso, proporcionando información valiosa para el diseño de estrategias que mejoren la eficiencia de producción. Comparar los diferentes sustratos no solo ayudará a seleccionar aquellos más adecuados para la producción de lixiviado de alta calidad, sino también a establecer recomendaciones prácticas para su uso en contextos agrícolas y de manejo de residuos.

Por último, los resultados de este estudio pueden ser aplicados en diferentes escalas, desde pequeños productores agrícolas hasta sistemas industriales de manejo de residuos, promoviendo la sostenibilidad y la economía circular en el uso de recursos orgánicos.

1.4 Hipótesis.

El uso de diferentes sustratos orgánicos (estiércol de ganado, gallinaza y residuos alimenticios) influye significativamente en la cantidad y calidad del lixiviado producido durante el proceso de vermicompostaje. Se espera que cada sustrato genere lixiviados con diferencias en su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, debido a las características químicas y biológicas inherentes de los materiales. Además, se plantea que la cinética de los

nutrientes (N, P y K) varía a lo largo del tiempo, reflejando dinámicas específicas de descomposición y mineralización asociadas a cada sustrato.

En particular, se hipotetiza que:

- La gallinaza producirá el lixiviado con mayores concentraciones de nutrientes debido a su alto contenido inicial de N, P y K.
- El estiércol de ganado y los residuos alimenticios mostrarán comportamientos diferentes en la producción de lixiviado, siendo este último más variable en calidad debido a su composición heterogénea.
- La optimización del proceso, basada en la selección del sustrato más eficiente, permitirá maximizar la producción de lixiviado de alta calidad con aplicaciones potenciales en la agricultura sostenible.
- Estos resultados podrían fundamentar recomendaciones prácticas para mejorar el manejo de residuos orgánicos y el aprovechamiento del lixiviado en sistemas agrícolas.

Capítulo II.

Marco teórico

2. La Lombriz Roja Californiana (*Eisenia fetida*)

2.1.1 Características biológicas y ecológicas

La lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) es una especie ampliamente utilizada en procesos de vermicompostaje debido a su gran capacidad de adaptación y eficiencia en la descomposición de residuos orgánicos. Es epigea, lo que significa que habita en las capas superiores del suelo, particularmente en ambientes ricos en materia orgánica en descomposición (Ali & Kashem, 2018). Esta característica le permite procesar eficientemente restos vegetales, estiércol y residuos agroindustriales (Torres, 2011; Edwards et al., 1998). Se adapta a temperaturas entre 15°C y 30°C y tolera un rango de pH de 5.0 a 9.0, siendo más productiva en niveles cercanos a la neutralidad (Reinecke & Viljoen, 1990).

Además, *Eisenia fetida* se destaca por su capacidad de sobrevivir en condiciones adversas como fluctuaciones de temperatura y humedad, factores que limitan la eficiencia de otras especies debido a su capacidad para gestionar diferentes tipos de residuos orgánicos sin afectar significativamente su crecimiento y reproducción (Ali & Kashem, 2018; Torres, 2011). En sistemas de vermicompostaje, esta lombriz metaboliza rápidamente los residuos, convirtiéndolos en productos ricos en nutrientes como el vermicompost y el lixiviado, facilitando así su uso en agricultura sostenible. Gracias a su biología, *Eisenia fetida* es una opción preferida para la gestión de residuos en contextos rurales y urbanos, fomentando la economía circular (Torres, 2011; Edwards et al., 1998).

a) Ciclo de vida y condiciones óptimas de cultivo

El ciclo de vida de *Eisenia fetida* es relativamente corto y eficiente, lo que permite su utilización intensiva en procesos de vermicompostaje. Cada lombriz adulta produce capullos de forma continua, alcanzando su pico reproductivo en entornos controlados después de la tercera semana de vida (Ali & Kashem, 2018). La tasa de eclosión depende de la calidad del sustrato y de la temperatura, con tiempos de incubación que oscilan entre 21 y 30 días (Edwards et al., 1998). Los capullos contienen entre dos y cinco crías, y las lombrices recién nacidas pasan por una fase juvenil hasta alcanzar la madurez sexual en tres a cuatro semanas.

(Reinecke & Viljoen, 1990). Esta rápida transición de juvenil a adulto permite que las poblaciones crezcan exponencialmente si se mantienen condiciones favorables.

La capacidad de las lombrices para reproducirse en ciclos continuos y su elevada fecundidad son factores que maximizan la productividad en sistemas de vermicompostaje. En estudios realizados por Ali y Kashem (2018), las lombrices alcanzaron su máxima eficiencia reproductiva cuando se utilizaron mezclas de sustrato de estiércol y restos vegetales, lo que sugiere que la disponibilidad de materia orgánica equilibrada es crucial para su reproducción. Por otro lado, la densidad poblacional y la competencia por recursos también influyen en la producción de capullos y en la tasa de eclosión, demostrando la importancia de manejar adecuadamente el espacio disponible para maximizar los resultados (Edwards et al., 1998).

b) Factores que afectan el ciclo de vida

El desarrollo de *Eisenia fetida* depende de varios factores ambientales. Uno de los más relevantes es la temperatura: las temperaturas óptimas para su desarrollo están entre 20°C y 25°C, mientras que temperaturas superiores a 30°C o inferiores a 10°C ralentizan su crecimiento o pueden ser letales (Reinecke & Viljoen, 1990). La humedad del sustrato es otro factor determinante, ya que las lombrices respiran a través de su piel y necesitan ambientes húmedos, pero no saturados. Un nivel de humedad entre el 60% y 80% es ideal para su desarrollo y actividad (Ali & Kashem, 2018).

El pH del sustrato también juega un papel crucial, ya que las lombrices prefieren condiciones ligeramente ácidas o neutras, con un rango de pH óptimo entre 6.5 y 7.5 (Torres, 2011). Sin embargo, se ha demostrado que pueden tolerar variaciones moderadas de pH, lo que las hace adaptables a diferentes tipos de residuos. En investigaciones de Edwards et al. (1998), se observó que la calidad del sustrato influye en la productividad de las lombrices. Por ejemplo, los sustratos con un buen balance entre carbono y nitrógeno favorecen la reproducción, mientras que la acumulación de sales o sustancias tóxicas puede inhibirla.

Otro aspecto importante es la densidad de población. Aunque *Eisenia fetida* puede tolerar densidades relativamente altas, la sobrepoblación puede llevar a una disminución en la tasa de reproducción debido a la competencia por recursos (Reinecke & Viljoen, 1990). Por ello,

es fundamental gestionar adecuadamente la proporción entre lombrices y sustrato para garantizar su bienestar y maximizar la producción de vermicompost y lixiviados

c) Estrategias de manejo y optimización

El manejo adecuado del ciclo de vida de *Eisenia fetida* permite maximizar su eficiencia en sistemas de vermicompostaje. Al monitorear y controlar variables clave como la temperatura, la humedad, el pH y la densidad poblacional, es posible obtener un flujo constante de vermicompost y lixiviado de alta calidad (Edwards et al., 1998). Los agricultores y operadores de sistemas de vermicompostaje pueden ajustar la alimentación según la fase del ciclo de vida de las lombrices para asegurar su productividad. Durante las primeras semanas, se recomienda proporcionar alimentos ricos en nitrógeno para fomentar el crecimiento, y en etapas posteriores, equilibrar la alimentación con materiales ricos en carbono para favorecer la reproducción y mejorar la calidad del vermicompost (Torres, 2011).

En contextos comerciales, la planificación del ciclo de vida también permite anticipar la producción de capullos y nuevas crías, garantizando un suministro constante de lombrices para nuevos proyectos o ventas (Ali & Kashem, 2018). Además, el vermicompostaje ofrece ventajas ambientales significativas al reducir los residuos orgánicos enviados a vertederos, promoviendo una economía circular y sostenible.

2.1.2 Papel en la producción de compost y lixiviado

El papel de *Eisenia fetida* en la producción de compost y lixiviado es crucial debido a su capacidad para transformar materia orgánica de manera eficiente, mejorando la calidad del suelo y reduciendo la acumulación de residuos (Ali & Kashem, 2018). Esta lombriz actúa como un catalizador biológico en el proceso de vermicompostaje, facilitando la degradación de residuos orgánicos mediante la fragmentación y digestión del material. Durante su paso por el tracto digestivo de las lombrices, los residuos se enriquecen con nutrientes esenciales y microorganismos que aumentan la fertilidad del suelo (Edwards et al., 1998).

El vermicompost resultante es un abono orgánico que contiene nitrógeno, fósforo, potasio y microorganismos beneficiosos. Estos nutrientes se encuentran en formas biodisponibles, lo que permite una rápida absorción por las plantas (Torres, 2011). Además, el vermicompost mejora la estructura del suelo al aumentar su capacidad para retener agua, lo que resulta

fundamental en áreas con escasez hídrica o en suelos erosionados (Reinecke & Viljoen, 1990). El vermicompost también reduce la necesidad de fertilizantes químicos, favoreciendo una agricultura más sostenible (Edwards et al., 1998).

a) Producción de lixiviado y sus propiedades

El lixiviado es otro subproducto valioso del proceso de vermicompostaje. Este líquido se genera por la percolación del agua a través de la materia orgánica durante la degradación, y contiene una mezcla concentrada de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, así como hormonas de crecimiento y compuestos antimicrobianos (Ali & Kashem, 2018). A diferencia del vermicompost sólido, el lixiviado tiene la ventaja de ser fácilmente absorbido por las plantas al aplicarse como biofertilizante líquido foliar o en sistemas de riego.

Diversos estudios han demostrado que el lixiviado no solo promueve el crecimiento de las plantas sino que también fortalece sus sistemas inmunológicos, haciéndolas más resistentes a plagas y enfermedades (Edwards et al., 1998). El lixiviado contiene microorganismos que actúan como antagonistas naturales de patógenos en el suelo, reduciendo la incidencia de enfermedades en cultivos (Torres, 2011). Además, su uso continuo en suelos agrícolas mejora el microbiota del suelo, contribuyendo a la regeneración de ecosistemas degradados (Reinecke & Viljoen, 1990).

b) Impacto en la gestión de residuos y la economía circular

El proceso de vermicompostaje y la producción de lixiviado también desempeñan un papel fundamental en la gestión sostenible de residuos. Al transformar residuos orgánicos en biofertilizantes y compost, se reduce la cantidad de material que llega a los vertederos, disminuyendo así la generación de gases de efecto invernadero como el metano (Torres, 2011). De esta forma, el vermicompostaje contribuye a los principios de la economía circular, donde los residuos se convierten en insumos valiosos para nuevos ciclos de producción agrícola (Ali & Kashem, 2018).

Además, los productos derivados del vermicompostaje, como el lixiviado, tienen un alto valor comercial en mercados especializados en agricultura orgánica. Su comercialización representa una oportunidad económica para pequeños agricultores y productores urbanos, quienes pueden generar ingresos adicionales al vender estos biofertilizantes (Edwards et al.,

1998). Este enfoque productivo no solo beneficia económicamente a los agricultores, sino que también promueve una agricultura más ecológica y sostenible.

2.1.3 Ventajas del uso de *Eisenia fetida* en procesos de vermicompostaje

El uso de *Eisenia fetida* en sistemas de vermicompostaje ofrece múltiples ventajas. Además de su alta eficiencia reproductiva y su capacidad para procesar una amplia variedad de residuos orgánicos, esta especie muestra una notable resistencia a condiciones adversas y fluctuaciones ambientales (Edwards et al., 1998). Su capacidad para tolerar densidades poblacionales elevadas permite maximizar la productividad en espacios reducidos (Reinecke & Viljoen, 1990). Asimismo, la utilización de estas lombrices en la gestión de residuos contribuye significativamente a la reducción de residuos orgánicos destinados a vertederos y al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles (Torres, 2011).

El empleo de *Eisenia fetida* también tiene beneficios económicos, ya que el vermicompost y el lixiviado son productos comercializables como fertilizantes orgánicos. Estos productos no solo enriquecen los suelos sino que también reducen la necesidad de fertilizantes químicos, contribuyendo a prácticas agrícolas más ecológicas (Torres, 2011; Ali & Kashem, 2018).

2.2 El Lixiviado de Lombriz

2.1.1 Definición de lixiviado: Diferencias con el vermicompost líquido

El lixiviado de lombriz es un subproducto líquido que se genera a medida que el agua se filtra a través de la materia orgánica en proceso de vermicompostaje, transportando consigo nutrientes, microorganismos y metabolitos producidos por las lombrices y los microorganismos presentes en el sustrato (Edwards et al., 1998). Este proceso ocurre naturalmente en sistemas donde se permite la acumulación de humedad en exceso, y el líquido recolectado se considera una fuente valiosa de nutrientes y microorganismos para su uso como biofertilizante (Ali & Kashem, 2018).

a) Diferencias entre lixiviado y vermicompost líquido

Es importante diferenciar entre lixiviado y otros productos derivados del compostaje, como el té de compost o el vermicompost líquido, ya que su composición y modo de obtención varían significativamente (Torres, 2011). El lixiviado es un subproducto espontáneo del proceso de vermicompostaje, mientras que el vermicompost líquido se obtiene al mezclar

compost maduro con agua, seguido de un proceso de fermentación aeróbica o anaeróbica (Ali & Kashem, 2018).

El té de compost suele prepararse de manera intencional y controlada para maximizar la extracción de nutrientes y microorganismos beneficiosos, mientras que el lixiviado refleja de manera más directa la composición del sustrato utilizado en el vermicompostaje y las condiciones en las que se llevó a cabo el proceso (Edwards et al., 1998). En sistemas bien manejados, el lixiviado puede tener propiedades comparables a las del té de compost, aunque su composición es menos predecible y puede variar según el tiempo de exposición al sustrato y el tipo de residuos utilizados.

b) Condiciones de generación del lixiviado

El lixiviado se genera en mayor cantidad en sistemas donde la humedad del sustrato se mantiene por encima del 80%. La acumulación de agua dentro del sistema permite que los nutrientes solubles sean arrastrados por la gravedad, creando un líquido concentrado en minerales, nitrógeno, fósforo y potasio (Reinecke & Viljoen, 1990). Sin embargo, este proceso puede ser contraproducente si la humedad es excesiva, ya que podría provocar anaerobiosis y la acumulación de compuestos tóxicos como amoníaco y ácidos grasos volátiles (Ali & Kashem, 2018).

Un aspecto relevante del lixiviado es su sensibilidad a la calidad del sustrato. La utilización de residuos orgánicos de origen animal, como estiércol, tiende a generar lixiviados con mayor concentración de nitrógeno, mientras que los residuos vegetales aportan una mayor diversidad de microorganismos (Edwards et al., 1998). La capacidad del lixiviado para actuar como biofertilizante depende en gran medida de estos factores, así como del manejo adecuado del sistema de vermicompostaje.

c) Recolección y almacenamiento

La recolección del lixiviado debe realizarse de manera regular para evitar fermentaciones no deseadas y la proliferación de patógenos. Idealmente, los sistemas de vermicompostaje se diseñan con bandejas o recipientes que faciliten la separación del lixiviado del vermicompost sólido (Torres, 2011). El almacenamiento también es un aspecto crítico, ya que los lixiviados

pueden degradarse rápidamente si no se mantienen en condiciones adecuadas, como en recipientes sellados y lejos de la luz directa del sol (Ali & Kashem, 2018).

Además, es recomendable utilizar el lixiviado lo antes posible después de su recolección, dado que su efectividad como biofertilizante disminuye con el tiempo debido a la pérdida de microorganismos activos y nutrientes solubles (Edwards et al., 1998). En aplicaciones agrícolas, los lixiviados se suelen diluir antes de su uso para evitar problemas de sobrefertilización o acumulación de sales en el suelo.

2.1.2 Composición química del lixiviado (nutrientes, microorganismos, pH)

El lixiviado de lombriz es una solución compleja que contiene una mezcla diversa de nutrientes esenciales y microorganismos beneficiosos que le confieren su valor como biofertilizante. Su composición varía según el tipo de residuos orgánicos utilizados como sustrato y las condiciones ambientales durante el proceso de vermicompostaje (Ali & Kashem, 2018; Edwards et al., 1998). Además de aportar nutrientes primarios, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), contiene microorganismos que favorecen el desarrollo del suelo y promueven la salud vegetal.

a) Nutrientes esenciales en el lixiviado

El lixiviado es especialmente rico en nitrógeno, tanto en forma amoniacal como en nitratos, lo que contribuye al crecimiento vegetativo de las plantas (Ali & Kashem, 2018). La concentración de fósforo y potasio también es significativa; el fósforo es fundamental para la formación de raíces y el desarrollo temprano de las plantas, mientras que el potasio mejora la floración y la resistencia de los cultivos frente a enfermedades (Edwards et al., 1998). Estos nutrientes están disponibles en formas fácilmente asimilables, lo que mejora su efectividad en aplicaciones agrícolas y evita la acumulación de residuos tóxicos en el suelo (Reinecke & Viljoen, 1990).

Además de los nutrientes principales, el lixiviado contiene micronutrientes esenciales como calcio, magnesio, hierro y zinc, necesarios para el metabolismo de las plantas (Torres, 2011). La disponibilidad de estos elementos traza permite que el lixiviado funcione como un suplemento nutricional integral, complementando las deficiencias que puedan presentar los suelos agotados.

b) Microorganismos y su papel en la salud del suelo

El lixiviado contiene una comunidad diversa de microorganismos, incluidos bacterias, hongos y actinomicetos, que desempeñan funciones clave en la salud del suelo. Estos microorganismos no solo descomponen materia orgánica y liberan nutrientes, sino que también inhiben el desarrollo de patógenos mediante competencia directa o la producción de sustancias antibióticas (Ali & Kashem, 2018). La aplicación regular de lixiviado en cultivos puede aumentar la actividad microbiana del suelo, mejorando su estructura y fertilidad a largo plazo (Torres, 2011).

El proceso de vermicompostaje estimula la proliferación de microorganismos beneficiosos. Por ejemplo, la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno ayuda a mejorar la disponibilidad de este nutriente para las plantas, mientras que los hongos micorrícicos facilitan la absorción de fósforo y agua (Edwards et al., 1998). La acción conjunta de estos microorganismos promueve un entorno radicular saludable y una mayor resistencia de las plantas al estrés ambiental.

c) Influencia del pH y calidad del lixiviado

El pH del lixiviado varía generalmente entre 6.5 y 8.0, aunque puede fluctuar dependiendo del tipo de sustrato utilizado y de la fase del proceso de vermicompostaje (Reinecke & Viljoen, 1990). Un pH neutro o ligeramente alcalino es ideal para la mayoría de los cultivos, ya que favorece la disponibilidad de nutrientes y evita la toxicidad por metales pesados (Ali & Kashem, 2018). Sin embargo, el uso de lixiviado con pH extremadamente alto o bajo puede ser perjudicial para algunas plantas sensibles, por lo que es recomendable medir el pH antes de su aplicación.

d) Factores que afectan la composición del lixiviado

La calidad del lixiviado depende de múltiples factores, como la proporción de residuos orgánicos en el sustrato, la temperatura, la humedad y la duración del proceso de vermicompostaje. Los estudios muestran que los lixiviados producidos a partir de estiércol tienen una mayor concentración de nitrógeno, mientras que los obtenidos de restos vegetales contienen más compuestos orgánicos secundarios, como ácidos húmicos y fúlvicos, que mejoran la calidad del suelo (Torres, 2011; Edwards et al., 1998).

Por estas razones, es importante optimizar las condiciones del sistema de vermicompostaje para asegurar la producción de lixiviado de alta calidad. La monitorización periódica de parámetros como el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de nutrientes garantiza que el lixiviado cumpla con los estándares necesarios para su aplicación eficiente en cultivos.

2.1.3 Propiedades del lixiviado como biofertilizante

El lixiviado de vermicompost es un biofertilizante eficiente que aporta múltiples beneficios para la agricultura, debido a su capacidad para mejorar el crecimiento y la salud de las plantas mediante la combinación de nutrientes, hormonas vegetales y microorganismos. Además de nitrógeno, fósforo y potasio, contiene ácidos húmicos y fúlvicos que incrementan la absorción de nutrientes, favorecen la actividad microbiana en el suelo y promueven la salud del sistema radicular (Rehman et al., 2023). Estos ácidos también facilitan la liberación de nutrientes retenidos en el suelo, haciendo que estén más disponibles para las plantas.

a) Estímulo del crecimiento y rendimiento vegetal

El lixiviado contiene fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, que mejoran la germinación de semillas, estimulan el desarrollo de raíces y favorecen una mayor floración y fructificación (Gutiérrez-Miceli et al., 2007). Al mejorar el desarrollo radicular, el lixiviado incrementa la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes, lo que a su vez se traduce en un mayor rendimiento y una mejor calidad de los cultivos. Además, estas hormonas ayudan a mitigar el estrés causado por condiciones adversas, como la sequía o la salinidad del suelo (Singh & Kalra, 2017).

b) Beneficios microbianos y protección contra patógenos

El lixiviado contiene microorganismos beneficiosos que actúan como agentes de biocontrol, limitando el desarrollo de patógenos mediante la competencia por nutrientes y la producción de sustancias antimicrobianas (Rehman et al., 2023). Esta propiedad convierte al lixiviado en una alternativa natural y sostenible a los pesticidas químicos, favoreciendo un entorno más saludable tanto para el suelo como para las plantas. En cultivos hortícolas y frutícolas, la aplicación regular de lixiviado ha demostrado reducir la incidencia de enfermedades y mejorar la calidad de la producción final (Gutiérrez-Miceli et al., 2007).

c) Versatilidad en aplicaciones agrícolas

El lixiviado de lombriz puede aplicarse de diferentes maneras: mediante riego, aplicación foliar o en la preparación de suelos antes de la siembra. En su uso como fertilizante foliar, ha mostrado ser eficaz en la promoción del crecimiento vegetativo, especialmente en cultivos de hoja verde y hortalizas (Singh & Kalra, 2017). Además, cuando se incorpora al suelo, mejora la retención de humedad y optimiza la estructura del suelo, lo que reduce la necesidad de riegos frecuentes y disminuye el impacto ambiental asociado al uso intensivo de agua (Rehman et al., 2023).

d) Limitaciones y precauciones

Aunque el lixiviado ofrece muchos beneficios, su efectividad depende de un manejo adecuado del proceso de vermicompostaje. Si el lixiviado se almacena de forma inadecuada, puede perder microorganismos activos y nutrientes esenciales. Por ello, es recomendable usarlo inmediatamente después de su recolección o almacenarlo en condiciones controladas para evitar la proliferación de organismos indeseados (Gutiérrez-Miceli et al., 2007). Además, su aplicación debe ser monitoreada para evitar la acumulación de sales en suelos sensibles.

2.2 Limitaciones y riesgos potenciales (e.g., salinidad, patógenos)

2.2.1 Variabilidad en la calidad y composición del lixiviado

Uno de los principales desafíos del uso del lixiviado como biofertilizante es la variabilidad en su calidad y composición, que depende de los sustratos utilizados, las condiciones del proceso de vermicompostaje y el manejo del sistema (Kaur, 2020; Robatjazi, 2023). Las diferencias en la concentración de nutrientes y microorganismos pueden afectar la eficacia del lixiviado y su capacidad para satisfacer las necesidades específicas de diferentes cultivos. En algunos casos, el contenido nutricional puede no ser suficiente, lo que requiere la combinación del lixiviado con otros fertilizantes para garantizar una nutrición adecuada (Jakubus & Michalak-Oparowska, 2022).

a) Riesgo de acumulación de sales y metales pesados

El lixiviado puede contener sales y metales pesados en concentraciones que, si no se controlan adecuadamente, podrían afectar la salud del suelo y de las plantas. La acumulación

de sales, especialmente en suelos sensibles, puede limitar la absorción de agua por las plantas, provocando síntomas de estrés hídrico (Lv et al., 2016). Por otro lado, aunque las lombrices contribuyen a reducir los metales pesados en los residuos mediante su acumulación en los tejidos, su presencia residual en el lixiviado sigue siendo un riesgo potencial (Mohee & Soobhany, 2014). Es crucial analizar regularmente la calidad del lixiviado para prevenir problemas ambientales y garantizar su seguridad en aplicaciones agrícolas.

b) Requerimientos logísticos y económicos

El manejo eficiente del lixiviado implica ciertos retos logísticos. La necesidad de recolectarlo y utilizarlo rápidamente para evitar la pérdida de nutrientes y microorganismos activos puede limitar su almacenamiento y transporte a largo plazo (Lv et al., 2016). Además, la producción de lixiviado en sistemas grandes requiere infraestructura adecuada para evitar problemas como la fermentación no deseada y la proliferación de patógenos.

Desde un punto de vista económico, aunque el uso del lixiviado reduce la dependencia de fertilizantes químicos, su producción y manejo pueden implicar costos más altos debido a la necesidad de infraestructura especializada y monitoreo constante (Robatjazi, 2023). Sin embargo, en contextos locales donde se dispone de residuos orgánicos abundantes y accesibles, los sistemas de vermicompostaje pueden ser una alternativa rentable y sostenible.

c) Recomendaciones para un uso eficiente

Para mitigar los riesgos asociados al lixiviado, se recomienda un monitoreo constante de su composición y aplicación, adaptando su uso a las condiciones específicas de cada tipo de cultivo y suelo (Sengupta et al., 2023). También es importante llevar a cabo pruebas locales para ajustar las dosis y evitar efectos adversos, como la acumulación de sales. La combinación del lixiviado con otras enmiendas orgánicas o fertilizantes puede optimizar su eficacia y mejorar la sostenibilidad de su uso a largo plazo.

2.3 Sustratos Orgánicos para Vermicompostaje

2.3.1 Características de los sustratos ideales

Para que el vermicompostaje sea eficiente, es fundamental utilizar sustratos con una relación equilibrada de carbono y nitrógeno (C/N), cercana a 25:1 o 30:1, y ricos en materia orgánica fácilmente descomponible (Thirunavukkarasu et al., 2023). Además, deben mantener la

humedad adecuada y favorecer la actividad de las lombrices y microorganismos, sin producir condiciones tóxicas o anaeróbicas.

2.3.2 Tipos comunes de sustratos: gallinaza, estiércol de ganado, restos alimenticios

La gallinaza es un sustrato con alto contenido de nitrógeno, lo que la hace valiosa para acelerar la descomposición orgánica, aunque su alto contenido de amoníaco puede requerir mezclas con otros materiales para evitar toxicidad (Kaur, 2020). El estiércol de ganado, por su parte, aporta nutrientes esenciales y microorganismos beneficiosos, proporcionando condiciones favorables para la actividad de las lombrices. Los restos alimenticios son ricos en nitrógeno y carbono, pero deben controlarse para evitar la proliferación de patógenos y malos olores (Lv et al., 2016). Estos tres sustratos, usados de forma combinada, generan vermicompost de alta calidad al complementar sus propiedades químicas y biológicas.

2.3.3 Efecto de diferentes sustratos en la calidad del vermicompost y lixiviado.

La calidad del vermicompost y del lixiviado depende del tipo de sustrato empleado. La gallinaza aporta altos niveles de nitrógeno, mejorando el crecimiento inicial de las plantas, pero puede acidificar el suelo si no se gestiona adecuadamente (Robatjazi, 2023). El estiércol de ganado, con su equilibrio de nutrientes y materia orgánica, genera vermicompost ideal para mejorar la estructura del suelo a largo plazo. Los restos alimenticios, aunque efectivos en la descomposición rápida, requieren una gestión cuidadosa para evitar contaminación (Thirunavukkarasu et al., 2023). La combinación de estos sustratos permite obtener lixiviados ricos en nutrientes y microorganismos que promueven el crecimiento vegetal y la salud del suelo.

2.4 Los Tres Sustratos Orgánicos Evaluados en la Investigación

2.4.1 Sustrato A, gallinaza: Composición y características relevantes

La gallinaza es un sustrato rico en nitrógeno y fósforo, lo que la convierte en un excelente fertilizante orgánico. Contiene altos niveles de amoníaco, proteínas y minerales esenciales, pero su aplicación directa puede ser perjudicial debido a la alta concentración de sales y posibles patógenos (Kaur, 2020). Por esta razón, se recomienda su tratamiento mediante vermicompostaje, que reduce la toxicidad y estabiliza los nutrientes. Además, su uso en combinación con otros residuos mejora la eficiencia del proceso, proporcionando un vermicompost con alta concentración de nitrógeno asimilable (Lv et al., 2016).

2.4.2 Sustrato B, estiércol de ganado: Composición y características relevantes

El estiércol de ganado es uno de los sustratos más utilizados en el vermicompostaje debido a su equilibrio entre materia orgánica y nutrientes esenciales. Contiene microorganismos beneficiosos que aceleran la descomposición y mejoran la salud del suelo (Thirunavukkarasu et al., 2023). Además, aporta una combinación balanceada de nitrógeno, fósforo y potasio, así como carbono necesario para mantener una relación C/N adecuada en los sistemas de vermicompostaje (Robatjazi, 2023). Este sustrato también favorece la proliferación de lombrices, ya que su textura y contenido nutricional crean un entorno propicio para su crecimiento.

2.4.3 Sustrato C, residuos alimenticios: Composición y características relevantes

Los restos alimenticios contienen altos niveles de nitrógeno y compuestos orgánicos fácilmente degradables. Incluyen frutas, verduras, cáscaras y otros residuos que, en sistemas de vermicompostaje, son rápidamente procesados por lombrices y microorganismos (Kaur, 2020). Sin embargo, el uso exclusivo de este tipo de sustrato puede generar problemas de acidez y fermentación, por lo que es necesario combinarlo con materiales más estructurados, como el estiércol (Lv et al., 2016). La incorporación de restos alimenticios permite producir vermicompost con alta diversidad microbiana, beneficiosa para la salud del suelo.

2.4.4 Criterios para la selección de estos sustratos

La elección de sustratos para el vermicompostaje depende de varios factores, como la disponibilidad local, el contenido de nutrientes y la facilidad de manejo. Es fundamental mantener un equilibrio entre nitrógeno y carbono, evitando problemas de exceso de amoníaco o acidez (Thirunavukkarasu et al., 2023). Además, los sustratos deben ser libres de contaminantes y estar lo suficientemente fragmentados para facilitar su descomposición. La combinación de gallinaza, estiércol de ganado y restos alimenticios es ideal, ya que aporta una mezcla balanceada de nutrientes y mejora la textura del vermicompost, maximizando la calidad del producto final y minimizando los tiempos de procesamiento (Robatjazi, 2023).

2.5 Factores que Afectan la Producción de Lixiviado

2.5.1 Relación C/N (carbono/nitrógeno) en los sustratos

La proporción de carbono y nitrógeno (C/N) es esencial para asegurar un proceso de vermicompostaje eficiente. Una relación equilibrada (entre 25:1 y 30:1) facilita la actividad

microbiana y la conversión de materia orgánica, generando lixiviado de alta calidad. Si los sustratos tienen un exceso de nitrógeno, como la gallinaza, puede liberarse amoníaco, afectando la salud de las lombrices y la calidad del lixiviado (Rehman et al., 2023). Por otro lado, una proporción alta de carbono ralentiza la descomposición, disminuyendo la productividad del sistema (Vyas et al., 2022).

2.5.2 Temperatura, humedad y aireación

La temperatura óptima para la actividad de las lombrices, especialmente *Eisenia fetida*, se encuentra entre 15°C y 30°C. Fuera de este rango, las lombrices se vuelven menos activas o mueren, afectando la producción del lixiviado (Keniya et al., 2023). La humedad adecuada (60-80%) permite que las lombrices respiren a través de la piel y garantiza la actividad microbiana. Sin embargo, el exceso de agua puede generar lixiviados de baja calidad y condiciones anaeróbicas, perjudicando la eficiencia del sistema (Jha et al., 2021). La aireación constante es clave para evitar la acumulación de gases como metano o amoníaco.

2.5.3 pH del medio

El pH ideal para el vermicompostaje y la producción de lixiviado está entre 6.5 y 7.5. Un pH fuera de este rango puede afectar negativamente la salud de las lombrices y la actividad de los microorganismos. Materiales ácidos, como ciertos restos de alimentos, deben mezclarse con otros sustratos más neutros, como el estiércol de ganado, para mantener el equilibrio del sistema (Aslam et al., 2019).

2.5.4 Tiempo de procesamiento y frecuencia de riego

El tiempo necesario para la producción de vermicompost y lixiviado varía según las condiciones ambientales y los tipos de sustrato utilizados. El riego constante es esencial para mantener la humedad adecuada, pero el exceso puede arrastrar nutrientes, reduciendo la calidad del lixiviado. En climas cálidos, es necesario aumentar la frecuencia de riego para compensar la evaporación, mientras que en climas húmedos debe evitarse el exceso de agua (Keniya et al., 2023).

2.5.5 Densidad de lombrices por unidad de sustrato

La densidad de lombrices también influye en la producción de lixiviado. Una alta densidad incrementa la eficiencia del proceso, pero puede generar estrés y competencia si los recursos son insuficientes. Se recomienda mantener una proporción adecuada entre lombrices y

sustrato para evitar la sobrepoblación y garantizar una producción constante de lixiviado de calidad (Vyas et al., 2022).

2.6 Metodologías para la Medición del Lixiviado

2.6.1 Métodos para la recolección del lixiviado

Para evitar la contaminación cruzada y asegurar una recolección eficiente, el lixiviado se almacena en recipientes herméticos después de su drenaje desde los sistemas de vermicompostaje. En algunas investigaciones, se emplean bandejas recolectoras debajo de los lechos de vermicompost, diseñadas para recoger el líquido sin alterar su composición (Kenya et al., 2023). Este método permite una medición más precisa del volumen producido y facilita su posterior análisis en el laboratorio. La frecuencia de recolección depende de las condiciones ambientales; en climas cálidos y húmedos, se recomienda recolectar diariamente para evitar la fermentación del lixiviado.

2.6.2 Análisis físico-químico del lixiviado

El análisis del lixiviado implica la medición de parámetros como pH, conductividad eléctrica, y concentración de macro y micronutrientes. Estos análisis se realizan utilizando técnicas estandarizadas, como la espectrofotometría y la cromatografía iónica, para determinar los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, y otros elementos esenciales (Rehman et al., 2023). Además, se evalúa la presencia de microorganismos beneficiosos mediante métodos microbiológicos que identifican bacterias y hongos promotores del crecimiento vegetal. Estos análisis proporcionan una visión detallada de la calidad del lixiviado, permitiendo ajustar su aplicación según las necesidades del cultivo.

2.6.3 Variables de respuesta: Rendimiento y calidad del lixiviado

Las variables de respuesta más comunes en la medición del lixiviado son el volumen producido y su calidad en términos de nutrientes y actividad biológica. Estudios recientes han demostrado que la composición del sustrato influye significativamente en estas variables, con sustratos ricos en nitrógeno generando lixiviados más concentrados en nutrientes esenciales (Jha et al., 2021). Además, la calidad del lixiviado se evalúa en función de su impacto en el crecimiento de plantas, utilizando bioensayos que miden parámetros como la altura, biomasa, y producción de frutos en cultivos tratados con lixiviado.

2.7 Estudios Previos y Evidencia Empírica

2.7.1 Comparación de investigaciones que evalúan sustratos diversos

Diversos estudios han demostrado la efectividad del vermicompostaje al emplear diferentes sustratos, como estiércol, restos de alimentos y residuos vegetales. La literatura reciente señala que la combinación de sustratos ricos en nitrógeno, como la gallinaza, con otros ricos en carbono, como restos vegetales, mejora significativamente la calidad del vermicompost y del lixiviado (Aslam et al., 2019; Vyas et al., 2022). Esta combinación también acelera el proceso de descomposición, permitiendo obtener lixiviado con mayores concentraciones de nutrientes disponibles para las plantas.

2.7.2 Resultados sobre la eficiencia de diferentes sustratos en la producción de lixiviado

La producción de lixiviado depende del tipo de sustrato empleado. Estudios han demostrado que sustratos con alto contenido de nitrógeno, como el estiércol de pollo, generan lixiviados más concentrados en nitratos y fosfatos, útiles para cultivos de rápido crecimiento (Keniya et al., 2023). Por otro lado, los residuos alimenticios producen lixiviados con una mayor diversidad microbiana, lo que fortalece la salud del suelo y su capacidad para resistir enfermedades (Rehman et al., 2023). Sin embargo, los sustratos con alta salinidad pueden afectar negativamente la calidad del lixiviado, resaltando la importancia de seleccionar y combinar adecuadamente los materiales.

2.7.3 Casos de éxito en producción comercial de lixiviado de lombriz

La producción comercial de lixiviado ha ganado popularidad debido a su uso eficiente en la agricultura orgánica y sostenible. Empresas y cooperativas agrícolas han implementado sistemas de vermicompostaje a gran escala utilizando residuos locales, como estiércol y restos de alimentos, logrando reducir costos de fertilización y mejorar la productividad agrícola (Jha et al., 2021). En estudios de campo, la aplicación regular de lixiviado ha demostrado aumentar la productividad de cultivos como tomates y lechugas, mejorando la absorción de nutrientes y reduciendo la necesidad de pesticidas (Vyas et al., 2022). Estos casos evidencian el potencial del lixiviado como un biofertilizante rentable y ecológico.

2.8 Impacto Ambiental y Económico del Uso del Lixiviado

2.8.1 Reducción de residuos mediante vermicompostaje

El vermicompostaje es una solución sostenible que permite convertir residuos orgánicos en productos de alto valor, como el lixiviado. Este proceso disminuye la cantidad de residuos que llegan a los vertederos, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente metano y dióxido de carbono, que se generan durante la descomposición anaeróbica en los rellenos sanitarios (Rehman et al., 2023). Además, la integración del vermicompostaje en sistemas agrícolas contribuye a la economía circular, al reciclar los residuos en insumos útiles para la producción de alimentos.

2.8.2 Ahorro de insumos químicos en agricultura

El lixiviado actúa como un biofertilizante que reduce la necesidad de fertilizantes químicos, los cuales, aunque efectivos, generan altos costos y tienen impactos ambientales negativos debido a la contaminación del suelo y del agua (Keniya et al., 2023). Su uso regular en cultivos ha demostrado mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que se traduce en un mejor rendimiento agrícola sin recurrir a productos sintéticos (Vyas et al., 2022). Además, el lixiviado aporta microorganismos que promueven la salud del suelo y protegen las plantas de enfermedades.

2.8.3 Rentabilidad del lixiviado como biofertilizante

Desde una perspectiva económica, la producción y comercialización de lixiviado representa una alternativa rentable para agricultores y productores. El bajo costo de los materiales de entrada, como estiércol o residuos alimenticios, combinado con la alta demanda de productos orgánicos, permite generar ingresos adicionales (Rehman et al., 2023). A nivel comercial, el vermicompostaje requiere menor inversión en infraestructura en comparación con otros procesos de tratamiento de residuos, y los beneficios ambientales asociados pueden ser aprovechados para acceder a incentivos gubernamentales o programas de agricultura sostenible (Vyas et al., 2022).

El uso de lixiviado también permite reducir gastos operativos en la compra de fertilizantes y pesticidas, ya que proporciona una fuente natural de nutrientes y protección biológica. Además, los sistemas de vermicompostaje a gran escala contribuyen a la creación de empleos

en las áreas rurales, fomentando el desarrollo local mediante la producción sostenible (Keniya et al., 2023).

Capítulo III.

Metodología

3 Materiales y métodos

3.1 Ubicación

Bécal, Calkini, Campeche.

3.2 Macrolocalización

El experimento se llevará a cabo en C. 24 217, Pablo García, 24930 Bécal, Campeche.

3.3 Microlocalización

El sitio experimental está ubicado en el exterior, está cubierto con una malla sombra del 90% que proporciona condiciones controladas de luz y temperatura.

3.4 Tipo de Lombriz

Lombriz roja californiana eisenia Foetida, obtenida de criaderos ubicados en el Instituto Tecnológico Superior de Calkini.

3.5 Tipos de sustratos orgánicos

- Estiercol de ganado
- Estiercol de gallina
- Residuos de cocina

3.6 Selección y fuente de obtencion

El estiércol de gallina y ganado se obtuvo del domicilio particular ubicado en Bécal, Campeche, en C. 41 170, San Diego, 24936 Bécal, Camp. Los residuos de cocina fueron

recolectados en el mercado municipal, asegurando que sean frescos y libres de contaminantes.

3.7 Diagrama de la secuencia experimental

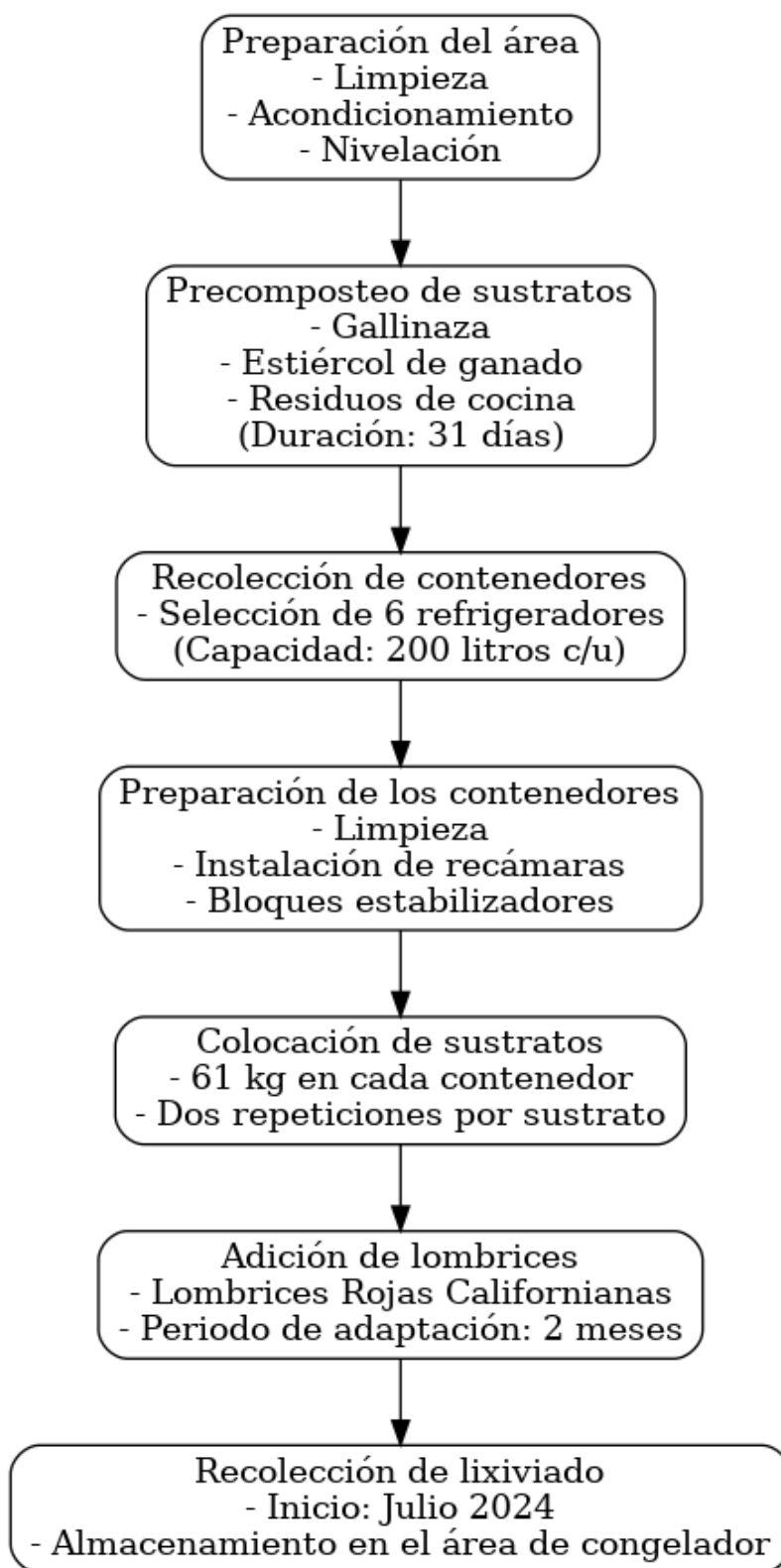


Ilustración 1. Diagrama de secuencia experimental

3.8 Materiales

1. Refrigeradores con capacidad de 200L
2. Recamaras viejas de bicicleta
3. Block de hormigon
4. Malla sombra al 90%
5. Termometro 4 en 1 para monitorear diversas variable (Temperatura, pH, Humedad y nutrientes)
6. Lombrices Eisenia Foetida
7. 3 tipos de Sustratos (gallinaza, estiercol de ganado, residuos de cocina)

3.9 Métodos

Preparación del área, limpieza y acondicionamiento

Se inició con la selección y preparación del espacio destinado al proceso. Este paso incluyó una limpieza exhaustiva para eliminar cualquier residuo o impureza que pudiera interferir con el compostaje. Posteriormente, se acondicionó el área asegurando una superficie nivelada y adecuada para la instalación de los contenedores, garantizando condiciones óptimas de ventilación y accesibilidad para el manejo de los materiales.

Precomposteo de cada sustrato: gallinaza, estiércol de ganado y residuos de cocina

Cada tipo de sustrato, gallinaza, estiércol de ganado y residuos de cocina, fue sometido a un proceso de degradación que duró aproximadamente 31 días. Este proceso permitió la descomposición parcial de los materiales, mejorando su estructura y reduciendo posibles patógenos. Durante el proceso, se controlaron factores como la temperatura, la humedad y la aireación para asegurar una descomposición homogénea y eficiente de cada sustrato.

Recolección de Contenedores

Se procedió a la recolección de los contenedores necesarios para el compostaje. En este caso, se utilizaron refrigeradores con una capacidad de 200 litros cada uno. Se seleccionaron seis refrigeradores para permitir la realización de dos repeticiones por cada tipo de sustrato precompostado, asegurando así la consistencia y fiabilidad de los resultados obtenidos.

Preparación de los Contenedores

Los refrigeradores seleccionados fueron limpiados minuciosamente para eliminar cualquier residuo previo que pudiera afectar el compostaje. Posteriormente, se instalaron recámaras en el interior de cada contenedor para facilitar el drenaje de líquidos, evitando la acumulación de humedad excesiva que podría perjudicar el proceso de descomposición y por supuesto el almacenamiento del lixiviado. Además, se colocaron bloques en cada esquina de los refrigeradores para mantenerlos rectos y estables durante su uso, garantizando una distribución uniforme de los sustratos y un manejo seguro de los contenedores.

Sustrato precompostado en los contenedores

A cada contenedor se le agregaron 61 kg de sustrato previamente precompostado y listo para su uso. Con un total de cinco contenedores, se realizaron dos repeticiones por cada tipo de sustrato (gallinaza, estiércol de ganado y residuos de cocina). Esta distribución permitió una comparación eficiente de los diferentes sustratos en condiciones similares, facilitando el análisis posterior de los resultados obtenidos en el proceso de compostaje.

Introducción de lombrices rojas californianas

A cada contenedor se le adicionaron Lombrices Rojas Californianas (*Eisenia fetida*), conocidas por su eficacia en el proceso de vermicompostaje. Esta acción se repitió de manera periódica durante aproximadamente dos meses para asegurar la adaptación de las lombrices al nuevo entorno y sustrato. Las lombrices desempeñan un papel crucial en la descomposición orgánica, mejorando la calidad del compost y acelerando el proceso de biodegradación.

Recolección del lixiviado

Después de completar el periodo de adaptación de dos meses, a partir de julio de 2024, se inició la recolección del lixiviado generado durante el proceso de compostaje. El lixiviado, que es el líquido resultante de la descomposición de los sustratos, se almacenó en la parte del contenedor que normalmente albergaba el congelador. Este líquido puede ser utilizado como un fertilizante líquido rico en nutrientes para diversas aplicaciones agrícolas, contribuyendo al ciclo de reciclaje de nutrientes dentro del sistema de compostaje.

3.10 Variables

1. Variables independientes:

Tipos de sustratos (estiércol de ganado, gallinaza, residuos alimenticios).

2. Variables dependientes:

Contenido de N, P y K (mg/L).

3. Variables de control:

Temperatura: 25-30°C.

Humedad relativa: 60-70%.

Relación carbono/nitrógeno inicial del sustrato (~30:1).

3.11 Muestreos

Los lixiviados serán recolectados mensualmente durante 6 meses

Se realizarán tres réplicas por tratamiento.

3.12 Diseño experimental

El diseño será completamente al azar con tres tratamientos y dos repeticiones.

Tabla 1. Distribucion de tratamientos

Tratamiento	Sustrato	Réplicas
T1	Estiércol de ganado	2
T2	Gallinaza	2
T3	Residuos alimenticios	1

3.13 Análisis estadístico

1. Producción de lixiviado:

- Análisis de varianza (ANOVA) para comparar la cantidad de lixiviado entre tratamientos.
- Prueba de Tukey para análisis post-hoc.

2. Contenido de N, P y K:

- Análisis de regresión para determinar la cinética de los nutrientes.
- ANOVA para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

3. Software:

- Se utilizará software estadístico como SPSS o R para realizar los análisis.

3.14 Resultados esperados

Los resultados permitirán identificar el sustrato con mayor potencial para la producción de lixiviado de calidad, estableciendo recomendaciones para mejorar la eficiencia del proceso de vermicompostaje.

Capítulo IV.

Resultados y discusión

4. Resultados y discusión en sustrato bovino

4.1 Análisis detallado de los datos de nitratos en sustrato de estiércol de bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación, se presenta un análisis de los datos de concentración de nitratos (en ppm) en lixiviados obtenidos mensualmente de un sustrato de estiércol de bovino, utilizado para alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). Se tienen dos Refrigeradores 1 y 2 , que podrían corresponder a dos tratamientos, dos lotes de estiércol o dos tipos de acondicionamiento del sustrato. Los valores se muestran a lo largo de 6 meses:

Tabla 2. Nitratos en partes por millón (ppm) obtenidos de 6 muestreos mensuales de los refrigeradores 1 y 2 (T1R1 y T1R2) con sustrato bovino de Becál

Refrigerador (Ref)	Mes	Nitratos (ppm)
1	1	165
1	2	125
1	3	63.5
1	4	53.5
1	5	47
1	6	16.5
2	1	235
2	2	135
2	3	61.5
2	4	69
2	5	63
2	6	24

4.1.1 Interpretación de los valores de nitratos

Tendencia general decreciente:

- a) En ambos casos (Refrigerador 1 y Refrigerador 2) se observa una disminución marcada de los niveles de nitratos a lo largo de los 6 meses.
- b) Refrigerador 1 se pasa de 165 ppm (mes 1) a 16.5 ppm (mes 6).
- c) Refrigerador 2 se pasa de 235 ppm (mes 1) a 24 ppm (mes 6).

Esta bajada de nitratos suele ser habitual en procesos de vermicompostaje o vermicultura, donde las lombrices y los microorganismos presentes en el sustrato consumen nitrógeno en diversas formas, incluyendo el nitrógeno inorgánico (nitratos). Al mismo tiempo puede ocurrir lixiviación (pérdida) de nitratos con el drenaje del agua.

1. Diferencias entre Refrigerador 1 y Refrigerador 2:

Inicialmente, el Refrigerador 2 presenta niveles más elevados de nitratos (235 ppm) frente a 165 ppm en Ref 1. Esta diferencia podría atribuirse a:

- a) Distinto origen o estado de maduración del estiércol bovino.
- b) Diferencias en la carga de nitrógeno inicial debido a la dieta del ganado, el tiempo de almacenamiento del estiércol o su humedad.
- c) Variaciones en el manejo (aireación, volteo, riego) que afecten la mineralización y nitrificación.

Aun así, a partir del mes 3 los valores de ambas referencias convergen en un rango cercano a 60-70 ppm, continuando a valores finales más bajos (16.5–24 ppm) en el mes 6.

4.1.2 Discusión de las causas del descenso de nitratos

1. Actividad microbiana y de lombrices:

- Durante el proceso de vermicompostaje, la población microbiana se incrementa y se estabiliza. Los microorganismos consumen formas de nitrógeno (incluidas sales de amonio y nitratos) para su metabolismo y para formar parte de su biomasa celular (Edwards y Bohlen, 1996).

- Las lombrices rojas californianas también contribuyen a la descomposición de la materia orgánica y favorecen la formación de compuestos húmicos, lo que puede influir en la retención y transformación del nitrógeno (Atiyeh et al., 2000).

2. Transformaciones bioquímicas:

- **Nitrificación:** el amonio (NH_4^+) procedente de la descomposición de la materia orgánica se convierte en nitrito (NO_2^-) y, posteriormente, en nitrato (NO_3^-). Este proceso es llevado a cabo principalmente por bacterias nitrificantes de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.
- **Desnitrificación:** en condiciones de menor oxígeno o elevada actividad microbiana, los nitratos pueden convertirse en N_2O (óxido nitroso) o en N_2 (nitrógeno molecular), liberándose a la atmósfera (Hawkes, 1992).
- **Asimilación microbiana y humificación:** parte de los nitratos es asimilada por microorganismos, formando proteínas y compuestos orgánicos nitrogenados. Además, una fracción del nitrógeno se va inmovilizando en sustancias húmicas.

3. Pérdida por lixiviación:

Dado que se recogen lixiviados mensualmente, es muy probable que el agua de riego o la humedad natural arrastre parte de los nitratos. La cantidad de nitrato que se “lava” o lixivía depende del volumen de agua que pase a través del sustrato, así como de la porosidad y del tiempo de residencia del agua en el material (Brinton, 2000).

3. Importancia para la producción de vermicompost y lombrices

- **Calidad del vermicompost:** Un sustrato que progresivamente reduce su contenido de nitratos puede generar un vermicompost más estable. Al final del proceso, la mayoría del nitrógeno se encuentra en formas orgánicas estables (proteínas microbianas, ácidos húmicos) y/o en menor concentración de nitrógeno inorgánico, lo cual suele ser indicativo de una mayor madurez del producto (Bernal et al., 1998).
- **Salubridad para las lombrices:** Niveles muy elevados de nitratos o amonio libre en la fracción líquida pueden resultar tóxicos para las lombrices o generar condiciones poco favorables (pH muy bajo o muy alto, por ejemplo). Sin embargo, una disminución progresiva indica la estabilización del sustrato (Edwards, 1998).

- **Uso del lixiviado como fertilizante líquido (“té de lombriz”):** El lixiviado recogido podría emplearse como abono líquido; sin embargo, conviene analizar no solo nitratos sino también fósforo, potasio, pH y conductividad eléctrica, para asegurar que sea beneficioso para las plantas y que no presente un exceso de sales (Atiyeh et al., 2002).

4.2 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de fósforo en lixiviados de sustrato de estiércol bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación se presentan los valores de fósforo (en ppm) medidos mes a mes en los lixiviados provenientes de un sustrato de estiércol de bovino utilizado para la cría de lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). Se muestran dos conjuntos de datos (posiblemente dos réplicas, tratamientos o lotes diferentes), cada uno con mediciones durante 6 meses:

Tabla 3. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviados de estiércol bovino para vermicultura (primer conjunto de datos)

Mes	Fósforo (ppm)
1	15
2	9.5
3	12.9
4	8.9
5	8.4
6	11.4

Tabla 4. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviados de estiércol bovino para vermicultura (segundo conjunto de datos)

Mes	Fósforo (ppm)
1	15
2	15
3	10.6
4	15
5	7.9
6	12.2

4.2.1 Interpretación de los valores de fósforo

1. Variaciones mensuales notables:

En ambos conjuntos, los valores de fósforo oscilan de manera no lineal a lo largo de los 6 meses.

En el primer conjunto, se aprecia un valor inicial de 15 ppm en el mes 1, una disminución hasta 9.5 ppm en el mes 2, luego un aumento a 12.9 ppm (mes 3), seguida de altibajos (8.9, 8.4) y finalmente un repunte a 11.4 ppm en el mes 6.

En el segundo conjunto, se inician con 15 ppm en el mes 1 y se repiten los 15 ppm en el mes 2; luego baja a 10.6 ppm en el mes 3 y vuelve a subir a 15 ppm en el mes 4, cayendo a 7.9 ppm en el mes 5 y cerrando en 12.2 ppm al mes 6.

2. Patrón general de “subidas y bajadas”:

Este comportamiento de *fluctuaciones* mensuales es relativamente común en la dinámica del fósforo dentro de procesos de compostaje y vermicompostaje.

El fósforo, a diferencia del nitrógeno, tiende a presentar variaciones menos predecibles, pues depende de la solubilización de fosfatos minerales, la inmovilización por parte de microorganismos, la formación de complejos con otros iones (Ca, Mg, Fe, Al) y la liberación de fósforo orgánico durante la degradación de la materia (Atiyeh et al., 2002).

3. Comparación entre los dos conjuntos:

- a) El primer conjunto muestra valores que oscilan entre 8.4 ppm y 15 ppm.
- b) El segundo conjunto presenta un rango de 7.9 ppm hasta 15 ppm.

No hay diferencias tan marcadas entre ambos, pero sí se ve que en el segundo conjunto el fósforo llega en dos ocasiones hasta 15 ppm (mes 1, mes 4), lo que podría reflejar cambios

en el manejo (por ejemplo, humedad, volteos) o diferencias en la composición original del estiércol.

4.2.2 Discusión de la dinámica del fósforo

1. Solubilización y mineralización:

Durante el vermicompostaje, se produce la descomposición de la materia orgánica, liberando parte del fósforo que estaba ligado a estructuras orgánicas (Edwards & Bohlen, 1996).

Las bacterias y hongos, así como las lombrices, participan en la solubilización de compuestos fosfatados, especialmente cuando hay un pH favorable (ligeramente neutro o alcalino) y suficiente humedad (Domínguez y Edwards, 2011).

2. Inmovilización microbiana y complejación química:

Algunos microorganismos inmovilizan el fósforo en sus células para formar parte de su biomasa, disminuyendo la fracción soluble y, por lo tanto, reduciendo los valores detectables en los lixiviados (Bernal et al., 1998).

El fósforo también puede precipitarse o complejarse con cationes como Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} o Mg^{2+} , formando compuestos menos solubles (Woods End Research, 2000).

3. Efecto de los lixiviados y el riego:

Parte del fósforo soluble se puede arrastrar con el agua de riego o la humedad excesiva, contribuyendo a fluctuaciones en los niveles detectados mensualmente.

En algunos sistemas de vermicompostaje se promueve la recolección de estos lixiviados para su uso como fertilizante líquido, aunque la calidad depende no solo del fósforo, sino de otros nutrientes y de la carga microbiana (Atiyeh et al., 2002).

4.2.3 Implicaciones para la producción de vermicompost y el uso de lixiviados

1. Disponibilidad de fósforo para plantas:

El fósforo es un macronutriente esencial que promueve la formación de raíces y el desarrollo temprano de la planta. La presencia de concentraciones de fósforo en el vermicompost o en el lixiviado puede ser beneficiosa, siempre y cuando no haya excesos que provoquen desequilibrios de nutrientes (Atiyeh et al., 2000).

2. Evolución de la madurez del vermicompost:

Un producto orgánico maduro tiende a ofrecer formas de fósforo más estables, bien sea retenidas en complejos húmicos o en formas lentamente solubles, facilitando su liberación gradual a las plantas (Bernal et al., 1998).

Aunque no se observa una tendencia lineal decreciente o creciente, el hecho de que los valores se mantengan en rangos moderados (7.9–15 ppm) es indicativo de una dinámica de estabilización donde la fracción soluble de P puede fluctuar según la etapa de descomposición.

3. Condiciones de manejo y recomendaciones:

Para optimizar la liberación de fósforo, es importante controlar el pH, la humedad y la aireación, favoreciendo la actividad microbiana y la acción de las lombrices.

Un monitoreo integral (pH, relación C/N, conductividad eléctrica, otros macronutrientes) permitirá ajustar el sistema de vermicompostaje y comprender mejor las oscilaciones en los niveles de fósforo

4.3 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de sustrato de estiércol bovino para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación se presentan los valores de potasio (en ppm) medidos mensualmente en el lixiviado (o percolado) proveniente de un sustrato de estiércol de bovino utilizado para la cría de lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). Se observan dos conjuntos de datos (o réplicas/tratamientos), cada uno con mediciones durante 6 meses.

Tabla 5. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de estiércol bovino para vermicultura – Tratamiento 1.

Mes	Potasio (ppm)
1	1650
2	405
3	265
4	1000
5	995
6	355

Tabla 6. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de estiércol bovino para vermicultura – Tratamiento 2.

Mes	Potasio (ppm)
1	2900
2	400
3	265
4	1200
5	1550
6	345

4.3.1 Interpretación de los valores de potasio

1. Variaciones marcadas en la concentración de K:

En el **primer conjunto**, se inicia con 1650 ppm en el mes 1, baja drásticamente a 405 y 265 ppm (meses 2 y 3), luego sube de nuevo alrededor de 1000 ppm en meses 4 y 5, y vuelve a caer a 355 ppm en el mes 6.

En el **segundo conjunto**, el arranque es más alto (2900 ppm en mes 1), desciende notablemente a 400–265 ppm (meses 2 y 3), experimenta un nuevo pico (1200–1550 ppm en meses 4 y 5) y finalmente cae a 345 ppm en el mes 6.

2. Rangos de concentración

Primer conjunto: mínimo de 265 ppm (mes 3) y máximo de 1650 ppm (mes 1).

Segundo conjunto: mínimo de 265 ppm (mes 3) y máximo de 2900 ppm (mes 1).

La diferencia inicial (1650 vs. 2900 ppm) sugiere que el segundo lote o réplica pudo tener un contenido de potasio más elevado en el estiércol original o un mayor grado de solubilización en el momento de la primera medición.

3. Fluctuaciones ascendentes y descendentes (picos):

Es muy común en procesos de vermicompostaje observar subidas y bajadas en la concentración de K soluble. El potasio es un macronutriente muy móvil en el agua (es decir, se disuelve y se lixivia con facilidad).

Estos picos pueden relacionarse con:

- a) **Liberación de potasio** por la descomposición acelerada de la materia orgánica y la solubilización de minerales potásicos.
- b) **Enjuague o arrastre (lixiviación) excesivo** en determinados momentos, por ejemplo si hubo mayor riego o lluvia, que puede hacer caer los niveles de K en el lixiviado en un muestreo posterior.
- c) **Diferencias en la aireación y la humedad** que afectan la actividad microbiana y, con ello, la liberación de nutrientes

4.3.2 Discusión de la dinámica del potasio en vermicultura

1. Papel del potasio en la materia orgánica y la descomposición:

El potasio, a diferencia del nitrógeno y del fósforo, no se integra de manera significativa en estructuras orgánicas de proteínas o ácidos nucleicos; por ello, tiende a permanecer en formas intercambiables y solubles (Brady & Weil, 2008).

Durante la descomposición, el K de la materia orgánica y del estiércol pasa rápidamente a solución, lo que explica los valores elevados en las primeras etapas.

2. Procesos que explican los descensos y repuntes:

Lixiviación: El agua de riego o la humedad excesiva arrastra el potasio soluble. Por ello, se aprecian descensos significativos (por ejemplo, de 1650 a 405 ppm o de 2900 a 400 ppm).

Re-liberación/solubilización: La actividad microbiana y la degradación continuada de la materia orgánica pueden volver a liberar potasio atrapado en la estructura celular de microorganismos y lombrices, provocando los picos (1000, 995, 1200, 1550 ppm) en los meses 4 y 5.

3. Efecto de la acción de las lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*):

Las lombrices aceleran la descomposición de la fracción orgánica y, por tanto, pueden incrementar la disponibilidad de nutrientes (Atiyeh et al., 2000).

En el proceso digestivo, parte de los nutrientes se liberan y pasan a la fracción soluble o se incorporan en la biomasa de la lombriz y de los microorganismos asociados (Domínguez & Edwards, 2011).

4. Importancia del control de la humedad y manejo del sustrato:

Una humedad equilibrada permite la acción microbiana y la movilidad del potasio; si el sistema se satura en exceso, la lixiviación puede ser muy alta y se pierden nutrientes (Griffin & Hutchinson, 2007).

Es posible que, en los periodos de mayor adición de agua o mayor precipitación, se registren descensos notables en los valores de K. Posteriormente, en meses con un manejo más estable, el K vuelve a repuntar tras la descomposición adicional.

4.3.3 Conclusiones generales de NPK en sustrato de estiércol bovino

Nitratos

1. Disminución progresiva y predecible de nitratos:

Los datos muestran un patrón típico de estabilización del nitrógeno en sistemas de vermicultura. La presencia de lombrices rojas californianas y la actividad microbiológica

promueven la transformación y asimilación de los nitratos, reduciendo su concentración en los lixiviados.

2. Diferencias iniciales entre Ref 1 y Ref 2:

La mayor concentración inicial en Ref 2 (235 ppm vs. 165 ppm) sugiere que podrían existir diferencias en el manejo o la composición del estiércol. Aun así, al final del periodo (mes 6), ambos llegan a concentraciones bajas (16.5–24 ppm).

3. Estabilidad del sustrato y calidad del vermicompost:

La reducción significativa de los nitratos indica que el sustrato se ha estabilizado a lo largo de los 6 meses, lo cual es beneficioso para su posterior uso como enmienda orgánica. Un vermicompost maduro normalmente presenta menor riesgo de generar excesos de nitrógeno inorgánico y mayor contenido de compuestos húmicos.

4. Recomendaciones prácticas:

Monitorear no solo nitratos sino también otros parámetros (pH, CE, relación C/N, materia orgánica) para asegurar una calidad óptima del vermicompost y del lixiviado.

Mantener registros de la humedad y la aireación, influyen directamente en la nitrificación, desnitrificación y lixiviación.

Ajustar la alimentación de las lombrices y el riego para evitar excesos o deficiencias de nitratos, lo cual podría afectar tanto la salud de las lombrices como la calidad del producto final.

Fósforo

1. Fluctuaciones normales en la concentración de fósforo:

Los datos muestran un patrón de variaciones mensuales que se ajusta a lo descrito en la literatura sobre vermicompostaje, donde la mineralización, inmovilización y complejación del fósforo dan lugar a subidas y bajadas en su fracción soluble.

2. Intervalos similares en ambos conjuntos de datos:

A pesar de ligeras diferencias, ambos conjuntos reflejan valores que oscilan entre ~8 ppm y 15 ppm de fósforo, indicando que el proceso de vermicultura mantiene concentraciones

razonables para que el lixiviado se pueda considerar un aporte de fósforo útil, sin llegar a excesos perjudiciales.

3. Importancia de un monitoreo continuo:

Para entender cabalmente la disponibilidad de fósforo en el vermicompost final y en sus lixiviados, es fundamental complementar estos datos con otros parámetros (pH, nitrógeno total, relación C/N, presencia de metales, etc.). Así se obtendrá una visión integral de la calidad del sustrato y de su evolución mes a mes.

4. Efecto positivo en la producción de lombrices y la calidad del vermicompost:

La presencia de fósforo en concentraciones moderadas beneficia a la biomasa microbiana y a las lombrices, y contribuye a un vermicompost equilibrado en nutrientes, apto para ser aplicado en agricultura y horticultura.

Potasio

1. Altas concentraciones iniciales y marcadas oscilaciones:

En ambos conjuntos se evidencia un contenido de potasio inicialmente elevado (1650–2900 ppm), típico de estiércoles con alta solubilidad de K.

La caída drástica en los primeros meses (hasta ~265–400 ppm) y los repuntes en meses medios (4 y 5) son coherentes con la liberación y arrastre del potasio soluble.

2. Comportamiento típico en procesos de vermicompostaje:

El potasio es un nutriente altamente móvil que suele fluctuar en función de la lixiviación y la liberación desde la materia orgánica en descomposición.

Las lombrices y los microorganismos contribuyen a mineralizar la materia orgánica, liberando parte de los nutrientes atrapados.

3. Implicaciones para la calidad del vermicompost y el uso de lixiviados:

Niveles elevados de potasio pueden ser beneficiosos como fertilizante, sobre todo en cultivos que demandan altas cantidades de este macronutriente (por ejemplo, algunos cultivos hortícolas).

Se debe vigilar la conductividad eléctrica del lixiviado y del vermicompost, ya que concentraciones muy altas de sales de K (y otros elementos) podrían afectar negativamente la germinación de semillas o la tolerancia salina de ciertas plantas (Bernal et al., 1998).

Un potasio moderado a alto en el lixiviado puede utilizarse como “té de lombriz” para fertirriego, siempre y cuando se controlen parámetros como pH, CE, y la relación con otros nutrientes.

4. Recomendaciones finales:

Monitorear integralmente el sistema: además de K, es clave medir nitrógeno, fósforo, pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. Ajustar la adición de agua o riego, evitando la lixiviación excesiva y, a la vez, garantizando la humedad necesaria para la actividad microbiana y de las lombrices.

5. Resultados y discusión en sustrato de gallinaza

5.1 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de nitratos en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación se presentan los valores de nitratos (en ppm) en lixiviados de un sustrato elaborado a partir de **gallinaza de traspatio**. El objetivo es alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*) y obtener muestras mensuales de lixiviado. Se observan dos conjuntos de datos (Ref 3 y Ref 4), cada uno medido durante 6 meses:

Tabla 7. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.

Mes	Nitratos (ppm)
1	205
2	205
3	305
4	145
5	265
6	265

Tabla 8. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.

Mes	Nitratos (ppm)
1	205
2	205
3	175
4	155
5	280
6	280

5.1.1 Interpretación de los valores de nitratos

1. Niveles iniciales similares (mes 1 y 2)

Ambos refrigeradores 3 y 4 empiezan con la misma concentración de nitratos en los primeros dos meses (205 ppm).

Esto sugiere que el punto de partida del sustrato (gallinaza y sus condiciones iniciales de humedad, pH, población microbiana, etc.) era muy parecido, o que se aplicó un manejo similar durante ese periodo.

2. Evolución en Refrigerador 3

Mes 3: Se observa un incremento notable hasta 305 ppm. Un aumento de nitratos puede obedecer a:

- Mayor nitrificación (bacterias que convierten amonio en nitrito y luego en nitrato).
- Liberación adicional de nitrógeno proveniente de la gallinaza, que es típicamente rica en proteínas y compuestos nitrogenados.

Mes 4: Hay un descenso drástico a 145 ppm. Esto podría explicarse por:

- **Lixiviación:** El nitrato (NO_3^-) es muy móvil en presencia de agua.
- **Desnitrificación:** Bajo condiciones de menor oxígeno, parte del nitrato puede convertirse en N_2O o N_2 (liberándose a la atmósfera).
- **Inmovilización microbiana:** Los microorganismos consumen nitratos para formar nueva biomasa.

Mes 5 y 6: Repunte hasta 265 ppm, estabilizándose en torno a un nivel medio-alto. Podría deberse a:

- Nueva liberación de nitrógeno orgánico conforme avanza la descomposición.
- Control de la humedad o disminución de la lixiviación.

3. Evolución en Refrigerador 4

Después de iniciar en 205 ppm en los primeros dos meses, Ref 4 desciende gradualmente (175 ppm en mes 3 y 155 ppm en mes 4), lo que sugiere:

- Un lavado o lixiviado más pronunciado en esta réplica.
- Posibles diferencias en la aireación o en la actividad microbiana.

Mes 5 y 6: Se aprecia un repunte hasta 280 ppm. Este pico al final suele relacionarse con:

- Una etapa de estabilización en la descomposición de la gallinaza, donde se siguen liberando nitratos.
- Posible reducción de la pérdida de nitrato por menor volumen de agua o por condiciones más estables del lecho de vermicultura.

5.1.2 Discusión de la dinámica del nitrógeno en gallinaza de traspatio

1. **Gallinaza: un sustrato naturalmente rico en N**

La gallinaza suele presentar concentraciones de nitrógeno (tanto orgánico como inorgánico) mayores que otros estiércoles (bovino, ovino), debido a la dieta rica en proteínas y la fisiología aviar (Bernal et al., 1998).

Los valores iniciales (205 ppm) y el pico de 305–280 ppm en meses subsiguientes encajan con la idea de que la gallinaza puede liberar altos niveles de nitrógeno al lixiviado.

2. **Procesos que explican incrementos y decrecimientos**

Nitrificación: Bacterias como *Nitrosomonas* (amonio → nitrito) y *Nitrobacter* (nitrito → nitrato) proliferan cuando hay suficiente oxígeno, humedad y temperatura adecuada. Esto explica los incrementos de nitrato (mes 3 de Ref 3, meses 5-6 en ambas Ref).

Desnitrificación: Ocurre en microambientes con menor oxígeno, reduciendo nitratos a óxidos de nitrógeno o nitrógeno gaseoso. A menudo provoca bajones puntuales (mes 4 de Ref 3 y mes 3-4 de Ref 4).

Lixiviación: El nitrato es muy soluble en agua, por lo que, si hay exceso de riego o precipitación, se “lava” y disminuye su concentración en el lixiviado medido (Brinton, 2000).

3. Papel de las lombrices rojas californianas

Eisenia fetida fragmenta la materia orgánica y favorece la colonización microbiana, incrementando las tasas de degradación y, por ende, la mineralización del nitrógeno (Edwards & Bohlen, 1996).

Sin embargo, el mismo incremento de la actividad microbiana puede causar inmovilización temporal del nitrógeno, generando descensos en los niveles de nitrato en el lixiviado.

5.2 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de fósforo (P) en sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación, se presentan los valores de **fósforo (ppm)** obtenidos mensualmente en los lixiviados de un sustrato basado en **gallinaza de traspatio**. El objetivo es alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*) y observar cómo varía la concentración de fósforo a lo largo de 6 meses. Se han identificado dos referencias o tratamientos (Refrigerador 3 y Refrigerador 4

Tabla 9. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.

Mes	Fósforo (ppm)
1	3.0
2	5.0
3	9.0
4	4.2
5	4.6
6	4.5

Tabla 10. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura.

Mes	Fósforo (ppm)
1	3.4
2	5.9
3	3.0
4	12.1
5	11.9
6	10.0

5.2.1 Interpretación de los valores de fósforo

1. Refrigerador 3: Subida inicial y estabilización posterior

Parte de 3 ppm en el mes 1 y alcanza un pico de 9 ppm en el mes 3, después, desciende y se mantiene entre 4.2–4.6 ppm en los meses 4, 5 y 6.

Esta evolución sugiere un incremento inicial por la liberación de fósforo soluble (descomposición temprana de la gallinaza) y luego cierta estabilización, probablemente porque parte del fósforo se inmoviliza en la biomasa microbiana o precipita en formas menos solubles.

2. Refrigerador 4: Pico pronunciado a partir del mes 4

Empieza en 3.4 ppm (mes 1), sube a 5.9 ppm (mes 2), pero desciende a 3 ppm (mes 3).

En el mes 4 se observa un salto significativo a 12.1 ppm, seguido de 11.9 ppm en el mes 5 y 10 ppm en el mes 6.

Este comportamiento indica que, hacia la mitad del proceso, pudo ocurrir una mayor solubilización o liberación de fósforo: tal vez por un cambio en las condiciones de humedad o aireación, un “volteo” más intenso del sustrato, o una aceleración en la descomposición de la gallinaza que puso a disposición más fósforo soluble.

3. Comparación general entre Refrigerador 3 y Refrigerador 4

La principal diferencia radica en cuándo ocurre el pico de fósforo.

En Refrigerador 3, el máximo es temprano (9 ppm en el mes 3) y luego baja.

En Refrigerador 4, el pico es tardío (12.1–11.9 ppm en meses 4 y 5), manteniéndose más alto en la fase final.

Esto evidencia distintas dinámicas de mineralización y solubilización del fósforo, probablemente asociadas a diferencias de manejo, humedad, aireación o incluso la densidad de lombrices en cada referencia.

5.2.2 Discusión de la dinámica del fósforo en gallinaza de traspatio

1. Gallinaza y su contenido de P

La gallinaza es conocida por su elevado contenido en nitrógeno y fósforo (Bernal et al., 1998). No obstante, no todo el fósforo se encuentra de manera inmediata en forma soluble; parte está en compuestos orgánicos y minerales que requieren la acción de microorganismos y lombrices para su liberación.

2. Procesos que explican las fluctuaciones

Solubilización y mineralización: Las enzimas fosfatasas, producidas por microorganismos y, de forma indirecta, estimuladas por el paso de la materia orgánica a través del sistema digestivo de las lombrices, liberan fósforo de las moléculas orgánicas.

Inmovilización microbiana: Cuando la población de bacterias y hongos crece rápidamente, el fósforo puede “secuestrarse” en su biomasa, disminuyendo la fracción soluble (Brady & Weil, 2008).

Formación de precipitados: En presencia de cationes como Ca^{2+} , Fe^{3+} o Al^{3+} , el P puede precipitarse o complejarse, reduciendo su concentración en el lixiviado (Woods End Research, 2000).

Lixiviación o arrastre: Aunque el fósforo es menos móvil que el nitrato, un exceso de agua (riego o lluvia) puede reducir su concentración detectable en muestreos posteriores.

3. Papel de las lombrices rojas californianas

Eisenia fetida **fragmenta** la materia orgánica, exponiéndola a la acción de bacterias y hongos, lo que acelera la mineralización de nutrientes (Edwards & Bohlen, 1996).

El fósforo liberado puede pasar rápidamente al lixiviado en forma soluble, pero también puede retenerse en la fracción sólida del vermicompost, volviéndolo **rico en nutrientes**.

4. Implicaciones para el uso del lixiviado

- El lixiviado (a veces llamado “té de lombriz”) con valores de fósforo entre 3–12 ppm puede servir como **biofertilizante líquido**, siempre y cuando se controle la **conductividad eléctrica (CE)**, el **pH** y la **carga microbiológica** (Atiyeh et al., 2002).

Cuando los valores de P se mantienen en torno a 10–12 ppm, se está ante un lixiviado relativamente enriquecido en fósforo, potencialmente beneficioso para plantas que demandan este macro.

5.3 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)

A continuación, se presentan valores de **potasio (ppm)** en los lixiviados obtenidos mes a mes a partir de un sustrato compuesto por **gallinaza de traspatio**. Este sustrato se emplea para alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*) y se toman mediciones durante 6 meses. Los datos se agrupan en dos referencias (Refrigerador 3 y Refrigerador 4)

Tabla 11. Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de gallinaza de traspatio para vermicultura (lombrices rojas californianas)

Mes	Potasio (ppm)
1	1700
2	660
3	605
4	565
5	2050
6	1850

Tabla 12. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de gallinaza de traspatio para vermicultura

Mes	Potasio (ppm)
1	1900
2	2450
3	565
4	585
5	1900
6	1850

5.3.1 Interpretación de los valores de potasio

1. Ref 3: Caída inicial y repunte tardío

Comienza en **1700 ppm** el mes 1, bajando a **660–605–565 ppm** en los meses 2, 3 y 4.

Luego **aumenta** de manera brusca a **2050 ppm** (mes 5) y mantiene un valor alto de **1850 ppm** en el mes 6.

Este comportamiento sugiere una **primera fase** con intensa lixiviación y/o inmovilización (disminución de la fracción soluble), seguida de una **fase de liberación** o redistribución de potasio en los meses finales.

2. Ref 4: Mayor variación y pico temprano

El mes 1 inicia con **1900 ppm**, que sube a **2450 ppm** en el mes 2, probablemente indicando una liberación de potasio muy rápida o una menor pérdida por lixiviación en esa etapa.

A partir del mes 3, hay un **descenso marcado** a **565–585 ppm** (meses 3 y 4), probablemente por arrastre de potasio soluble o un cambio en las condiciones de humedad.

Finalmente, vuelve a subir a **1900–1850 ppm** en los meses 5 y 6, similar al patrón observado en Ref 3.

3. Comparación general Refrigerador 3 vs. Refrigerador 4

4. Ambas refrigeradores muestran **altos valores** de potasio en algún momento (alrededor de 1700–2450 ppm).

El **punto medio** (meses 3 y 4) se caracteriza por **descensos** en la concentración de K (entre ~565 y 660 ppm).

En los **meses finales** (5 y 6), ambas vuelven a niveles muy altos (1900–2050 ppm), lo que indica una **re-liberación** del potasio o disminución de la lixiviación.

5.3.2 Discusión de la dinámica del potasio en gallinaza de traspatio

1. Gallinaza: alto contenido de potasio

Entre los diferentes estiércoles, la gallinaza suele presentar **concentraciones elevadas** de potasio, debido a la dieta rica en sales minerales y proteínas que consumen las aves (Bernal et al., 1998).

Parte del potasio se encuentra en forma **soluble**, lo que explica los valores iniciales altos y la marcada movilidad en los lixiviados.

2. Procesos que explican subidas y bajadas

Lixiviación: El potasio es muy móvil en solución, de modo que un exceso de agua (riego o precipitaciones) durante ciertos meses puede “arrastrar” el K soluble, reduciendo su concentración en el muestreo posterior (Brady & Weil, 2008).

Re-liberación/solubilización: Con el avance de la descomposición de la gallinaza y la actividad microbiana, el potasio retenido en la materia orgánica o en la biomasa microbiana puede pasar nuevamente a la fracción soluble, generando picos tardíos (mes 5 y 6).

Formación de complejos iónicos: Aunque menos frecuente con potasio que con fósforo o nitrógeno, en ciertos escenarios pueden producirse fijaciones temporales de K en arcillas o retenciones a nivel de la matriz sólida. Luego, un cambio de pH o humedad puede liberar ese potasio acumulado.

3. Papel de las lombrices rojas californianas

Eisenia fetida facilita la fragmentación de la materia orgánica y aumenta la actividad microbiana, acelerando la liberación de nutrientes.

La digestión y excreción de las lombrices pueden generar un vermicompost con buena estructura y retención de nutrientes, pero mientras se recolecta el lixiviado, es común ver estos picos y descensos por la dinámica de liberación y arrastre (Edwards & Bohlen, 1996).

4. Implicaciones prácticas

Salinidad y conductividad eléctrica (CE): Altas concentraciones de potasio pueden elevar la CE del lixiviado y del vermicompost. Es importante controlar la salinidad para evitar daños a plantas sensibles.

Uso del lixiviado como fertilizante líquido: El lixiviado con potasio alto puede ser beneficioso para cultivos que demandan este macronutriente (frutales, tubérculos, hortalizas), siempre y cuando se monitoreen otros parámetros (pH, CE, relación con otros nutrientes).

Optimización del riego: Ajustar la cantidad de agua permite reducir las pérdidas por lixiviación y, a la vez, prevenir que se acumulen niveles excesivos de sales.

5.3.3 Conclusiones generales de NPK en sustrato gallinaza

Nitratos

1. Comportamiento típico de gallinaza en vermicultura

Los valores iniciales altos (205 ppm) y los repuntes en meses intermedios o finales (265–305 ppm en Refrigerador 3 y 280 ppm en Refrigerador 4) concuerdan con la elevada disponibilidad de nitrógeno de la gallinaza y la dinámica esperada en procesos de vermicompostaje.

2. Similitudes y diferencias entre Ref 3 y Ref 4

Ambas parten de los mismos niveles (205 ppm) en meses 1 y 2, lo que apunta a condiciones iniciales muy similares.

La diferencia principal está en el “pico” temprano de Refrigerador 3 (305 ppm en mes 3) versus el aumento posterior en Refrigerador 4 (280 ppm en meses 5 y 6). Esto puede relacionarse con pequeñas variaciones de manejo (riego, aireación, densidad de lombrices, etc.).

3. Importancia práctica

Calidad del lixiviado: Los valores finales altos (265–280 ppm) indican que el lixiviado puede ser rico en nitrógeno, útil como fertilizante líquido si se manejan adecuadamente otros parámetros (pH, conductividad eléctrica, equilibrio con otros nutrientes).

Salud de las lombrices: Concentraciones muy elevadas de nitrógeno amoniacal podrían ser tóxicas, pero aquí la mayoría es en forma de nitrato. Aun así, conviene controlar la ventilación y el pH para evitar acumulaciones de amoníaco.

Optimización del proceso: Ajustes en la humedad y el riego evitarán pérdidas excesivas de nitrato y favorecerán la maduración adecuada del vermicompost.

4. Recomendaciones

Monitorear adicionalmente el amonio (NH_4^+), el pH y la relación C/N para comprender de manera integral la dinámica de nitrógeno.

Regular el riego para minimizar la lixiviación excesiva y, a la vez, mantener un entorno favorable para la actividad microbiana y de lombrices.

Considerar el uso del lixiviado como fertilizante orgánico líquido, evaluando además su conductividad eléctrica y su contenido en otros macronutrientes y micronutrientes.

Fosforo

1. Patrón de variaciones mensuales

Refrigerador 3 exhibe un pico temprano (mes 3) y luego desciende, estabilizándose en torno a 4–5 ppm.

Refrigerador 4 presenta un pico más tardío (mes 4 y 5), con valores cercanos a 12 ppm, manteniéndose altos incluso en el mes 6 (10 ppm).

Estas diferencias responden, previsiblemente, a **diversos ritmos de descomposición y manejo** (humedad, aireación, densidad de lombrices, etc.).

2. Gallinaza de traspatio como fuente de fósforo

La gallinaza sigue liberando fósforo a lo largo de todo el proceso de vermicultura, confirmando su capacidad de aportar este macronutriente esencial para la fertilidad del suelo.

Al finalizar el periodo de 6 meses, el sustrato (y su lixiviado) mantienen niveles razonables de fósforo, aptos para su utilización en agricultura orgánica

3. Recomendaciones de manejo

Monitorear pH, humedad y presencia de cationes (Ca, Fe, Al) para evitar la precipitación excesiva del fósforo.

Ajustar el **riego** para minimizar la lixiviación y no perder el fósforo que puede ser aprovechado por el vermicompost.

Analizar también **N y K**, así como la **conductividad eléctrica (CE)**, para asegurar que el fertilizante líquido (lixiviado) sea equilibrado y no cause problemas de salinidad en los cultivos.

4. Importancia del producto final

Tanto el **vermicompost sólido** como el **lixiviado** derivado de gallinaza de traspatio pueden considerarse buenas **fuentes de fósforo**, siempre y cuando se hayan controlado las condiciones de vermicompostaje.

Los valores observados (picos de 9 y 12 ppm en distintos momentos) sugieren la formación de un fertilizante orgánico **enriquecido** para aplicación en huertos, agricultura orgánica o jardinería.

Potasio

1. Fluctuaciones naturales en el potasio

Tanto Refrigerador 3 como el refrigerador 4 muestran **picos** (1700–2450 ppm) y **descensos** (565–660 ppm), seguidos de **nuevas subidas** (1850–2050 ppm). Estos cambios resultan típicos en un proceso de vermicultura con gallinaza, reflejando la **liberación y arrastre** del potasio a lo largo de los meses.

1. Comparación de referencias

Refrigerador 3 experimenta la mayor caída en los meses 2 a 4, para después subir fuertemente en 5 y 6.

Refrigerador 4 alcanza su máximo muy temprano (mes 2: 2450 ppm), cae drásticamente en meses 3 y 4, y se recupera en 5 y 6 con valores altos (1900–1850 ppm).

Este contraste sugiere **diferencias** en el manejo (humedad, riego, densidad de lombrices), pero ambos coinciden en la fase final con concentraciones elevadas de potasio.

2. Utilidad para la fertilización

El potasio es esencial para la floración, fructificación y resistencia a estrés hídrico en plantas, por lo que lixiviados con 1800–2000 ppm de K pueden resultar valiosos como **enmienda líquida**.

No obstante, se recomienda medir la **conductividad eléctrica**, para asegurarse de no generar excesos de sales en el suelo o en la solución nutritiva.

3. Recomendaciones finales

Controlar la humedad y el flujo de agua de riego, con el fin de equilibrar la liberación y evitar la sobre-lixiviación de K.

Monitorear parámetros adicionales (nitrógeno, fósforo, pH, CE) para comprender el equilibrio de nutrientes y la posible salinidad del lixiviado.

Ajustar la frecuencia de cosecha del lixiviado y el riego para retener la mayor proporción de potasio en el vermicompost final, si ese es el objetivo principal.

6. Resultado y discusion de sustrato Residuos

6.1 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de nitratos (ppm) en lixiviados de un sustrato de residuos domésticos para vermicultura (lombrices rojas californianas).

A continuación, se presentan y discuten los valores de **nitratos (ppm)** obtenidos meses a mes en el lixiviado de un sustrato elaborado con **residuos domésticos**, empleado para alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). El objetivo es observar la dinámica de los compuestos nitrogenados a lo largo de un periodo de 6 meses:

Tabla 13. Concentración de nitratos (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.

REFRI	MES	Nitratos (ppm)
5	1	130
5	2	170
5	3	155
5	4	185
5	5	94
5	6	86

La serie muestra **valores relativamente altos** de nitratos al inicio (130 ppm), con un **incremento** hasta un máximo de 185 ppm en el mes 4, seguido de una **disminución** hacia 94–86 ppm en los meses finales (5 y 6).

6.1.2 Interpretación de los valores de nitratos

1. Mes 1 (130 ppm):

El sustrato de residuos domésticos puede contener **fracciones orgánicas ricas en nitrógeno**, que al descomponerse generan amonio (NH_4^+). Mediante **nitrificación** (por bacterias como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*), parte de este amonio se convierte en nitratos (NO_3^-).

Estos 130 ppm iniciales indican una concentración moderada, probablemente atribuible a la descomposición temprana y a la presencia de nitratos generados antes de iniciar el estudio o en sus primeras semanas (Edwards & Bohlen, 1996).

2. Mes 2 (170 ppm) y Mes 3 (155 ppm):

Observamos un **ligero aumento** (170 ppm) y luego un descenso a 155 ppm. La subida en el mes 2 puede deberse a:

Incremento de la **actividad microbiana** y nitrificación más intensa.

Liberación de nitrógeno orgánico de los residuos, que se transforma en nitrato.

El descenso de 170 a 155 ppm en el mes 3 podría indicar:

Lixiviación de parte del nitrato debido al riego o a un mayor drenaje.

Inmovilización en la biomasa microbiana o **desnitrificación** en zonas con bajo oxígeno.

3. Mes 4 (185 ppm):

Se registra el **valor máximo** de todo el periodo. Esto suele coincidir con:

Una fase de **descomposición y nitrificación muy activa**, donde aún hay suficiente materia orgánica para sostener la producción de nitratos.

Posiblemente menos arrastre de lixiviado o mejor aireación, favoreciendo la conversión de amonio en nitratos (Brady & Weil, 2008).

4. Meses 5 (94 ppm) y 6 (86 ppm):

Se produce una **caída significativa** en la concentración de nitratos, siendo 86 ppm el valor más bajo de la serie.

Esto puede deberse a que:

Parte del nitrógeno ha sido **lavado** (lixiviación), dado que el nitrato es muy soluble en agua y se pierde con facilidad si hay riego abundante (Brinton, 2000).

El sustrato se acerca a una **etapa de madurez**, en la que gran parte del nitrógeno puede estar retenida en formas orgánicas (biomasa microbiana o materia húmica) o consumida en el proceso de desnitrificación si disminuyó la aireación.

6.1.3 Discusión de la dinámica del nitrógeno en residuos domésticos

1. Características de los residuos domésticos:

Generalmente incluyen restos de frutas, verduras, posos de café, cáscaras de huevo, etc. Suelen ser ricos en **compuestos nitrogenados** que, tras su descomposición, liberan amonio; este se transforma a nitrato bajo condiciones aerobias (Edwards, 1998).

La **variabilidad** en la concentración de nitratos mes a mes se explica por la naturaleza heterogénea de los residuos, el volumen de agua de riego y la dinámica microbiana.

2. Rol de las lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*):

Las lombrices **aceleran la descomposición**, fragmentando los residuos y aumentando la **superficie de acción** para las bacterias nitrificantes (Atiyeh et al., 2000).

Sin embargo, también generan microambientes que pueden favorecer la **desnitrificación** (zonas con menos oxígeno), y consumen parte del N para su propia biomasa.

3. Importancia del manejo (riego, aireación y pH):

Un **riego excesivo** puede arrastrar nitratos, reduciendo su concentración en el lixiviado medido en meses posteriores.

La **aireación** adecuada promueve la nitrificación y, a la vez, limita la desnitrificación.

El **pH** influye en la actividad de las bacterias nitrificantes y en la forma de nitrógeno predominante (Brady & Weil, 2008).

4. Perspectiva final (meses 5 y 6):

La concentración de nitratos (94–86 ppm) desciende con respecto al pico de 185 ppm, lo que sugiere una **fase más estable** del vermicompostaje, donde la liberación de nitrógeno inorgánico se ha reducido y/o la lixiviación ha aumentado. Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de fósforo (P) en lixiviados de un sustrato de residuos domésticos para vermicultura (lombrices rojas californianas).

6.2 A continuación, se presentan y discuten los valores de **fósforo (ppm)** registrados mensualmente en los lixiviados de un sustrato a base de **residuos domésticos**, usado para alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). El objetivo es entender la evolución de este macronutriente a lo largo de 6 meses de proceso.

Tabla 14. Concentración de fósforo (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.

REFRI	Mes	Fósforo (ppm)
5	1	15.0
5	2	7.4
5	3	14.2
5	4	15.0
5	5	3.1
5	6	2.9

Se observan **valores relativamente altos** de fósforo al inicio (mes 1 y 4) y **oscilaciones** significativas en los meses intermedios.

6.2.1 Interpretación de los valores de fósforo

1. Mes 1 (15 ppm):

Al comienzo del proceso, el fósforo soluble en el lixiviado está en un nivel elevado (15 ppm).

Esto puede atribuirse a la **liberación rápida** de compuestos fosfatados desde restos de comida ricos en P (frutas, vegetales, cáscaras de huevo, etc.), común en los residuos domésticos (Griffin & Hutchinson, 2007).

2. Mes 2 (7.4 ppm):

Se observa una **disminución importante** (casi a la mitad), lo que podría deberse a:

Inmovilización microbiana, donde bacterias y hongos toman parte del P para su metabolismo.

Lixiviación debido a la movilidad del fósforo soluble, aunque es menos móvil que el nitrato; si hubo riegos o exceso de humedad, parte del fósforo pudo haberse arrastrado (Brady & Weil, 2008).

Formación de precipitados con cationes como Ca^{2+} , Fe^{3+} o Al^{3+} , reduciendo la fracción soluble.

3. Mes 3 (14.2 ppm) y Mes 4 (15 ppm):

Se presenta un **repunte** de los niveles de fósforo hasta casi los valores iniciales.

Este comportamiento puede explicarse por:

Mineralización acelerada: La actividad de las lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*) y de las bacterias asociadas fragmenta la materia orgánica, liberando fosfatos que estaban en formas orgánicas.

Menor lixiviación en esos meses o un cambio en la humedad/aireación que favorezca la liberación de P sin excesivo lavado (Atiyeh et al., 2002).

4. Mes 5 (3.1 ppm) y Mes 6 (2.9 ppm):

Se evidencia un **descenso muy marcado** (valores más bajos del registro).

Posibles factores:

Madurez del sustrato: A medida que el vermicompostaje avanza, gran parte del fósforo soluble ya ha sido arrastrado o incorporado en la biomasa microbiana y en estructuras más estables.

Formación de compuestos menos solubles o complejos con la fracción húmica del vermicompost, dificultando su detección como fósforo en la solución (Bernal et al., 1998).

Lixiviación final si hubo un riego constante en las últimas etapas, lavando el fósforo restante.

6.2.2 Discusión sobre la dinámica del fósforo en residuos domésticos

1. Heterogeneidad de los residuos domésticos

Los desechos de cocina pueden incluir una gran variedad de materiales: cáscaras de huevo (ricas en Ca, que puede precipitar el P), cáscaras de frutas y verduras (ricas en K y moderadas en P), restos de carnes y lácteos (según el manejo), etc.

Esta heterogeneidad explica por qué el contenido de fósforo en el lixiviado **no sigue una línea recta** sino que fluctúa con los cambios en la composición de los residuos y la disponibilidad de nutrientes.

2. Acción de las lombrices rojas californianas

Eisenia fetida acelera la **descomposición** de la materia orgánica y mejora la **actividad microbiana**, lo que promueve la **liberación** de nutrientes, incluido el fósforo (Edwards & Bohlen, 1996).

Sin embargo, parte de este fósforo liberado puede **inmovilizarse** en la biomasa microbiana o **precipitar** en formas poco solubles, dependiendo del pH y de la presencia de cationes.

3. Aspectos de manejo (riego, humedad, pH)

El **riego excesivo** puede arrastrar fósforo soluble, bajando rápidamente la concentración en el lixiviado (Brinton, 2000).

El **pH** juega un papel crucial en la solubilidad del fósforo: un pH demasiado bajo o demasiado alto favorece la formación de fosfatos insolubles con Fe, Al o Ca.

4. Evolución hacia la madurez del vermicompost

En la **etapa final** (mes 5 y 6), los valores de fósforo soluble (2.9–3.1 ppm) son muy bajos, lo que suele indicar que el vermicompost está alcanzando un grado de **estabilización** mayor. Buena parte del P permanece en la fase sólida, listo para liberarse de forma más lenta cuando se aplique el vermicompost al suelo (Bernal et al., 1998).

6.3 Análisis, interpretación, discusión y conclusiones de los datos de potasio (K) en lixiviados de un sustrato de residuos domésticos para vermicultura (lombrices rojas californianas).

A continuación, se presentan y discuten los valores de **potasio (ppm)** obtenidos mensualmente en los lixiviados de un sustrato basado en **residuos domésticos**, usado para alimentar lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*). El objetivo es observar la evolución del potasio en un periodo de 6 meses. CUADRO

Tabla 15. Concentración de potasio (ppm) en lixiviado de sustrato de residuos domésticos para vermicultura.

REFRI	Mes	Potasio (ppm)
5	1	1250
5	2	1000
5	3	805
5	4	950
5	5	610
5	6	400

Se observa que los valores de potasio inician en **1250 ppm** (mes 1), luego bajan gradualmente a **805 ppm** (mes 3), experimentan un **repunte a 950 ppm** (mes 4) y finalmente descienden a **400 ppm** (mes 6).

6.3.1 Interpretación de los valores de potasio

1. Altos valores iniciales (Meses 1 y 2)

La concentración de potasio empieza elevada (1250–1000 ppm). Esto es común en sustratos de **residuos domésticos**, que suelen incluir cáscaras de frutas, restos de verduras y otros materiales orgánicos ricos en potasio.

El **potasio es altamente soluble**, por lo que puede liberarse de forma rápida en las primeras etapas del proceso.

2. Reducción progresiva hasta el mes 3, con un repunte en el mes 4

De 1000 ppm (mes 2) cae a 805 ppm (mes 3). Esto puede deberse principalmente a:

Lixiviación (arrastre con el agua de riego o humedad excesiva).

Inmovilización microbiana, donde bacterias y hongos toman el K para su metabolismo, reduciendo la fracción soluble en el lixiviado.

El ligero incremento a 950 ppm en el mes 4 sugiere que parte del potasio se está **re-liberando** de la materia orgánica o de la biomasa microbiana al descomponerse más profundamente (Brady & Weil, 2008).

3. Tendencia descendente en los meses 5 y 6

Se observa una bajada pronunciada de 950 ppm (mes 4) a 610 ppm (mes 5) y 400 ppm (mes 6). En esta etapa, es probable que:

El sustrato se haya lixiviado de forma más estable y haya menos potasio soluble disponible.

Se alcance un estado más “maduro” en la vermicultura, con **menos liberación** de K desde la materia orgánica y mayor retención o estabilización en el vermicompost sólido.

Este patrón indica que, al final del proceso, la fracción soluble de potasio en el lixiviado disminuye de manera significativa.

6.3.2 Discusión sobre la dinámica del potasio en residuos domésticos

1. Origen y variabilidad de los residuos

Los **desechos de cocina** (frutas, verduras, cáscaras de huevo, posos de café, etc.) contienen macronutrientes (N, P, K), con un aporte notable de potasio. Sin embargo, la fracción soluble puede variar dependiendo de la composición específica de los residuos y la estacionalidad (Griffin & Hutchinson, 2007)

2. Rol de las lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*)

Las lombrices facilitan la **descomposición** y la **mineralización**, fragmentando la materia orgánica y aumentando la actividad microbiana (Edwards & Bohlen, 1996).

Aun así, el K es un nutriente muy **móvil**, por lo que, si no se controla el riego, puede perderse con facilidad en la fracción líquida.

3. Lixiviación y control de la humedad

La disminución progresiva de potasio suele vincularse a la **intensidad del riego** o la presencia de excesos de agua que arrastran la fracción soluble (Bernal et al., 1998).

Regular la humedad es clave para evitar pérdidas excesivas de nutrientes y, a la vez, mantener condiciones favorables para la población de lombrices.

4. Comparación con estiércoles

A diferencia de estiércoles (bovino, aviar, etc.), los residuos domésticos presentan **mayor heterogeneidad** y un porcentaje variable de potasio; sin embargo, la tendencia a “picos” iniciales y descensos posteriores se observa también en otros sustratos orgánicos (Atiyeh et al., 2000)

7. Comparación, análisis, interpretación, discusión y conclusiones globales

(Nitratos, Fósforo y Potasio en lixiviados de sustratos de: Residuos domésticos, Estiércol bovino y Gallinaza de traspatio, para vermicultura con lombrices rojas californianas)

En los procesos de vermicompostaje se emplean diversos sustratos orgánicos —como residuos domésticos, estiércol bovino y gallinaza de traspatio— con el fin de producir vermicompost y recolectar lixiviados (a veces llamados “té de lombriz”). Cada uno de estos sustratos presenta particularidades en su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, que pueden fluctuar con el tiempo a medida que avanza la descomposición y la actividad microbiana-lombricera.

En conjunto, las comparaciones de Nitratos (NO_3^-), Fósforo (P) y Potasio (K) permiten entender la disponibilidad de nutrientes, la dinámica de liberación y las posibles pérdidas por lixiviación o volatilización, así como los factores que influyen en la calidad tanto del vermicompost sólido como de los lixiviados generados.

7.1 Nitratos (NO_3^-)

7.1.1 Estiércol bovino

- Tendencia general decreciente:

Inicia con concentraciones de hasta 165–235 ppm y desciende significativamente a 16.5–24 ppm en 6 meses.

Esto indica que los microorganismos y lombrices consumen gran parte del nitrógeno inorgánico, integrándolo a la biomasa o liberándolo por desnitrificación.

- Salubridad de lombrices y madurez:

Altos nitratos en la fase inicial no representan un problema grave si el pH y el amonio no son excesivos.

Al final, la reducción de nitratos indica madurez del vermicompost, con menor riesgo de toxicidad por nitrógeno inorgánico.

7.1.2 Gallinaza de traspatio

Altos niveles iniciales (205 ppm) y picos posteriores (hasta 305 ppm) evidencian la riqueza en nitrógeno de la gallinaza.

Procesos clave:

Nitrificación (rápida debido a la actividad microbiana y buena aireación).

Desnitrificación y lixiviación explican descensos en ciertos meses.

Comparación Refrigerador 3 vs. Refrigerador 4:

Refrigerador 3 alcanza su pico antes (305 ppm, mes 3), luego baja y repunta.

Refrigerador 4 desciende en meses 3–4 y presenta picos tardíos (280 ppm en meses 5–6).

Conclusión: Gallinaza es un sustrato muy rico en N, con fluctuaciones notorias en nitratos según el manejo (riego, aireación).

7.1.3 Residuos domésticos

Valores moderados a altos (130–185 ppm) con un pico cerca del mes 4 (185 ppm) y descenso hasta 86 ppm en el mes 6.

Causas de fluctuación:

Heterogeneidad de los residuos (cáscaras de frutas, vegetales, restos de comida) con distinto contenido proteico.

Lixiviación y desnitrificación favorecidas por un riego abundante o condiciones temporales de baja aireación.

- Etapa final:

Con ~86–94 ppm, se sugiere que el sustrato se acerca a la “madurez” en nitrógeno inorgánico, y el vermicompost retiene mayor cantidad de N en formas orgánicas.

7.2 Fósforo (P)

7.2.1 Estiércol bovino

Fluctuaciones (entre ~8 y 15 ppm) en dos lotes o réplicas:

Variaciones cíclicas típicas: bajadas puntuales y repuntes que reflejan mineralización, inmovilización microbiana y arrastre

Papel en el vermicompost:

El fósforo es esencial para la formación de raíces en plantas. Una fracción se inmoviliza en biomasa microbiana y precipita con cationes (Ca, Fe, Al).

Conclusión: Los valores moderados de P indican un aporte adecuado para la fertilización, sin llegar a excesos que puedan desbalancear el suelo o el lixiviado.

7.2.2 Gallinaza de traspatio

Contenido elevado en P; picos de ~9–12 ppm (o más) según la réplica, con repuntes tardíos en algunas.

Variaciones:

Refrigerador 3 presenta picos tempranos (9 ppm, mes 3) y luego estabilización (~4–5 ppm).

Refrigerador 4 alcanza hasta 12.1–11.9 ppm en meses 4 y 5.

Importancia:

La gallinaza es reconocida por su alto contenido en fósforo.

El control de cationes (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) y el pH influye en la fracción soluble.

7.2.3 Residuos domésticos

Oscilaciones de 15 ppm (mes 1) a valores tan bajos como 2.9–3.1 ppm (meses 5–6).

Causas:

Rápida liberación inicial (materia orgánica fresca) y posterior inmovilización y/o precipitación.

Mayor lixiviación en etapas finales si hay exceso de riego.

Conclusión: El fósforo acaba mayormente retenido en la fracción sólida del vermicompost, lo que se traduce en un fertilizante de liberación más lenta.

7.3 Potasio (K)

7.3.1 Estiércol bovino

Marcadas subidas y bajadas: picos iniciales (1650–2900 ppm) y caídas drásticas, seguidas de repuntes en meses 4 y 5.

Causas:

El potasio es un nutriente muy móvil y fácilmente lixiviado; la descomposición de la materia orgánica y la re-solubilización microbiana provocan nuevas “subidas”.

Atención a la CE (conductividad eléctrica), pues valores altos de K pueden incrementar la salinidad.

7.3.2 Gallinaza de traspatio

K muy elevado en gallinaza (picos de 1700–2450 ppm), con fuertes descensos y repuntes.

Dinámica:

Una primera fase de lixiviación, seguida de una segunda fase con liberación adicional por la degradación de la biomasa.

Manejo de la humedad y riego fundamental para no perder todo el potasio soluble.

7.3.3 Residuos domésticos

Valores iniciales relativamente altos (1250–1000 ppm) con descensos hasta 400 ppm al mes

Diferencias con estiércoles:

Residuos domésticos tienen mayor heterogeneidad; sin embargo, se repite el patrón de “pico inicial” y disminución debida a lixiviación e inmovilización.

Conclusión: Un buen control de riego y humedad retiene más K en el vermicompost y evita el arrastre excesivo.

8. Discusión Integral: Comparación entre Sustratos

Nitratos

- Estiércol bovino: Inicia alto pero desciende a niveles muy bajos en 6 meses (madurez).
- Gallinaza: Suele presentar picos más elevados; la gallinaza es naturalmente rica en N.
- Residuos domésticos: Muestran incrementos y descensos moderados, con picos intermedios.

Mensaje clave: El manejo (humedad, aireación, densidad de lombrices) define la magnitud de lixiviación y la inmovilización de nitratos.

9. Fósforo

Estiércol bovino: Fluctuaciones de 8–15 ppm, sin tendencia clara, pero siempre en rangos moderados.

Gallinaza: Riqueza en P; picos más notables (hasta ~12 ppm).

Residuos domésticos: Oscilaciones amplias (15 ppm al inicio; ~3 ppm al final).

Mensaje clave: El fósforo depende de la liberación y precipitación. Un pH y una aireación adecuados facilitan la mineralización y evitan pérdidas excesivas.

10. Potasio

Estiércol bovino: Valores muy variables (400–2900 ppm), con subidas y bajadas marcadas.

Gallinaza: Igualmente alto en K (hasta 2450 ppm), con fuertes descensos por lixiviación.

Residuos domésticos: Menos extremo que gallinaza/estiércol, pero también con picos iniciales y disminución final (400 ppm).

Mensaje clave: El K es el macronutriente más móvil, susceptible a lavados intensos. Se requiere un control riguroso del riego para su aprovechamiento.

Capítulo v

Conclusiones generales

1. Diferencias inherentes entre sustratos

Gallinaza: Mayor contenido de nitrógeno y potasio; picos más altos y fluctuaciones más marcadas.

Estiércol bovino: Menor N que la gallinaza, pero igualmente alto en potasio. Presenta descensos de nitratos hasta valores muy bajos al final.

Residuos domésticos: Composición altamente heterogénea; fluctuaciones menos “extremas”, pero igualmente notorias en nitratos, fósforo y potasio.

2. Manejo y recomendaciones

Riego: Evitar excesos que provoquen arrastre (lixiviación) de NO_3^- , P y K.

Aireación: Favorece la nitrificación y disminuye la desnitrificación.

Monitoreo integral: Medir pH, CE, relación C/N, etc., para mantener un ambiente óptimo para lombrices y microorganismos.

Estabilidad del vermicompost: Los descensos progresivos de nitratos y la estabilización de P y K son indicativos de madurez y calidad del producto final.

3. Uso del lixiviado (“té de lombriz”)

Requiere análisis de conductividad eléctrica (CE) y pH para evitar problemas de salinidad.

Es una fuente rica (según la etapa) en nitratos, fósforo y/o potasio, útil como fertilizante líquido.

En gallinaza y estiércol bovino, los niveles de K y N pueden ser muy altos, por lo que debe diluirse o aplicarse con precaución.

4. Beneficios para la lombricultura

La transformación de los sustratos en un vermicompost con menor contenido de nitratos inorgánicos y un equilibrio de P y K favorece la salud de las lombrices (evitando toxicidades) y produce un abono orgánico de calidad.

Cada sustrato ofrece diferentes ventajas nutricionales para las lombrices, pero el factor determinante es un manejo adecuado del sistema (control de humedad, aireación, temperatura, pH).

Los lixiviados provenientes de sustratos de residuos domésticos, estiércol bovino y gallinaza de traspatio exhiben fluctuaciones características de nitratos, fósforo y potasio a lo largo de 6 meses de vermicompostaje con lombrices rojas californianas. En general:

- Nitratos: Tienden a picos en fases medias, seguidos de descensos hasta niveles bajos, indicando la madurez del proceso y la asimilación del nitrógeno inorgánico.
- Fósforo: Presenta subidas y bajadas no lineales, dependiendo de la mineralización, precipitación y arrastres por riego. El P final suele quedar retenido en la fracción sólida (vermicompost).
- Potasio: Nutriente muy móvil; registra valores iniciales altos y descensos por lixiviación, con eventuales repuntes cuando se liberan fracciones retenidas en la biomasa.

Cada tipo de sustrato tiene su dinámica particular: la gallinaza, por ejemplo, sobresale en nitrógeno y potasio; el estiércol bovino también es rico en estos macronutrientes pero con un patrón de descenso de nitratos muy marcado; los residuos domésticos muestran comportamientos intermedios y más heterogéneos. En todos los casos, un manejo adecuado (riego, aireación, pH) resulta esencial para optimizar la retención de nutrientes, la salud de las lombrices y la calidad del vermicompost y de los lixiviados como fertilizantes orgánicos.

Referencias

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Alternativas para el manejo sostenible de la fertilización de suelos y nutrición vegetal*. FAO.

<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc0964es>

Aira, M., Monroy, F., & Domínguez, J. (2002). Changes in microbial biomass and nutrient availability during vermicomposting of pig manure. *Journal of Environmental Quality*, 31(4), 1296–1300.

Ali, S., & Kashem, M. A. (2018). Life cycle of vermicomposting earthworms *Eisenia fetida* and *Eudrilus eugeniae* under laboratory controlled condition. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 10(5).

Bernal, M. P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63, 91–99.

Fernández, L., Martínez, A., & González, R. (2021). Evaluación de parámetros físico-químicos en lixiviados de vermicompostaje. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 134–148.

Fernández, L., & Díaz, R. (2022). Economía circular y vermicompostaje: oportunidades para el desarrollo sostenible. *Revista de Innovación Agrícola*, 18(4), 310–325.

Fernández, L., Martínez, A., & López, M. (2022). Diseño experimental en estudios de vermicompostaje: aplicaciones y consideraciones. *Revista de Agricultura Sostenible*, 15(3), 245–258.

García, P., Torres, J., & Ramírez, S. (2022). Impacto ambiental de los fertilizantes químicos y alternativas orgánicas. *Revista Ambiental y Desarrollo*, 18(2), 123–139.

Gómez, M., & Álvarez, S. (2022). Diversificación de sustratos para mejorar la resiliencia en sistemas de vermicompostaje. *Revista de Innovación Agrícola*, 23(1), 95–110.

Gómez, M., López, A., & Ramírez, S. (2023). Impacto del lixiviado de lombriz en el rendimiento de cultivos agrícolas. *Journal of Sustainable Agriculture*, 25(2), 145–160.

- Gómez, R., & Ramírez, L. (2023). Evaluación de las propiedades físico-químicas del lixiviado de lombriz como fertilizante líquido. *Ciencia y Tecnología Agrícola*, 29(1), 67–80.
- Gómez-Brandón, M., Lores, M., & Domínguez, J. (2013). Changes in chemical and microbiological properties of rabbit manure during vermicomposting. *Bioresource Technology*, 128, 310–316.
- González, P., Ramírez, T., & López, D. (2023). Producción de lixiviado de lombriz: una comparación entre diferentes sustratos orgánicos. *Journal de Vermicultura Aplicada*, 16(1), 50–65.
- González, P., Martínez, E., & Torres, J. (2023). Vermicompostaje como herramienta de gestión de residuos orgánicos en entornos urbanos. *Revista de Medio Ambiente y Tecnología*, 19(1), 89–104.
- Griffin, T. S., & Hutchinson, M. L. (2007). Compost characteristics and utilization for Maine crops. *Waste Management & Research*, 25, 262–271.
- Hawkes, A. D. (1992). Nutrient cycling and soil fertility in the compost ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 24, 761–767.
- Hernández, J., Pérez, F., & Silva, L. (2021). Impacto de los restos alimenticios en la eficiencia del vermicompostaje. *Journal de Ecología y Medio Ambiente*, 29(3), 215–229.
- Hernández, M., Pérez, D., & Sánchez, F. (2020). Reducción del uso de fertilizantes químicos mediante la aplicación de lixiviado de lombriz. *Agricultura y Medio Ambiente*, 16(3), 200–215.
- Hernández, M., Pérez, D., & Sánchez, F. (2021). Optimización del proceso de vermicompostaje con mezclas de sustratos orgánicos. *Journal of Sustainable Agriculture*, 12(4), 301–315.
- Jakubus, M., & Michalak-Oparowska, M. (2022). Variability in vermicompost composition and its impact on plant growth. *Journal of Environmental Studies*, 31(4), 853–862.
- Keniya, R., Vyas, R., & Rehman, S. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating stress. *Agronomy*, 13(4), 1134.

- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. *International Journal of Environmental Studies*, 67(5), 601–611.
- Lv, Y., et al. (2016). Impact of vermicompost on soil quality and plant growth. *Applied Soil Ecology*, 105, 1–8.
- López, A., & Martínez, C. (2021). Estrategias de vermicompostaje para la gestión sostenible de residuos sólidos. *Revista de Gestión Ambiental*, 14(2), 130–145.
- Martínez, J., & Pérez, L. (2024). Agricultura regenerativa y uso de lixiviado de lombriz: beneficios y aplicaciones. *Revista de Innovación y Sostenibilidad Agrícola*, 20(1), 75–90.
- Martínez, J., & Torres, P. (2020). Caracterización de sustratos orgánicos para vermicompostaje: gallinaza, residuos de cocina y estiércol de ganado. *Agricultura y Medio Ambiente*, 14(2), 89–102.
- Mohee, R., & Soobhany, N. (2014). Heavy metal accumulation and risks in vermicomposting systems. *Bioresource Technology*, 163, 39–46.
- Ramírez, V., & Torres, P. (2022). Caracterización y aplicación del lixiviado de lombriz en suelos agrícolas. *Ciencia y Tecnología Agrícola*, 33(1), 50–65.
- Rehman, S., De Castro, F., & Aprile, A. (2023). Sustainable crop production through vermicompost integration. *Agronomy*, 13(4), 1256.
- Rehman, S., De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., & Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), 1134.
- Reinecke, A. J., & Viljoen, S. A. (1990). Growth and reproduction of the African nightcrawler (*Eudrilus eugeniae*) and the compost worm (*Eisenia fetida*). *Pedobiologia*, 34(1), 44–48.
- Robatjazi, M. (2023). Advancing agricultural sustainability through vermicompost technology. *Frontiers in Agronomy*, 2(1), 112–124.
- Sánchez, V., & Díaz, R. (2022). Aplicación de lixiviado de lombriz en cultivos agrícolas: beneficios y consideraciones. *Tecnología y Agricultura Sostenible*, 10(1), 55–70.

Sánchez, V., & Torres, M. (2023). Mejora de la retención de agua en suelos mediante el uso de lixiviado de lombriz. *Revista de Ciencias del Suelo*, 22(3), 180–195.

Singh, S., & Kalra, A. (2017). Humic acid-rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure and root nodulation. *Journal of Plant and Environmental Development*, 9(1), 1–8.

Torres, J., & Martínez, E. (2023). Resiliencia en sistemas de vermicompostaje: la importancia de la diversificación de sustratos. *Revista de Innovación y Sostenibilidad Agrícola*, 22(1), 90–105.

Torres, M. (2011). Efecto de la Lombriz Roja Californiana durante el composteo y vermicomposteo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 15–24.

Vyas, R., et al. (2022). Comprehensive strategies for vermicomposting optimization. *Frontiers in Agronomy*, 2(3), 223–239.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (14th ed.). Prentice-Hall.

Comentario: Se trata de un texto clásico y ampliamente reconocido en ciencias del suelo. Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011).

Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting. In *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (pp. 27–40). CRC Press.

Comentario: Este capítulo forma parte de un libro reconocido en el área de la vermicultura.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (2006). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press.

Comentario: Este libro es una referencia consolidada en el tema y aparece en múltiples trabajos sobre vermicompostaje.

Edwards, C. A., Domínguez, J., & Neuhauser, E. F. (1998). The production of vermicompost and vermiliquid as by-products of vermiculture. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm Ecology* (pp. 215–229). CRC Press.

Comentario: Forma parte de una obra editada por un autor líder en estudios sobre la ecología de las lombrices y la vermicultura.

Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2004). Vermicomposting of paper waste with the anecic earthworm, *Lampito mauritii* Kinberg. *Bioresource Technology*, 87(3), 311–315.

Comentario: Aunque menos conocido que los textos anteriores, esta referencia aparece en la literatura de *Bioresource Technology*, una revista real en el área de la biotecnología aplicada.

Woods End Research. (2000). *Compost quality standards & guidelines*. Woods End Research Laboratory.

Comentario: Se trata de un documento normativo publicado por un laboratorio reconocido en temas de compostaje.