



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE
ARQUITECTURA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN
DISEÑO, PLANIFICACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA
BIOTRANSFORMADORA DE LA LOMBRIZ
COQUETA ROJA (*Eisenia foetida* Sav) Y
MICROORGANISMOS EFICIENTES (EM), PARA EL
MANEJO SOSTENIBLE DE EXCRETAS DE GANADO
BOVINO LECHERO (*Bos taurus* L), EN LA GRANJA
DE ZOOTECNIA DEL CUNOR, EN EL MUNICIPIO
DE COBÁN, ALTA VERAPAZ.”**

VILMA ELIZABETH QUEZADA MÉNDEZ



PARA OPTAR AL TÍTULO DE
**MAESTRA EN DISEÑO, PLANIFICACIÓN
Y MANEJO AMBIENTAL**

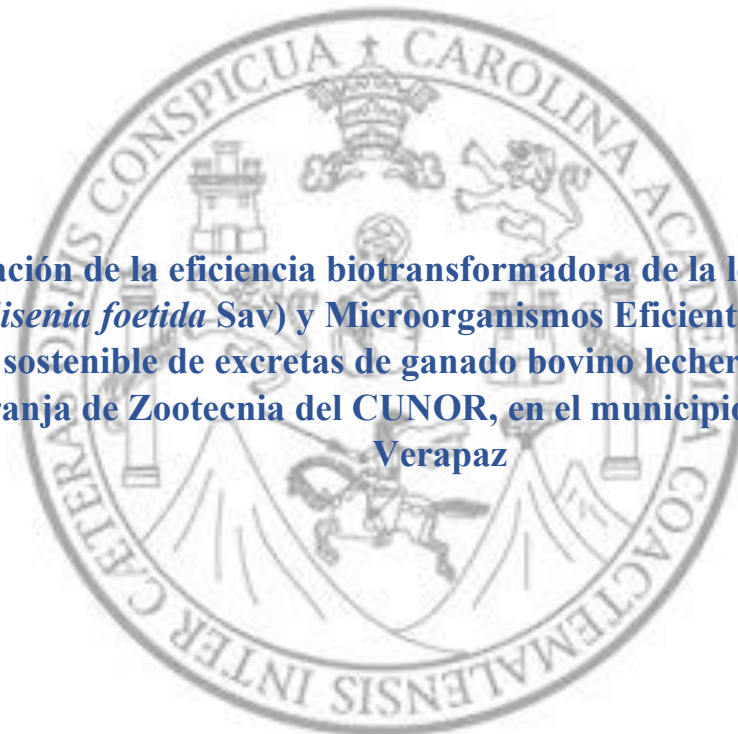


USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Diseño, Planificación y Manejo Ambiental

Evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y Microorganismos Eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz



Presentada por:
Licda. Zoot. Vilma Elizabeth Quezada Méndez
Para optar al título de:
Maestra en Ciencias
Diseño, Planificación y Manejo Ambiental

Guatemala, octubre 2026

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Diseño, Planificación y Manejo Ambiental

Evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y Microorganismos Eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz

Presentada por:
Licda. Zoot. Vilma Elizabeth Quezada Méndez
Para optar al título de:
Maestra en Ciencias
Diseño, Planificación y Manejo Ambiental

Guatemala, octubre 2026

Me reservo los derechos de autor haciéndome responsable de las doctrinas sustentadas adjuntas, en la originalidad y contenido tema, en el análisis y conclusión final, eximiendo de cualquier responsabilidad a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura
Escuela de Estudios de Postgrado

M. A. Walter Ramiro Mazariegos Biolis
RECTOR

JUNTA DIRECTIVA

Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini	Decano
Msc. Licda. Ilma Judith Prado Duque	Vocal II
Arq. Mayra Jeanett Díaz Barillas	Vocal III
Br. Oscar Alejandro La Guardia Arriola	Vocal IV
Br. Laura del Carmen Berganza Pérez	Vocal V
Arq. Francisco Ronaldo Herrarte Gonzalez	Secretario Académico

TRIBUNAL EXAMINADOR

Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini	Decano
Arq. Francisco Ronaldo Herrarte Gonzalez	Secretario Académico
Dr. Miguel Ángel Chacón	Director de Postgrados
Msc. Arq. Dafne Adriana Acevedo Quintanilla	Examinador
Msc. Edin Alejandro Gil Esturban	Examinador

ACTO QUE DEDICO A

- | | |
|--------------------------------|---|
| DIOS | Por ser el Maestro de maestros, guiarme y bendecirme cada día. |
| MIS PADRES | Blanca y Ramiro por ser esas personas maravillosas, honestas, luchadoras y trabajadoras. Gracias por su comprensión y entrega incondicional de siempre. Que Dios los bendiga grandemente |
| LA MEMORIA DE MI SUEGRA | Clara Marcela , con la certeza de que comparte desde el cielo la alegría de este logro profesional. Gracias por su infinito cariño, apoyo y paciencia. |
| MIS HIJOS | Luis Fernando, José Manuel y Marcela Elizabeth , por ser la luz que ilumina mi existencia y mi razón que impulsa mi camino. Los amo con todo mi corazón. |
| MIS NIETOS | Santiago Sebastián y Mateo René , por ser mi mayor bendición y llenar mis días de amor, dicha y motivación para seguir alcanzando metas. |

AGRADECIMIENTOS A

Universidad de San Carlos de Guatemala: por ser la casa de estudios donde me he formado académica y profesionalmente.

Facultad de Arquitectura: por darme la oportunidad de cursar los estudios de maestría y otorgarme las herramientas necesarias para alcanzar con éxito este logro profesional.

Maestro Edín Alejandro Gil Esturban: por su paciencia, su guía acertada y su constante acompañamiento a lo largo de esta investigación. Su disposición, valiosos consejos y orientación profesional fue lo que permitió sacar adelante este trabajo de tesis

Maestra Dafne Adriana Acevedo Quintanilla: por su experiencia y valioso aporte en el desarrollo de la propuesta ambiental. Su conocimiento y apoyo fueron clave para darle forma, consistencia y calidad a esta investigación.

Maestro Mauricio Arturo Quiroa Roldán: por el acompañamiento durante las fases de campo y laboratorio. Gracias por su criterio técnico y por la buena guía práctica con la que abordamos cada etapa de este proceso

Karla, Yeison, Cristian y Silvia: gracias por el apoyo incondicional, por darme ánimos en los días pesados y por celebrar conmigo cada paso de este triunfo.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ix
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO	4
1.1 Tema, subtema, objeto de investigación.....	4
1.1.1 Tema.....	4
1.1.2 Subtema.....	4
1.1.3 Objeto de investigación.....	4
1.2 Delimitación.....	4
1.2.1 Delimitación en espacio físico-geográfico.....	4
1.2.2 Delimitación temporal.....	6
1.2.3 Delimitación semántica.....	6
1.3 Antecedentes	7
1.4 Planteamiento del problema.....	8
1.4.1 Pregunta general de investigación.....	9
1.4.2 Preguntas específicas de investigación	9
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos	10
1.6 Justificación.....	10
1.7 Limitaciones y viabilidad de la investigación.....	11
1.7.1 Limitaciones.....	11
1.7.2 Viabilidad de la investigación	12
1.8 Marco teórico conceptual.....	12
1.8.1 Biotransformación o modificación enzimática	12
1.8.2 Compostaje.....	13
1.8.3 Las cuatro fases del compostaje.....	14
1.8.4 Beneficios del compostaje.....	16
1.8.5 Monitoreo durante el compostaje.....	17
1.8.6 Higienización e inocuidad.....	26
1.8.7 Lombricultura.....	27
1.8.8 Microorganismos eficientes	38
1.8.9 Grupos microbianos que componen los EM	38

1.8.10 Aplicación de microorganismos eficientes (EM) en purines y estiércol.....	40
1.8.11 Aplicación de microorganismos eficientes (EM) en ganadería.....	41
1.8.12Análisis físicoquímico de lombricomposta en excretas de ganado bovino lechero.....	43
1.8.13 Manejo ambiental de las excretas de origen animal.....	43
1.9 Hipótesis.....	45
1.10 Tipo de investigación	45
CAPÍTULO 2. DISEÑO METODOLÓGICO	46
2.1 Postura paradigmática	46
2.2 Metodología	46
2.2.1 Diseño experimental.....	46
2.2.2 Cálculo de la cantidad de lombriz coqueta roja (<i>Eisenia foetida</i> Sav).....	47
2.2.3 Tratamientos.....	48
2.2.4 Unidad experimental	51
2.2.5 El experimento se desarrolló en cuatro fases	54
2.2.6 Análisis costo-beneficio	65
2.3 Método	67
2.4 Técnicas de investigación	67
2.5 Muestra inicial.....	67
2.6 Instrumentos, equipo y recursos.....	67
2.6.1 Instrumentos.....	67
2.6.2 Equipo	68
2.6.3 Recursos	68
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
3. 1 Fase de precompostaje	71
3.1.1 Temperatura.....	71
3.1.2 pH (potencial de hidrógeno).....	73
3.1.3 Humedad	74
3.1.4 Conductividad eléctrica (CE).....	76
3.2 Fase de compostaje.	78
3.2.1 Temperatura.....	78
3.2.2 pH.....	81
3.2.3 Humedad	82

3.2.4 Conductividad eléctrica.....	84
3.3 Análisis de las variables fisicoquímicas en el proceso de biodegradación, en las fases de precompostaje y compostaje.	86
3.3.1 Temperatura.....	86
3.3.2 Potencial de hidrógeno (pH):	86
3.3.3 Humedad	87
3.3.4 Conductividad eléctrica (CE):.....	87
3.4 Tratamiento con menor tiempo de biodegradación.....	88
3.4.1 Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	88
3.4.2 Mayor grado de mineralización (cenizas).....	89
3.4.3 Estabilización del pH y humedad.....	89
3.5 Análisis fisicoquímico de los nueve tratamientos evaluados.	89
3.5.1 El pH (potencial de hidrógeno).....	91
3.5.2 Relación C/N.....	92
3.5.3 Materia orgánica.....	95
3.5.4 Nitrógeno.....	97
3.5.5 Fósforo	98
3.5.6 Óxido de potasio	100
3.5.7 Óxido de calcio.	101
3.5.8 Óxido de magnesio.....	103
3.5.9 Boro.....	104
3.5.10 Hierro (Fe).....	106
3.5.11 Azufre (S).....	108
3.5.12 Manganeseo (Mn)	110
3.5.13 Cobre.....	112
3.5.14 Zinc (Zn)	114
3.5.15 Porcentaje de ceniza.....	116
3.5.16 Porcentaje de materia orgánica	118
3.5.17 Carbono orgánico	120
3.5.18 Densidad real.....	122
3.5.19 Densidad aparente (método de la probeta).....	124
3.6 Identificación del tratamiento con menor tiempo de biodegradación.....	126
3.6.1 Menor relación C/N.....	126
3.6.2 Menor contenido de materia orgánica residual	126

3.7 Análisis fisicoquímico y evaluación de la calidad del producto biotransformado.....	127
3.8 Mermas del sustrato	131
3.9 Análisis del porcentaje de mermas al finalizar la fase experimental del compostaje.....	132
3.9.1 Cálculo general.....	133
3.10 Evaluación de biomasa de (<i>Eisenia foetida</i> Sav) en la fase final del experimento	134
3.11 Análisis del costo unitario de producción por kilogramo de compost en cada tratamiento.....	136
3.12 Análisis del tiempo de transformación y calidad final del producto	138
3.12.1 Comportamiento de la relación carbono/nitrógeno (C/N) como indicador de madurez	138
3.12.2 Potencial hidrógeno (pH) y estabilidad química.....	139
3.12.3 Riqueza nutricional y calidad del abono (macronutrientes y micronutrientes)	139
3.12.4 Contenido de materia orgánica (M.O.) y cenizas.....	140
CAPÍTULO 4. PROPUESTA AMBIENTAL.....	141
4.1 Estrategias de manejo sostenible de excretas bovinas (<i>Bos taurus</i> L): propuesta de biotransformación en la granja de Zootecnia del CUNOR, Alta Verapaz.....	141
4.1.1 Introducción	141
4.1.2 Justificación.....	141
4.1.3 Objetivo general	142
4.1.4 Objetivos específicos	142
4.1.5 Metodología	143
4.1.6 Inventario bovino	143
4.1.7 Propuesta de reutilización de los productos resultantes de los dos procesos	148
4.1.8 Plan de manejo integral de las excretas bovinas	149
4.2 Análisis general e integración sistémica de la propuesta biotransformadora.....	149
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	154
BIBLIOGRAFÍA.....	156
ANEXOS.....	160

Anexo 1. Figura 29. Informe de análisis de abono orgánico 0_123.	161
Anexo 2. Tabla 32. Temperatura promedio semanal (°C), en los tratamiento evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje.....	162
Anexo 3. Tabla 33. Valores promedio semanales de pH en los tratamientos evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).....	163
Anexo 4. Tabla 34. Porcentaje de humedad semanal de los tratamientos evaluados mediante la prueba de puño durante las fases de (precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).....	164
Anexo 5. Tabla 35. Valores promedio semanales de conductividad eléctrica (dS/m), en los tratamientos evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).....	165
Anexo 6. Tabla 36. Evolución de la biomasa de la lombriz coqueta roja (<i>Eisenia foetida</i> Sav), en los tratamientos evaluados durante la fase de lombricompostaje.....	166
Anexo 7. Tabla 37. Porcentaje de merma del sustrato en la fase de lombricompostaje y compostaje (<i>Eisenia foetida</i> Sav) y microorganismos eficientes (EM).....	166
Anexo 8. Figura 30. Determinación de densidad aparente, densidad real y porcentaje de porosidad en los tratamientos evaluados	167
Anexo 9. Tabla 38. Cronograma de actividades y plan de ejecución de la investigación.	168
Anexo 10. Figura 31. Planos arquitectónicos, del área de precompostaje y lombricompostaje de la granja de Zootecnia del CUNOR.....	169
Anexo 11. Figura 32. Registro fotográfico del proceso de precompostaje, compostaje EM y lombricompostaje.....	170
Anexo 12. Figura 33. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	180
Anexo 13. Figura 34. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	181
Anexo 14. Figura 35. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	182

Anexo 15. Figura 36. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	183
Anexo 16 Figura 37. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	184
Anexo 17. Figura 38. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	185
Anexo 18. Figura 39. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	186
Anexo 19. Figura 40. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	187
Anexo 20. Figura 41. Matriz de gráficos de dispersión para la relación de nutrientes e integración de componentes principales en los tratamientos de lombricompostaje (<i>Eisenia foetida</i> Sav), y compostaje (EM).	188
Anexo 21. Figura 42. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	189
Anexo 22. Figura 43. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).....	190
Anexo 23 Figura 44. Análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey para las mermas del sustrato al cierre de la investigación.	191
Anexo 24 Figura 45. Análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey para la biomasa ganada de lombriz coqueta roja (<i>Eisenia foetida</i> Sav), durante la fase experimental.	192
Anexo 25. Matriz de cálculo de la propuesta ambiental sostenible para la granja de la carrera de Zootecnia del Centro Universitario del Norte (CUNOR), Alta Verapaz.....	193
Anexo 26. Tabla 46. Resumen de diseño del sistema de compostaje de excretas bovinas	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Delimitación geográfica del área de investigación.....	5
Figura 2. Fases de estabilización aeróbica de residuos orgánicos	15
Figura 3. Características externas de la lombriz roja californiana	32
Figura 4. Características externas de la lombriz roja californiana	32
Figura 5. Lombrices en fase de acoplamiento.....	33
Figura 6. Ciclo de vida de E. foetida S.	35
Figura 7. Unidad experimental.....	52
Figura 8. Croquis de campo	53
Figura 9. Área de investigación	54
Figura 10.Comportamiento de temperatura	71
Figura 11. Comportamiento de nivel de pH.....	73
Figura 12. Comportamiento nivel de humedad.....	75
Figura 13. Comportamiento conductividad eléctrica	76
Figura 14. Temperatura promedio.....	79
Figura 15. pH promedio	81
Figura 16. Humedad promedio	83
Figura 17. Conductividad eléctrica promedio	84
Figura 18. Boro	105
Figura 19. Hierro.....	107
Figura 20. Azufre	109
Figura 21. Manganeseo.....	111
Figura 22. Cobre.....	112
Figura 23. Zinc.....	115
Figura 24. Porcentaje de cenizas.....	117
Figura 25. Porcentaje de materia orgánica.....	119
Figura 26. Porcentaje de carbono orgánico.....	121
Figura 27. Densidad real	123
Figura 28. Densidad aparente.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Control de aireación	19
Tabla 2 Parámetros óptimos de humedad.....	21
Tabla 3. Parámetros de temperatura óptimos	22
Tabla 4.Parámetros de pH óptimos	23
Tabla 5. Parámetros de relación carbono: nitrógeno	24
Tabla 6. Relación C:N de algunos materiales utilizados en el compostaje.....	24
Tabla 7. Control del tamaño de las partículas	25
Tabla 8. Parámetros del compostaje.....	26
Tabla 9. Temperatura necesaria para la eliminación de algunos patógenos.....	27

Tabla 10. Características nutricionales de la lombricomposta y composta empleadas	43
Tabla 11. Tratamientos a realizar según modelo (DBCA)	49
Tabla 12. Diluciones a diversas concentraciones de EM	51
Tabla 13. Resultados de parámetros evaluados de precompostaje.....	78
Tabla 14. Temperatura promedio	79
Tabla 15. pH promedio	81
Tabla 16. Humedad promedio.....	83
Tabla 17. Conductividad eléctrica promedio	85
Tabla 18. Resumen de análisis de laboratorio.....	89
Tabla 19. Comparación de medias pH	91
Tabla 20. Comparación de medias relación C/N.....	93
Tabla 21. Comparación de medias MO.....	96
Tabla 22. Comparación de medias nitrógeno.....	97
Tabla 23. Comparación de medias fósforo.....	98
Tabla 24. Comparación de medias óxido de potasio.....	100
Tabla 25. Comparación de medias óxido de calcio	101
Tabla 26. Comparación de medias óxido de magnesio.....	103
Tabla 27. Resumen macro y micro nutrientes ANALAB	128
Tabla 28. Mermas del sustrato	131
Tabla 29. Resultados consolidados de merma	133
Tabla 30. Biomasa acumulada en los tratamientos con lombrices.....	134
Tabla 31. Costos por tratamiento utilizando EM y lombrices	136

RESUMEN

La gestión de desechos orgánicos representa un reto para la producción agropecuaria actual. En Guatemala, este proceso está regulado por la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto Número 68-86), cuyos lineamientos se orientan a proteger las propiedades del suelo. Bajo este marco normativo, la economía circular se consolida como un componente central para aprovechar subproductos y reintegrar nutrientes a los ciclos productivos. Frente a esta realidad, los sistemas de biotransformación surgen como la alternativa técnica apta para transformar pasivos ambientales en abonos orgánicos seguros, estables y de fácil aplicación.

Desde esta consideración de reutilización, la aplicación de sistemas de biotransformación mediante microorganismos eficientes (EM) y lombricompostaje, resulta sumamente pertinente en el municipio de Cobán, Alta Verapaz, donde las condiciones climáticas y la actividad ganadera local demandan alternativas adaptadas para el manejo residuos orgánicos. Específicamente, la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, genera efluentes y excretas de ganado bovino (*Bos taurus* L), que exigen un procesamiento metodológico. Por lo tanto, establecer esta unidad de tratamiento permite validar soluciones ecológicas transferibles según las condiciones ambientales y el marco regulatorio nacional.

Con el propósito de operativizar dicho modelo de estabilización en la unidad productiva, se seleccionó el proceso de vermicompostaje apoyado en la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav). De acuerdo con (Edwards 2011), este anélido posee una alta capacidad de ingesta y reproducción, facilita la fragmentación mecánica de los residuos y acelera su descomposición.

De manera complementaria, la incorporación de microorganismos eficientes (EM), optimiza la biodegradación al potenciar la actividad microbiológica nativa. Ambos componentes biológicos generan una sinergia que, según (Villarreal-De la Cruz 2021), regula variables críticas como temperatura, humedad, pH y la relación carbono/nitrógeno (C/N), lo que agiliza el tiempo de estabilización.

Con base en esta combinación biológica, la investigación evaluó la eficiencia biotransformadora de (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), en excretas bovinas lecheras (*Bos taurus* L), en el CUNOR. Durante el periodo comprendido del 1 de septiembre al 14 de noviembre de 2025, el estudio analizó las variables fisicoquímicas mediante un Diseño de Bloques al Azar (DBCA) y pruebas de significancia de Tukey, con un periodo experimental de 45 días, precedido por 30 días de precompostaje para la estabilización térmica del sustrato. Se buscó determinar el tratamiento óptimo que asegurará la madurez química del vermicompost. Al evaluar dicha temporalidad, se demostró que el ciclo de 75 días fue insuficiente para alcanzar la madurez óptima del producto, aunque evidenció una estabilización progresiva del sustrato.

Según los análisis fisicoquímicos realizados por el laboratorio ANALAB, el compost (EM) y lombricompost final alcanzó valores de pH que oscilaron entre 8.56 y 9.14, complementados por una relación carbono/nitrógeno (C/N), balanceada que varió de 20.37 a 25.70. Asimismo, el contenido final de materia orgánica (M.O.) se mantuvo entre 73.00% y 78.00%, lo que consolidó un abono orgánico estable, inocuo y con un perfil mineral óptimo para la enmienda de suelos degradados y ácidos en sistemas agropecuarios de la región.

Además de la validación analítica, estos indicadores proyectaron un modelo de manejo de desechos orgánicos que optimiza la maduración y estabilidad del abono. Frente al T1, este manejo optimizó el 17.6 % en la relación C/N, un incremento de 6.4 % la de degradación y mineralización de la materia orgánica (MO) y reguló un del 3.7 % en el nivel de pH hacia valores moderados, sin requerir días adicionales de procesamiento. Con ello, se demostró la viabilidad de transferir estas competencias a productores ganaderos locales y comunidades de Alta Verapaz. Este enfoque integral promueve y dinamiza la adopción de prácticas agroecológicas que fortalecen la sostenibilidad sistémica del sector pecuario y dinamiza la economía circular en la región.

Palabras clave: *Eisenia foetida* Sav, biotecnología de residuos, biofertilizantes, economía circular y abonos orgánicos.

INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias a nivel mundial generan grandes volúmenes de desechos, provenientes tanto de los residuos de cosechas, como de las excretas del ganado bovino de carne y leche, y enfrentan el desafío de gestionarlos eficientemente. El manejo inadecuado de las excretas bovinas provoca problemas ambientales severos, como la contaminación de fuentes hídricas por escorrentía y lixiviación. Frente a esta realidad, las unidades de producción pecuaria deben establecer sistemas de producción sostenibles que mitiguen su impacto ecológico.

En armonía con esta problemática global, la legislación guatemalteca ambiental, exige una gestión estricta de los subproductos pecuarios para proteger y prevenir el deterioro de los ecosistemas de la región. El Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, "Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos", obliga a las unidades productivas a caracterizar y estabilizar los lodos y biosólidos antes de su disposición final. Esta normativa busca mitigar la eutrofización de los cuerpos hídricos mediante la reducción de la carga orgánica y patógena, por lo que sanciona el desecho directo de excretas sin previo tratamiento.

Bajo este marco normativo, la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto Número 68-86) establece que el Estado propiciará el aprovechamiento racional de los desechos para evitar la alteración de la calidad del suelo. Al emplear biotecnologías sostenibles en la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR; se responde directamente a esta normativa, al transformar un residuo regulado en una enmienda orgánica segura y de fácil aplicación. Bajo este enfoque, la economía circular surge como una estrategia para valorizar subproductos y reintegrar nutrientes esenciales a los ciclos agropecuarios de manera formal.

Para poner en práctica los principios de este modelo circular, entre las tecnologías biológicas más eficientes destaca el vermicompostaje, el cual utiliza a la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), para la estabilización de la materia orgánica. De acuerdo con

(Edwards 2011), este anélido posee una alta capacidad de ingesta y reproducción, lo que facilita la fragmentación mecánica de los residuos y acelera su descomposición. El paso del sustrato a través del tracto digestivo de la lombriz modifica la estructura física y química del estiércol, lo que transforma en un abono de alta calidad y reduce significativamente la acumulación de pasivos ambientales.

De manera complementaria a la actividad de este anélido, la incorporación de microorganismos eficientes (EM), optimiza el proceso de biodegradación al potenciar la actividad microbiológica nativa del sustrato. Estos consorcios microbianos actúan en las fases iniciales lo que acelera la hidrólisis y controla la proliferación de patógenos mediante la producción de ácidos orgánicos. (Villarreal-De la Cruz 2021), señala que la acción combinada de microorganismos y lombrices genera una sinergia que regula variables críticas como la temperatura, la humedad, el pH y la relación carbono/nitrógeno (C/N), con la cual se optimiza el tiempo total de estabilización.

La viabilidad técnica de esta complementariedad biológica resulta adecuada en el municipio de Cobán, Alta Verapaz, dado que las condiciones climáticas y la actividad ganadera local demandan alternativas tecnológicas adaptadas para el manejo de desechos orgánicos. La granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, genera efluentes y excretas ganaderas que requieren un procesamiento técnico y metodológico. Por tanto, establecer sistemas de biotransformación en dicha unidad permite validar alternativas ecológicas viables y transferibles según las condiciones ambientales y el marco regulatorio nacional.

A partir de esta necesidad técnico-ambiental, la presente investigación se planteó con el propósito de evaluar la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), en excretas bovinas en la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR. Durante 45 días experimentales, precedida por 30 días de precompostaje se evaluó la evolución fisicoquímica del sustrato, lo que permitió determinar los índices de madurez mediante la estabilización del pH, la reducción de la relación carbono/nitrógeno (C/N), la concentración de materia orgánica y el aporte final de macronutrientes.

A través de la sistematización y evaluación de estas variables temporales, fue posible validar la estabilización acelerada de los residuos bajo diferentes enfoques biotecnológicos. En consecuencia, los resultados obtenidos demostraron que la eficiencia del manejo de desechos no solo dependió de los agentes individuales, sino de la naturaleza de cada tratamiento. Mientras que las unidades evaluadas puramente con consorcios microbiológicos (tratamientos pares: T2, T4, T6 y T8), dependieron de una estabilización enzimática directa, los tratamientos combinados (T3, T5, T7 y T9), evidenciaron una dinámica simbiótica de predigestión al compararse con el testigo convencional de solo lombrices (T1).

Frente a este comportamiento diferenciado, la sinergia ocurrida en los tratamientos combinados se debió a que la inoculación microbiológica inicial con microorganismos eficientes (EM), que rompió las macromoléculas complejas de la excreta bovina (como celulosa y hemicelulosa), redujo la fitotoxicidad por amoníaco y debilitó las paredes celulares del sustrato. Esta fase preparatoria facilitó un alimento predigerido y asimilable para *Eisenia foetida* Sav., una condición que aceleró su ingesta y permitió que el tracto digestivo de la lombriz potenciara la humificación y el enriquecimiento enzimático final de manera más eficiente que en el sistema testigo tradicional (T1).

Al respecto a estas ventajas bioquímicas, (C. A. Edwards 2011), señaló que este tipo de tecnologías permitía mejorar los pastizales institucionales y disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos. De este modo, la validación de estos parámetros científicos, aportó una solución tangible a la mitigación de pasivos ambientales en el departamento de alta Verapaz (Morales-Vargas 2023), la implementación de este modelo técnico no solo optimizó los recursos locales de las fincas, sino que actuó como un motor de cambio en el entorno rural, el cual promovió la transición hacia una producción agropecuaria sostenible y alineada con la normativa ecológica vigente (MARN) 2021).

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO

1.1 Tema, subtema, objeto de investigación

1.1.1 Tema

Evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz.

1.1.2 Subtema

Manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), uso de microorganismos eficientes y lumbricultura

1.1.3 Objeto de investigación

Lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), microorganismos eficientes (EM) y excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L).

1.2 Delimitación

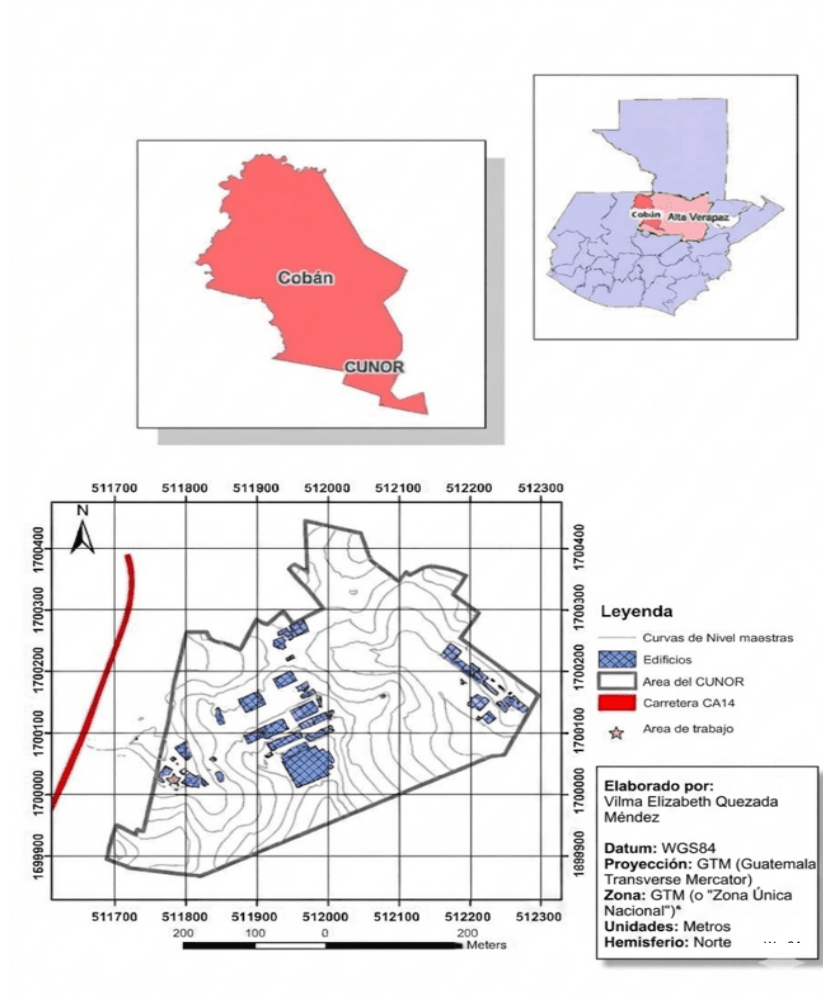
1.2.1 Delimitación en espacio físico-geográfico

La cabecera de Alta Verapaz, la constituye el municipio de Cobán, donde se ubica el Centro Universitario del Norte (CUNOR), lugar en el cual se llevó a cabo la investigación titulada “Evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia”. Este municipio se localiza al norte de Guatemala, a 212 km de la ciudad de Guatemala por la carretera CA-14, sus límites territoriales se establecen al norte con el departamento de Petén, al este con Izabal, al sur con Zacapa, El Progreso y Baja Verapaz, y al oeste con El Quiché.

1.2.1.1 Delimitación física

El Centro Universitario del Norte (CUNOR), perteneciente a la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC), se encuentra ubicado en 7a. calle 1-11 zona 6. Cobán, Alta Verapaz; en la latitud $15^{\circ}27'55''$ N y longitud $90^{\circ}23'17''$ O, con una extensión territorial de $1,919.49 \text{ m}^2$. Dentro de sus instalaciones se localizó la granja de la carrera de Zootecnia, espacio físico donde se llevó a cabo el desarrollo de la investigación.

Figura 1: Delimitación geográfica del área de investigación



Fuente: Vilma Quezada, 2025

1.2.2 Delimitación temporal

Se elaboró el proceso de anteproyecto establecido en un periodo de 6 meses, subdivididos en distintas fases de trabajo. Esto comprendió un análisis a profundidad de la problemática con el fin de generar una respuesta técnica.

- Protocolo (1 mes)
- Fase de campo precompostaje (1 mes)
- Fase de campo experimental (1.5 meses (45 días))
- Discusión de resultados y elaboración de informe (1 mes)

1.2.3 Delimitación semántica

Con el propósito de unificar los criterios técnicos y metodológicos de la presente investigación, se expusieron a continuación las definiciones conceptuales de los términos clave que se emplearon en el documento. Estos componentes teóricos facilitaron la comprensión precisa de los procesos abordados (Hernández-Sampieri 2018).

- **Biotransformación:** proceso mediante el cual los productos químicos xenobióticos (extraños) o endógenos se modifican enzimáticamente (se metabolizan) en productos químicos que difieren en su deposición (hidrofóbica vs. hidrofílica), actividad biológica (activación vs. desactivación) y toxicidad (destoxicación vs. intoxicación). (J. L. Rourke 2014).
- **Microorganismos eficientes:** microorganismos que forman parte de un consorcio microbiano que interactúa benéficamente con la flora microbiana de la rizosfera. Este producto comercial presenta una amplia gama de usos para diversos fines tales como el tratamiento de aguas residuales, alimentación ganadera y acuícola y principalmente en el “balance” de la microflora de los suelos en la agricultura. (Silva 2017).

- **Lombricultura:** biotecnología basada en el uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida* Sav), en el reciclaje de la materia orgánica, con el fin de obtener el denominado humus de lombriz, considerado como un fertilizante natural de primer orden. (Innovatione AgroFood Design 2019).

1.3 Antecedentes

Según el estudio experimental de (Gabriel 2011), realizado en la Estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa en La Paz, Bolivia, el uso de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), influye significativamente en el proceso de compostaje y vermicompostaje. Al evaluar diferentes tratamientos mediante pruebas fijas y repeticiones, los autores determinaron que las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) en la composición química de los bioabonos fueron bajas en el compostaje, pero alcanzaron niveles medios en el vermicompost.

En el informe final de (Medina 2017), desarrollado en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Tunja, Colombia). Se analizó la biotransformación de residuos orgánicos mediante lombricompostaje. A través de un enfoque cualitativo, la autora determinó que este proceso mitiga la contaminación ambiental, aporta nutrientes esenciales, restaura las condiciones fisicoquímicas del suelo y provee mejoramiento en la producción agropecuaria.

(Caicedo Delgado 2021), en su proyecto de grado para la Fundación Universidad de América en Bogotá, Colombia, realizaron una evaluación técnica de los métodos para la obtención de abono a partir de excretas bovinas en la finca el Mirador de las Marías, ubicada en Guaduas. Mediante un análisis bibliométrico, los

autores determinaron que las excretas generadas no poseen la relación (C/N), ideal para iniciar los procesos de digestión aerobia o anaerobia, lo que hizo estrictamente necesaria la adición de reguladores o co-sustratos.

(López García 2022), en su investigación de tesis para el Centro Universitario del Suroccidente (CUNSUROC), de la Universidad San Carlos de Guatemala, evaluó diferentes estimulantes biológicos y químicos para acelerar el proceso de descomposición de residuos orgánicos. Mediante un diseño de estudio transversal, la investigadora determinó que la aplicación de microorganismos de montaña (MM), presentó la mayor eficiencia y logró descomponer los residuos orgánicos, en un periodo de 66 días.

En su investigación para el Centro Universitario del Suroccidente (CUNSUROC), de la Universidad San Carlos de Guatemala, (Monterrosa Calderón 2022), evaluó el efecto de microorganismos en la elaboración de lombricompost y su aplicación combinada con fertilizantes químicos, sobre el cultivo de pasto Cuba 22 (*Pennisetum purpureum*). Mediante un estudio experimental, la investigadora concluyó que los tratamientos con abono orgánico optimizaron el rendimiento del forraje, registrando producciones de 10.93 y 8.49 kg, así como longitudes promedio de 2.28 y 2.33m por macolla, respectivamente.

1.4 Planteamiento del problema

En la actualidad, los sistemas de producción animal intensivos propician el acumulo de excretas, un recurso orgánico que, al ser gestionado de manera deficiente, provoca graves consecuencias ecológicas. Al respecto (Almagro 2025), señala que este manejo inadecuado altera la composición química del suelo, afecta la vegetación local e introduciendo patógenos y contaminantes al entorno. Asimismo, cuando se introducen animales de granja se rompe el equilibrio de las cadenas tróficas locales y desplaza a las especies autóctonas, al degradar sus hábitats naturales.

Ante esta problemática, se crearon e implementaron alternativas de biotecnología en la unidad productiva y se volvieron importantes para mitigar el impacto ambiental en el entorno natural y preservar la estabilidad del ecosistema.

Sorprendentemente, las excretas bovinas no se aprovechan para prácticas agroecológicas sostenibles, como el compostaje y lombricompostaje que permiten transformar estos residuos, en enmiendas orgánicas mejoradoras de las propiedades fisicoquímicas y biológicas los suelos degradados. En el ámbito de enseñanza aprendizaje, la utilización de estos bioabonos en bancos forrajeros y jardín de plantas forrajeras, no solo optimizan la fertilidad del suelo cultivado, sino se constituyen en un modelo pedagógico y de sostenibilidad ambiental.

1.4.1 Pregunta general de investigación

¿Qué tan eficiente es la acción biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz?

1.4.2 Preguntas específicas de investigación

- ¿Cuál es el tratamiento con menor tiempo de biodegradación?
- ¿Qué tratamiento presenta mejores características fisicoquímicas según análisis de laboratorio?
- ¿Qué tratamiento presenta el menor costo de producción?
- ¿Cuánto incrementó la cantidad de biomasa durante el proceso de investigación?
- ¿Cuál es la relación C:N al finalizar la etapa compostaje?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM), para el manejo

sostenible de excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Determinar las variaciones en el pH, temperatura y porcentaje de humedad, durante el proceso de biodegradación de los sustratos.
- b. Determinar el tratamiento con menor tiempo de biodegradación e identificarlo.
- c. Realizar análisis fisicoquímico del sustrato de cada tratamiento y conocer los porcentajes de nutrientes y calidad final del producto biotransformado para su uso como abono orgánico.
- d. Medir la biomasa de lombriz coqueta roja, en cada tratamiento al final de la investigación.
- e. Realizar un análisis de costo beneficio de cada uno de los tratamientos.
- f. Proponer estrategias de manejo sostenible de las excretas ganaderas basadas en los resultados de la biotransformación, para su implementación en la granja de Zootecnia del CUNOR.

1.6 Justificación

En la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, Cobán, Alta Verapaz, las excretas bovinas se han convertido en un recurso subutilizado. Actualmente, su acumulación genera lixiviados e infiltración de nitrógeno (N) y fósforo en el recurso edáfico, lo que provoca la contaminación directa de un pequeño riachuelo que nace dentro de las instalaciones y atraviesa diversas colonias del municipio. A esto se le suma la emisión de malos olores y la proliferación de vectores, factores que alteran la calidad de vida de las familias residentes en áreas colindantes.

Como respuesta a esta problemática, la presente investigación propone la biotransformación de este pasivo ambiental mediante la acción combinada de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM). Esta alternativa biotecnológica permite el reciclaje de nutrientes *in situ*, disminuye el

desperdicio de materia orgánica y previene la contaminación del ecosistema acuático colindante por lixiviación o volatilización. Asimismo, el abono orgánico resultante será incorporado en las parcelas destinadas a la siembra de forrajes de la misma granja, mejorando las propiedades físicas del suelo y optimiza la base alimenticia de los rumiantes de la unidad.

El Centro Universitario del Norte cuenta con las condiciones adecuadas, la infraestructura necesaria, el recurso humano y el volumen de deyecciones requerido para garantizar la viabilidad y ejecución de este modelo. Esta capacidad institucional no solo asegura la ejecución técnica y ambiental del proyecto, sino que genera simultáneamente un impacto positivo en los beneficiarios directos del entorno. Desde una perspectiva educativa, la fase experimental se constituye como un modelo demostrativo que dinamiza el proceso de enseñanza-aprendizaje y convierte un problema ecológico local en un valioso recurso didáctico que fomenta la investigación estudiantil.

Asimismo, en cumplimiento con la extensión universitaria, este esquema biotecnológico es altamente replicable para estudiantes, técnicos y productores de unidades comerciales de ganado bovino lechero de la meseta central de Alta Verapaz. Su implementación práctica promueve de manera directa la transición de la ganadería regional hacia modelos de economía circular, con el fin de fortalecer la sostenibilidad agropecuaria y el aprovechamiento de recursos en la zona.

1.7 Limitaciones y viabilidad de la investigación

1.7.1 Limitaciones

Las limitaciones constituyeron factores que pudieron afectar la validez, el alcance o la generalización de los resultados del estudio. Para la presente investigación, estas limitaciones se definieron de la siguiente manera:

- **Variabilidad del clima:** Cobán, Alta Verapaz cuenta con un clima variable, puede ser fresco y nublado por las mañanas y noches, con una

- temperatura entre 13 -18°C, la cual asciende en las tardes hasta los 34°C en época de verano, con lluvias y granizo ocasionales.
- **Grado de humedad relativa:** la humedad relativa en Cobán, A.V, se considera elevada, en el mes de abril se tuvo el valor más bajo con 78.86% y en el mes de septiembre se tuvo el valor más alto con 90.61% (INSIVUMEH 2022)
- **Ataque de plagas:** si las condiciones ambientales varían, algunos roedores menores (ratones), insectos (hormigas, moscas o tijeretas), gusanos planos e incluso algunos pájaros podrían invadir la lombricompostera y alimentarse de las lombrices, lo que alteraría el resultado de la investigación.
- **Variación etaria de lombrices:** el peso de un kilogramo de lombrices, incluyó individuos en distintas etapas de desarrollo: especímenes inmaduros, adultos en etapa reproductiva y cocones próximos a la eclosión.

1.7.2 Viabilidad de la investigación

La investigación resultó viable debido a la disponibilidad de excretas bovinas y lombrices coqueta roja dentro del área de investigación, por lo que el costo de ejecución fue reducido y el tiempo durante la fase de experimentación fue relativamente corto en condiciones controladas.

Los microorganismos eficientes EM se adquirieron en el mercado nacional y se aplicaron según las especificaciones de la casa comercial distribuidora.

1.8 Marco teórico conceptual

1.8.1 Biotransformación o modificación enzimática

El metabolismo o biotransformación constituye el conjunto de procesos bioquímicos mediante los cuales los xenobióticos y compuestos endógenos se modifican estructuralmente para incrementar su hidrosolubilidad y facilitar su posterior excreción. Este sistema multienzimático se desarrolla preferentemente

en el tejido hepático y se organiza a través de dos fases metabólicas interconectadas. La Fase I, mediada de forma predominante por la superfamilia del citocromo P450 (CYP450), se encarga de introducir o exponer grupos funcionales polares mediante reacciones de oxidación, reducción e hidrólisis. (Guengerich 2022)

Posteriormente, la Fase II neutraliza la reactividad de los intermediarios mediante reacciones de conjugación con moléculas endógenas hidrofílicas, (como el ácido glucurónico, el glutatión o el sulfato), para garantizar su eliminación, según (Almazroo 2017), lejos de ser un mecanismo de detoxificación pasiva, la eficiencia cinética y la direccionalidad de este complejo sistema determina la permanencia de la sustancia y su destino biotóxico en el organismo. En este sentido, el balance armónico entre ambas fases metabólicas es crítico. Ya que cualquier asimetría funcional altera por completo la seguridad del proceso.

Sin embargo, este equilibrio es altamente vulnerable; las variaciones en la expresión enzimática específicas de cada especie, o bien las interferencias por co-exposición, pueden desviar el proceso hacia la bioactivación metabólica. Este fenómeno transforma compuestos estables en metabolitos altamente electrofílicos y reactivos. Dichos intermediarios poseen la capacidad de unirse covalentemente a macromoléculas celulares vitales como el ADN, desencadenando cascadas de estrés oxidativo, citotoxicidad generalizada, mutagénesis o respuestas inmunomediadas severas (Guengerich 2022).

1.8.2 Compostaje

Es la descomposición de la materia orgánica por organismos descomponedores (bacterias, hongos) y por animales detritívoros, como lombrices y escarabajos que tiene como resultado un producto fertilizante y regenerador del suelo de alta calidad denominado compost. Puede ser de 3 tipos:

- **Compostaje doméstico:** se realiza a partir de una cantidad reducida de residuos producidos en cocina o jardín, sin necesidad de transporte o aparatos complejos. El compost producido debe ser de utilización inmediata.
- **Compostaje comunitario:** se denomina comunitario cuando se realiza en un espacio público accesible para diversos usuarios. Se practica en escuelas, jardines, bloques de vivienda con espacios comunes. Al igual que el domestico se realiza mediante residuos de cocina y jardinería.
- **Vermicompostaje o lombricompostaje:** el vermicompost, también conocido en la literatura técnica como lombricomposta (según se haga referencia al producto o al proceso bio-oxidativo), constituye un abono orgánico estable y maduro. (Domínguez 2023). Para efectos de la presente investigación, se utilizará el término **vermicompost** de manera homóloga para describir este recurso biotecnológico. descomposición de la materia orgánica por organismos descomponedores (bacterias, hongos) y por animales detritívoros, como lombrices y escarabajos que tiene como resultado un producto fertilizante y regenerador del suelo de alta calidad denominado compost. (Composta en Red 2021).

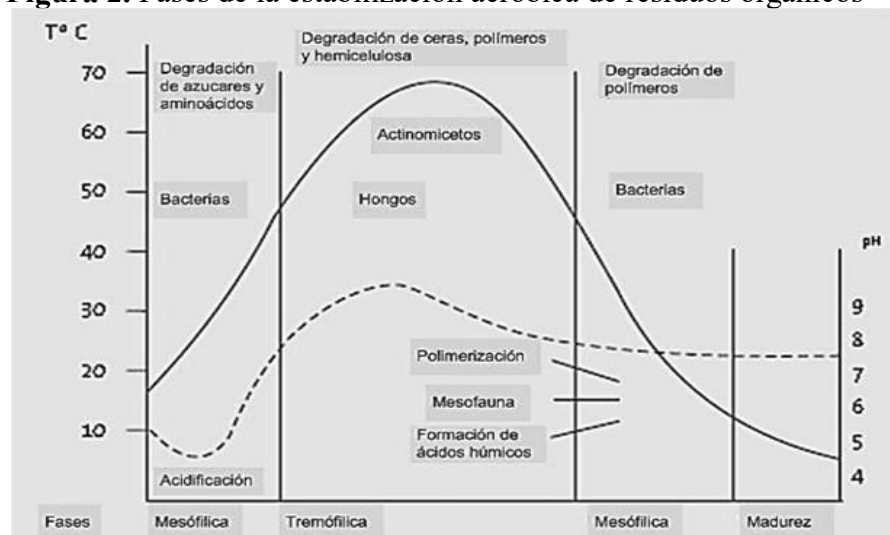
1.8.3 Las cuatro fases del compostaje:

El proceso de estabilización de la materia orgánica se desarrolló por una dinámica microbiológica dividida en etapas claramente diferenciadas. Este comportamiento dinámico se completó mediante el desarrollo de las siguientes cuatro fases:

- **Fase mesófila:** mezcla de primeras materias en temperatura ambiente y sin humedecer, iniciando un proceso de reproducción descomponiendo moléculas orgánicas, dicha actividad metabólica aumenta la temperatura a 40-45°C en un periodo de 2 a 8 días, disminuyendo a su vez el pH de la mezcla a causa de la producción de ácidos orgánicos.

- **Fase termófila o de higienización:** se produce una elevación considerable de temperatura a más de 45°C, donde los microorganismos mesófilos son sustituidos por termófilos, quienes descomponen fuentes complejas de carbono. El nitrógeno se transforma en amoníaco y el pH se vuelve alcalino. A partir de los 60° inicia la etapa termófila del proceso, este proceso puede durar de días a meses.
- **Fase de enfriamiento:** al consumirse el carbono y el nitrógeno por completo, la temperatura disminuye hasta los 40 - 45°C. Los mesófilos vuelven a surgir descomponiendo el material restante de celulosa y lignina. El pH desciende ligeramente.
- **Fase de maduración:** en esta etapa la mezcla llega a temperatura ambiente. Ocurren una serie de reacciones secundarias que provocan condensación y polimerización del humus. Al finalizar este proceso se obtiene un producto final denominado compost. (Compost Segriá 2020)

Figura 2. Fases de la estabilización aeróbica de residuos orgánicos



Fuente: Reproducido de Román, Martínez y Pantoja (2013,25).

1.8.4 Beneficios del compostaje

Los residuos orgánicos producidos se reducen por medio del compostaje y a su vez son aprovechados para producir enmiendas correctoras del suelo, por su aporte de nutrientes. Este proceso es un ejemplo concreto de economía circular, tanto en unidades productivas como en los hogares, evitando que sean vertidos en basureros locales (Sánchez 2021). De este modo, la reincorporación de subproductos optimiza los ciclos biológicos y disminuye la huella ecológica de la actividad agropecuaria.

Por su parte, el compostaje es el proceso biotransformador natural del material orgánico en fertiabono mejorador de las características fisicoquímicas del suelo donde es aplicado (Azim 2018). Esta estabilización biológica no solo incrementa la disponibilidad de macronutrientes esenciales, sino que favorece la estructura edáfica. Al potenciar la retención de humedad y la aireación, se consolida como una alternativa sostenible para el manejo in situ de pasivos ambientales.

- Previene la erosión del suelo: aglutina el suelo, aumentando la infiltración y ralentizando el flujo superficial del agua.
- Ayuda en la gestión de aguas pluviales: controla los flujos de agua sobre y a través del suelo.
- Promueve el crecimiento saludable de las plantas: mejora la capacidad del suelo para retener nutrientes mediante el intercambio catiónico y proporciona los nutrientes necesarios para las plantas en forma de nitrógeno, potasio y fósforo.

La incorporación de compost maduro al suelo puede mitigar o suprimir la necesidad de fertilización complementaria durante un periodo de 6 a 12 meses posteriores a su aplicación (US Composting Council 2018). Esta dinámica se atribuye a que las enmiendas orgánicas liberan nutrientes esenciales de forma gradual mediante un proceso continuo de mineralización. Esto garantiza una

disponibilidad constante para el sistema radicular y reduce significativamente el desplazamiento de elementos móviles como el nitrógeno, previniendo su pérdida por lixiviación (Cesaro 2022) (Martínez-Blanco 2023).

- **Conserva el agua:** promueve una mayor infiltración, evitando que el agua fluya lateralmente del terreno y potencialmente llegue a los desagües pluviales o alcantarillados. Obteniendo así una mejor absorción y se transfiere de manera eficiente dentro del suelo, conservando mayor cantidad de agua para su uso productivo.
- **Reduce los residuos:** evita que residuos orgánicos del hogar y jardinería acaben en vertederos, donde se descompondrían de forma improductiva, generando metano.
- **Combate el cambio climático:** reduce la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y aumenta la resiliencia de los ecosistemas al aumento de las temperaturas.
- **Reduce los costos de mantenimiento en proyectos:** esto se debe a que promueve el crecimiento saludable de las plantas, reduciendo la mortalidad y los costos de reemplazo. Además, el compost promueve la resistencia a la sequía, lo que reduce los costos de riego artificial. (US Composting Council 2018).

1.8.5 Monitoreo durante el compostaje

El compostaje constituye un proceso eminentemente biológico y controlado, cuya eficiencia depende de la actividad metabólica de consorcios microbianos nativos; por tanto, es mandatorio regular los parámetros fisicoquímicos que condicionan su cinética de crecimiento y reproducción (M. Pilar Román 2019). Estos factores críticos incluyen la aireación u oxígeno disuelto, la humedad del sustrato, la evolución de la temperatura, el pH y la relación carbono-nitrógeno (C: N).

A nivel operativo, el desarrollo de la biotransformación dependerá en gran medida de las condiciones climáticas del entorno, el sistema tecnológico utilizado y la heterogeneidad de las materias primas empleadas; variables que pueden provocar fluctuaciones dinámicas en dichos parámetros (Azim et al. 2018). Por consiguiente, se requiere un monitoreo y vigilancia constante de estas variables para asegurar que permanezcan dentro de los rangos óptimos requeridos para cada fase térmica del proceso (M. M. Pilar Román 2019).

1.8.5.1 Oxígeno

El compostaje es un proceso estrictamente aerobio, por lo que se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración activa de los microorganismos, lo que resulta en la liberación de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua a la atmósfera. Una aireación óptima evita la compactación del material y el encharcamiento del sustrato. Estas necesidades de oxígeno fluctuarán durante las etapas del proceso, alcanzando su máxima tasa de consumo durante la fase termofílica (M. M. Pilar Román 2019).

La saturación de oxígeno en el medio interior no debe descender del 5 %, situándose el nivel óptimo alrededor del 10 %. Un exceso de aireación provocaría un descenso acelerado de la temperatura y una pérdida severa de humedad por evaporación, deteniendo la descomposición por estrés hídrico. Por el contrario, una aireación deficiente impide la evaporación del agua, generando un exceso de humedad y sumergiendo al sistema en un ambiente de anaerobiosis (M. M. Pilar Román 2013). En estas condiciones de anoxia, se desencadena la producción de malos olores y una marcada acidez debido a la síntesis y acumulación de compuestos volátiles como el ácido acético, el ácido sulfhídrico (H_2S) y el metano (CH_4) (Sánchez 2021).

Tabla 1. Control de aireación

Porcentaje de aireación	Problema		Soluciones
<5 %	Baja aireación	Insuficiente evaporación de agua, generando exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis.	Volteo de la mezcla y/o adición de material estructurante que permita la aireación.
5 % - 15 % rango ideal			
>15 %	Baja aireación	Descenso de temperatura y evaporación del agua, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua.	Picado del material a fin de reducir el tamaño de poro y así reducir la aireación. Se debe regular la humedad, bien proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua (restos de fruta y verduras, césped, purines u otros)

Fuente: Adaptado de *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

1.8.5.2 Dióxido de carbono (CO₂)

Durante el compostaje, el dióxido de carbono (CO₂) se libera como consecuencia directa de la respiración heterótrofa de las comunidades microbianas. Por lo tanto, su tasa de concentración y desprendimiento fluctúa en función de la actividad biológica y de la biodisponibilidad de la materia prima utilizada (Awasthi 2020). En términos cuantitativos, durante las fases de mayor dinamismo metabólico, se estiman tasas de generación que oscilan entre 2 y 4 kg de CO₂ por tonelada de residuo por hora (US Composting Council 2018).

No obstante, el CO₂ derivado de este proceso biogénico es considerado de bajo impacto ambiental o carbono neutral dentro de los inventarios globales de gases de efecto invernadero. Esto se debe a que forma parte del ciclo corto del carbono y es subsecuentemente recapturado por la biomasa vegetal mediante la fotosíntesis (H. R. Sánchez 2021). De este modo, el balance de emisiones se mantiene en equilibrio dinámico con el entorno agronómico.

1.8.5.3 Humedad

La humedad óptima para el desarrollo del compostaje se sitúa en un rango cercano al 55 %, aunque este valor presenta variaciones supeditadas al estado físico, la granulometría de las partículas y el sistema tecnológico empleado para la aireación del sustrato (M. M. Pilar Román 2013).

Si el contenido de humedad desciende por debajo del 45 %, se induce una desaceleración drástica de la actividad microbiana que impide la compleción de las fases térmicas de degradación, dando como resultado un producto final biológicamente inestable y fitotóxico (Azim 2018).

Por el contrario, si la humedad es excesivamente alta, superando el 60 %, el agua libre satura los espacios porosos interparticulares, bloqueando los canales de transferencia gaseosa e interfiriendo de forma crítica en la oxigenación y el mantenimiento de la aerobiosis del material (Onwosi 2021).

El rango óptimo de humedad para el proceso de compostaje se sitúa entre el 45 % y el 60 % de agua en peso respecto al material base. Una metodología empírica y ampliamente difundida en el monitoreo de campo es la denominada “técnica del puño”, la cual consiste en extraer una muestra manual del sustrato desde el interior de la pila y comprimirla firmemente. (M. M. Pilar Román 2013).

Bajo condiciones óptimas, el material debe permanecer compactado o apelmazado sin llegar a segregarse o escurrir agua libre. Si se observa un escurrimiento evidente, se manifiesta un exceso hídrico que debe corregirse mediante el volteo mecánico de la pila o la adición de materiales estructurantes secos como aserrín o paja.

Por el contrario, si al abrir la mano el material se disgrega o queda suelto, se evidencia un déficit de humedad que requiere la incorporación de agua o el aporte de sustratos frescos y succulentos, tales como restos de hortalizas o forraje verde. (M. M. Pilar Román 2013).

Tabla 2 Parámetros óptimos de humedad

Porcentaje de humedad	Problema		Soluciones
<45 %	Humedad Insuficiente	Puede detener el proceso de compostaje por falta de agua para los microorganismos.	Se debe regular la humedad, ya sea proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua (restos de fruta y verduras, césped, purines u otros)
45 % - 60 % rango ideal			
>60 %	Oxígeno insuficiente	Material muy húmedo, el oxígeno queda desplazado. Puede dar lugar a zonas de anaerobiosis.	Volteo de la mezcla o adición de material con bajo contenido de humedad y con alto valor en carbono, como serrines, paja u hojas secas.

Fuente: Manual de compostaje del agricultor, FAO

1.8.5.5 Temperatura

La temperatura tiene un amplio rango de variación en función de la fase del proceso. El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65°C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), para llegar nuevamente durante la fase de maduración a una temperatura ambiente. Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que, a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización.

Tabla 3. Parámetros de temperatura óptimos

Temperatura (°C)	Problema		Soluciones
Bajas temperaturas (T° ambiente < 35°C)	Humedad insuficiente	La falta de humedad disminuye la actividad metabólica y, por tanto, la temperatura baja.	Humedecer el material o añadir material fresco con mayor porcentaje de humedad (restos de fruta y verduras, u otros).
	Material insuficiente	Insuficiente material o forma de la pila inadecuada para que alcance una temperatura adecuada.	Añadir más material a la pila de compostaje.
	Déficit de nitrógeno o baja C: N	La pila demora en incrementar la temperatura más de una semana.	Añadir material con alto contenido de N como estiércol.
Altas temperaturas (T ambiente >70°C)	Ventilación y humedad insuficiente	La temperatura es demasiado alta y se inhibe el proceso de descomposición.	Volteo y verificación de la humedad (55-60 %). Adición de material con alto contenido en carbono de lenta degradación (madera, o pasto seco).

Fuente: Adaptado de *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

1.8.5.6 pH

El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4.5 a 8.5). En los primeros estadios del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio (NH_4^+), en amoníaco (NH_3), el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro.

El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0- 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2.

Tabla 4. Parámetros de pH óptimos

pH	Causas asociadas		Soluciones
<4.5	Exceso de ácidos orgánicos	Los materiales vegetales como restos de cocina, frutas, liberan muchos ácidos orgánicos y tienden a acidificar el medio.	Adición de material rico en nitrógeno hasta conseguir una adecuada relación C: N.
4,5 – 8,5 rango ideal			
>8.5	Exceso de nitrógeno	Cuando hay un exceso de nitrógeno en el material de origen, con una deficiente relación C: N, asociado a humedad y altas temperaturas, se produce amoníaco (NH ₃), alcalinizando el medio.	Adición de material más seco y con mayor contenido en carbono (restos de poda, hojas secas, aserrín)

Fuente: *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

1.8.5.7 Relación carbono – nitrógeno (C: N)

La relación C: N varía en función del material de partida y se obtiene la relación numérica al dividir el contenido de C (%C total), sobre el contenido de N total (%N total) de los materiales a compostar.

Esta relación también varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1.

Tabla 5. Parámetros de relación carbono: nitrógeno

C:N	Causas asociadas		Soluciones
>35:1	Exceso de carbono	Existe en la mezcla una gran cantidad de materiales ricos en carbono. El proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse	Adición de material rico en nitrógeno hasta conseguir una adecuada relación C:N.
15:1 – 35:1 Rango ideal			
<15:1	Exceso de nitrógeno	En la mezcla hay una mayor cantidad de material rico en nitrógeno, el proceso tiende a calentarse en exceso y se generan malos olores por el amoníaco (NH ₃), liberado.	Adición de material con mayor contenido en carbono (restos de poda, hojas secas, aserrín)

Fuente: Adaptado de *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

Tabla 6. Relación C:N de algunos materiales utilizados en el compostaje

Nivel alto de nitrógeno 1:1 – 24:1		C:N equilibrado 25:1 – 40:1		Nivel alto de carbono 41: 1 – 1000:1	
Material	C:N	Material	C:N	Material	C:N
Purines frescos	5:1	Estiércol vacuno	25:1	Hierba recién cortada	43:1
Gallinaza pura	7:1	Hojas de frijol	27:1	Hojas de árbol	47:1
Estiércol porcino	10:1	Crotalarina	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Desperdicios de cocina	14:1	Pulpa de café	29:1	Cascarilla de arroz	66:1
Gallinaza camada	18:1	Estiércol ovino/caprino	32:1	Paja de arroz	77:1
		Hojas de plátano	32:1	Hierba seca (gramíneas)	81:1
		Restos de hortalizas	37:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
		Hojas de café	38:1	Mazorca de maíz	117:1
		Restos de poda	44:1	Paja de maíz	312:1
				Aserrín	638:1
				Basura urbana fresca	61:1

Fuente: Adaptado de PNUD- INFAT (2002)

1.8.5.8 Tamaño de partículas

La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato. Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm.

La densidad del material, y por lo tanto la aireación de la pila, están estrechamente relacionados con el tamaño de la partícula, siendo la densidad aproximadamente 150 -250 kg/m³, conforme avanza el proceso de compostaje, el tamaño disminuye y, por tanto, la densidad aumenta, 600-700 kg/m³. (M. M. Pilar Román 2019).

Tabla 7. Control del tamaño de las partículas

Parámetro	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica II (2-5 semanas)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C:N	25:1 – 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55%	30% - 40%
Concentración de oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	<1,6 cm
pH	6.5 – 8.0	6.0 – 8.5	6.5 – 8.5
Temperatura	45 – 60°C	45°C – temperatura ambiente	Temperatura ambiente
Densidad	250-400 kg/m ³	<700 kg/m ³	<700 kg/m ³
Materia orgánica (base seca)	50%-70%	>20%	>20%
Nitrógeno total (base seca)	2.5 – 3%	1 – 2%	~1%

Fuente: Adaptado de *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

Tabla 8. Parámetros del compostaje

Tamaño de las partículas (cm)	Problemas		Soluciones
>30 cm	Exceso de aireación	Los materiales de gran tamaño crean canales de aireación que hacen bajar la temperatura y desaceleran el proceso.	Picar el material hasta conseguir un tamaño medio de 10-20 cm
5-30 cm rango ideal			
< 5 cm	Compactación	Las partículas demasiado finas crean poros pequeños que se llenan de agua, facilitando la compactación del material y un flujo restringido del aire, produciéndose anaerobiosis.	Volear o añadir material de tamaño mayor y volteos para homogenizar

Fuente: Adaptado de *Manual de compostaje del agricultor*, FAO

1.8.6 Higienización e inocuidad

Durante la fase termofílica del compostaje se destruyen las bacterias patógenas y los parásitos presentes en los residuos de partida, asegurando que el producto maduro no contenga compuestos tóxicos para las plantas o el ambiente. Esta inocuidad biológica depende directamente de la interacción entre la temperatura alcanzada por la biomasa, la humedad, la aireación y el tamaño de la partícula (M. M. Pilar Román 2013). En una pila con condiciones óptimas, la actividad microbiana incrementa la temperatura de forma diferencial, registrándose lecturas más altas en el núcleo interno que en la periferia.

Por lo tanto, la ejecución periódica de volteos mecánicos es indispensable para homogeneizar tanto la temperatura como la humedad en todo el perfil de la pila, garantizando así la eliminación uniforme de los agentes patógenos. No obstante, la eficiencia de esta sanitización también está supeditada a la carga microbiológica inicial del sustrato. Si la concentración de patógenos en el estiércol fresco es severa, se requerirá un periodo térmico más prolongado para asegurar la completa desinfección y madurez del fertiabono. (M. M. Pilar Román 2013).

Tabla 9. Temperatura necesaria para la eliminación de algunos patógenos

Microorganismos	Temperatura	Tiempos de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55°C	1 hora
	65°C	15-20 minutos
<i>Escherichia coli</i>	55°C	1 hora
	65°C	15 – 20 minutos
<i>Brucella abortus</i>	55°C	1 hora
	62°C	3 minutos
<i>Parvovirus bovino</i>	55°C	1 hora
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	55°C	3 días

Fuente: Adaptado de Jones and Martín, 2003.

1.8.7 Lombricultura

Constituye una técnica biotecnológica fundamentada en el manejo zootécnico de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), para la valorización y reciclaje acelerado de subproductos orgánicos. Mediante una acción sinérgica entre el aparato digestivo del anélido y las comunidades microbianas nativas, se estabiliza la materia prima y se mitiga la carga patógena del sustrato. Este proceso bio-oxidativo optimiza la degradación de polímeros complejos presentes en las deyecciones, acelerando notablemente las tasas de mineralización del carbono y del nitrógeno en comparación con los métodos de compostaje convencionales. (Innovatione AgroFood Design 2019).

Como resultado final de esta biotransformación, se obtiene el vermicompost o humus de lombriz, un abono orgánico maduro considerado un fertilizante natural de primer orden debido a sus excepcionales propiedades bioestimulantes. Este producto se caracteriza por una alta porosidad, capacidad de retención de agua y una rica carga de fitohormonas y nutrientes altamente asimilables para los sistemas radicales. Su incorporación al recurso edáfico no solo mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, sino que suprime agentes fitopatógenos y dinamiza la actividad biológica del entorno. (Innovatione AgroFood Design 2019).

1.8.7.1 Importancia de la lombricultura

Radica principalmente en dos aspectos: desde el punto de vista ecológico permite reciclar los desechos orgánicos procedentes de las diferentes actividades que desarrolla el hombre como: agricultura, ganadería, agroindustria y basura de las ciudades; y desde el punto de vista económico como una actividad empresarial de baja inversión, mínimo riesgo, fácil administración y alta rentabilidad. (Sales 2021).

1.8.7.2 Lombriz coqueta roja o roja californiana (*Eisenia foetida* Sav)

La lombriz roja californiana es la más usada en el proceso de compostaje ya que de ellas se obtiene humus un tipo de abono. Este es el resultado del proceso de digestión que hace la lombriz al alimentarse de materia orgánica, transformando residuos en recursos.

Consume diariamente una cantidad de residuos equivalente, prácticamente, a su propio peso. Esta especie requiere de altas concentraciones de materia orgánica como medio de vida y alimentación, por lo que no sobreviven mucho tiempo en suelos con bajos porcentajes de materia orgánica.

Principales características de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav)

- Prolífica.
- Vive y se reproduce en cautiverio, así mismo puede vivir en grandes densidades.
- Acepta todo tipo de desechos orgánicos.
- Capacidad en la fabricación de humus, el 60 % del alimento que ingiere lo excreta en forma de humus.
- Tamaño pequeño y manejable, mide entre 6 a 10 cm de longitud.
- Se reproduce y vive un promedio de 16 años.
- Su peso máximo es de un gramo.

- Respira a través de la piel, por esta razón es muy importante que los lechos mantengan adecuada humedad.
- A los 3 meses, puede iniciar a reproducirse.
- Posee una protuberancia tipo anillo, llamado clitelo, que sólo se aprecia en individuos adultos.
- Se adaptan a temperaturas que oscilan entre los 12 – 32°C, siendo óptima para su desarrollo una temperatura entre 20 – 25°C.
- Consume el equivalente al peso de su cuerpo.

(USAID 2021).

1.8.7.3 Clasificación taxonómica de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav).

El ordenamiento sistemático de este anélido permitió determinar su posición filogenética y comprender las adaptaciones fisiológicas particulares que presenta estímulos ambientales. De este modo, la ubicación taxonómica de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Savigny, 1826), de la siguiente manera.

- **Reino:** animalia
- **Subreino:** Eumetazoa
- **Phylum:** Annelida
- **Clase:** Clitellata (subclase Oligochaeta)
- **Orden:** Opisthopora
- **Familia:** Lumbricidae
- **Género:** *Eisenia*
- **Especie:** *Eisenia foetida* (Savigny, 1826)

1.8.7.4 Características anatómicas de *Eisenia foetida* Savigny

Las lombrices de tierra se agrupan taxonómicamente dentro de la subclase de los oligoquetos, término derivado de las raíces griegas *oligos* (escaso) y *chaite* (pelo o cerda), en alusión directa a las hileras de quetas diminutas distribuidas en las regiones ventral y lateral de su anatomía, las cuales actúan como puntos de anclaje mecánico durante la locomoción (Edwards 2011). Desde una perspectiva histológica, la estructura de la pared corporal se organiza de forma concéntrica en sentido centrípeto (de afuera hacia adentro) a través de los siguientes estratos (Domínguez 2023) (Shuldt 2022).

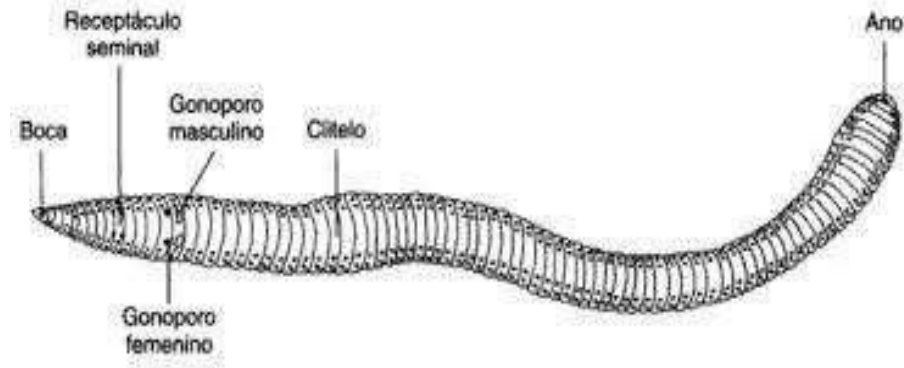
- **Cutícula exterior:** capa acelular, elástica y sumamente delgada, impregnada con colágeno para conferir protección mecánica.
- **Epidermis:** epitelio monoestratificado cilíndrico que alberga células glandulares especializadas en la síntesis y secreción de moco (para optimizar la respiración cutánea y reducir la fricción) y fluidos serosos; en este estrato se localizan además los pigmentos de porfirina que le otorgan su coloración marrón brillante característica.
- **Túnicas musculares:** dispuestas en dos capas antagónicas bien diferenciadas; una capa externa de fibras musculares circulares y una capa interna, significativamente más gruesa, de fibras musculares longitudinales.
- **Peritoneo somático:** epitelio escamoso simple que constituye la barrera celular más interna de la pared corporal, delimitando de forma externa la cavidad celómica.
- **Celoma:** cavidad corporal verdadera rellena de líquido celómico hidrostático, la cual se extiende de manera longitudinal a lo largo de los metámeros del organismo y envuelve periféricamente al tracto digestivo.

El cuerpo de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) presenta una segmentación homónoma, tanto externa como interna, característica morfológica distintiva de los anélidos. Un espécimen adulto maduro posee un rango promedio de 95 a 120 segmentos o metámeros, los cuales exhiben una especialización funcional supeditada a su localización anatómica (Edwards 2011).

Su locomoción depende de un esqueleto hidrostático, donde el desplazamiento es coordinado mediante cambios hidrodinámicos en la forma y volumen de los segmentos celómicos. Cada metámero constituye una cavidad interna hermética llena de líquido celómico, rodeada de forma antagónica por dos sistemas musculares: fibras circulares externas y longitudinales internas (Domínguez 2023). La contracción concertada de los músculos circulares elonga y adelgaza el cuerpo, permitiendo proyectar el extremo anterior hacia los intersticios del sustrato; posteriormente, la contracción de los músculos longitudinales engrosa y acorta el soma, ensanchando la galería y consolidando el avance del organismo en el suelo (Edwards 2011).

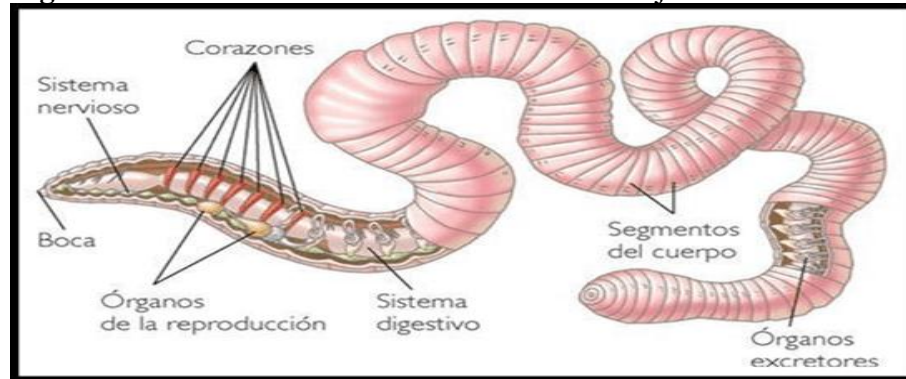
En el segmento inicial o cefálico se localiza la apertura bucal, resguardada dorsalmente por el prostomio, un lóbulo musculoso y carnoso altamente sensible. Este apéndice posee la facultad de retraerse para sellar la cavidad bucal o extenderse activamente con la finalidad de explorar y sondear las propiedades físicas del entorno inmediato (J. M.-B. Domínguez 2018). Con excepción del segmento bucal (peristomio) y la región anal (pigidio), cada anillo corporal está dotado de ocho quetas o sedas retráctiles de naturaleza quitinosa, las cuales actúan como estructuras de anclaje mecánico contra las superficies del sustrato durante el ciclo de desplazamiento (Edwards 2011), (Sales 2021).

Figura 3. Características externas de la lombriz roja californiana



Fuente: Tomado de (Sales 2021).

Figura 4. Características externas de la lombriz roja californiana



Fuente: Tomado de (Sales 2021).

1.8.7.5 Hábitos reproductivos

Las lombrices coquetas rojas (*Eisenia foetida* Sav), son organismos hermafroditas monoicos, es decir, cada individuo posee órganos reproductores masculinos y femeninos simultáneamente; no obstante, carecen de la capacidad de autofecundación, requiriendo obligatoriamente un proceso de copulación recíproca y fecundación cruzada (fig. 3). Durante este cortejo e intercambio gamético, los especímenes transfieren y almacenan espermatozoides en sus respectivas espermatecas, postergando la fertilización real de los óvulos hasta el momento de la ovoposición (Domínguez 2023).

Tras el apareamiento, los individuos maduros depositan entre dos y cinco cocones o cápsulas por semana, albergando cada estructura una media de dos a veinte embriones en desarrollo (C. A. Edwards 2004). La temperatura óptima para la incubación y viabilidad de estos cocones se sitúa en un rango crítico de 20 a 25 °C. Bajo estas condiciones térmicas estables, la eclosión ocurre aproximadamente a los 21 días, emergiendo juveniles con una masa corporal promedio que ronda los 0.01 gramos (Schuldt 2022). Posteriormente, los organismos entran en una fase de crecimiento acelerado hasta alcanzar una longitud longitudinal de 6 a 7 centímetros, adquiriendo la diferenciación del clitelo y la madurez sexual reproductiva antes de los 60 días si se mantienen a una temperatura constante de 25 °C. (Edwards 2011) (Shuldt 2022).

Figura 5. Lombrices en fase de acoplamiento



Fuente: Tomado de (Sales 2021)

1.8.7.6 Ciclo de vida

Concluido el periodo de incubación, el cual oscila entre 14 y 21 días en función directa del manejo zootécnico y el control de las variables ambientales, especialmente la temperatura de la pila, los juveniles rompen la envoltura de la cápsula o cocón, cuya coloración inicial amarillenta vira hacia un tono pardo oscuro previo a la eclosión (Domínguez 2023). Aunque un cocón puede albergar fisiológicamente múltiples óvulos fertilizados, el promedio real de eclosión efectiva en

sistemas de producción controlados se sitúa entre dos y cuatro lombrices viables por cápsula, con máximos biológicos excepcionales. (Edwards 2011)

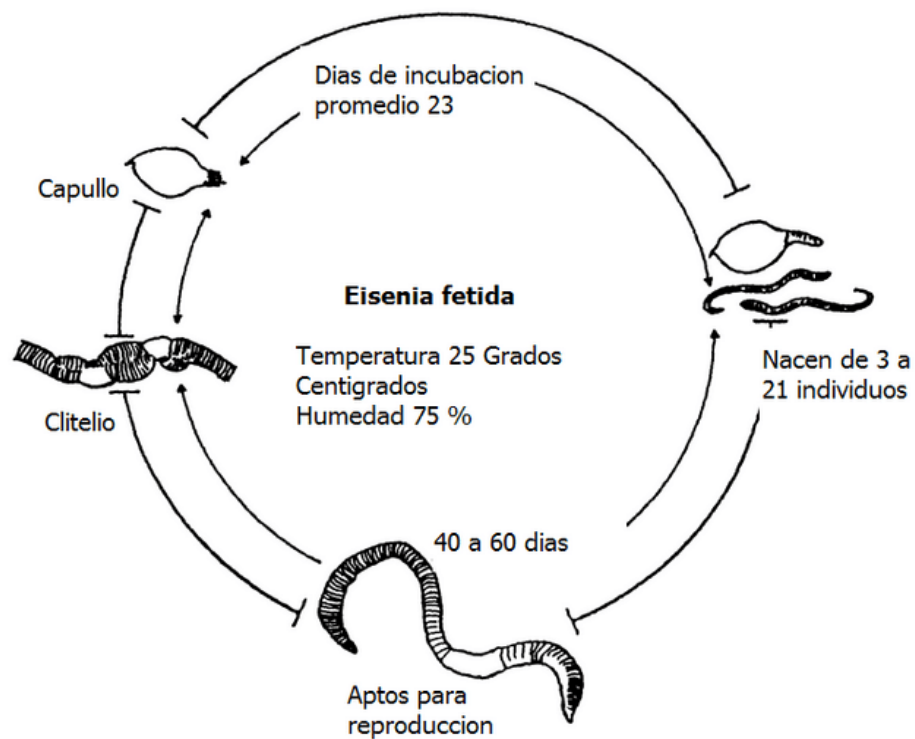
Al emerger, los neonatos son completamente albinos (transparentes-blanquecinos) debido a la ausencia de pigmentación hemoglobínica y poseen una longitud longitudinal aproximada de 4 a 6 milímetros (Shuldt 2022). Inicialmente, estas crías se sumergen en los estratos más profundos y húmedos del lecho para protegerse de la desecación, migrando gradualmente hacia la superficie en busca de fracciones finas de materia orgánica predigerida microbianamente. Su ontogenia y cronología morfométrica se desarrolla de la siguiente manera bajo condiciones óptimas de alimentación y temperatura (Shuldt 2022):

- **Etapas de transición (5 a 6 días):** adquieren una tonalidad rosácea debido al desarrollo de su sistema circulatorio aórtico y alcanzan una longitud de 7 a 9 milímetros.
- **Fase juvenil temprana (15 a 20 días):** el soma se torna de color rojo tenue y registran tallas entre los 12 y 15 milímetros.
- **Fase juvenil avanzada (30 a 45 días):** el cuerpo se elonga hasta los 3 a 4 centímetros, intensificándose la presencia de pigmentos epidérmicos.
- **Madurez fenotípica y sexual (60 a 90 días):** los especímenes alcanzan su talla comercial definitiva de 6 a 10 centímetros, adquieren una coloración rojo-púrpura oscura con bandas anulares amarillentas características (fenotipo *foetida*) y desarrollan

plenamente el clitelo, igualando la morfología reproductiva de sus progenitores. (Edwards 2011).

Desde el momento de la eclosión, los individuos manifiestan una autonomía fisiológica completa y un hábito alimentario saprófago detritívoro de succión. Dado que carecen de estructuras masticatorias complejas, su supervivencia está estrictamente supeditada a que el sustrato presente un estado avanzado de precompostaje y una humedad constante del 55 % al 60 %, lo que permite la licuación y succionamiento microbiano del alimento (Domínguez 2023). Bajo estas condiciones de confort zootécnico en el sustrato, una lombriz sexualmente activa posee la capacidad de depositar un cocón cada 7 a 10 días, completando de esta forma un ciclo generacional cerrado y continuo.

Figura 6. Ciclo de vida de *E. foetida* S.



Fuente: Tomado de (Sales 2021)

1.8.7.7 Requerimientos ambientales de las lombrices

Las lombrices permanecerán y se desarrollarán en el sustrato si poseen alimento adecuado, humedad de entorno de 60 a 80 %, temperaturas entre 20 y 25°C 0.0 °C y por debajo de los 20 a 25°C, con un pH entre 5.5 y 8.5-9.

- **Humedad:** constituye uno de los elementos más influyentes, los errores ya sean por falta o exceso traen consecuencias negativas en la producción de humus como en la reproducción y fecundidad de la lombriz. La humedad de los canteros se debe mantener del 60 al 80%. (Domínguez 2023).
- **Iluminación:** la lombriz es muy sensible a los rayos ultravioleta que le ocasionan la muerte, por ello es recomendable ubicarlas en lugares donde haya sombra o en lugares cubiertos.
- **Temperatura:** la ideal está entre 20 y 25 °C (Edwards 2004). Lo más cercano posible a lo corporal de la lombriz que es de 19°C por encima de 30°C resiste bien la temperatura, pero lo hace a costa de una menor producción y descenso en la producción de humus.
- **Aireación:** la lombriz requiere aire para su proceso vital y, por lo tanto, es necesario remover los canteros o lechos con rastrillo por lo menos cada siete días. (Reyes 2004).
- **Peso individual y densidad poblacional:** las características del sustrato o material de crecimiento, como las condiciones de humedad y temperatura son determinantes en las tasas de reproducción crecimiento y desarrollo. Es bien sabido que el recurso alimenticio no solo influye en el tamaño de las lombrices sino también en su tasa de crecimiento y reproducción
- **Alimento:** el alimento debe pasar obligatoriamente una fase de precompostaje, antes de ser sembrada con lombrices. Es recomendable que el material a utilizar haya pasado por un proceso de molienda previa, ya que ello permitirá una mayor superficie de contacto

facilitando la degradación. (Domínguez 2023). Este manejo preventivo es mandatorio para disipar gases nocivos, reducir la acidez inicial y estabilizar las altas temperaturas termofílicas que resultarían letales para la población (Shuldt 2022).

El sustrato debe estar bien aireado y húmedo (más del 50 %); así se irán desarrollando los organismos (hongos, bacterias, algas, protozoarios) que constituirán el alimento de las lombrices.

- **Estiércoles:** son excelentes fuente de alimento para la coqueta roja, especialmente el de animales herbívoros, ya que estos son ricos en celulosa, en carbohidratos, en bacterias que desdoblan y ayudan al proceso digestivo de la lombriz.

Los estiércoles utilizados individualmente o mezclados con otros y con desechos vegetales, son el alimento más apetecido por las lombrices. En general el estiércol contiene:

- 4 a 20 % de proteínas
 - 0.7 a 2.77 % de nitrógeno
 - 30 a 60% de materia orgánica
- (Reyes 2004).

1.8.7.8 El humus

El humus es el producto final de la lombricultura y viene a ser el estiércol de las lombrices. El humus es una materia orgánica granulosa inodora de color café oscuro; posee un pH neutro, lo que permite aplicar altas dosis sin correr el riesgo de quemar los cultivos. Posee alta concertación de micro y macroelementos de disponibilidad inmediata para los cultivos. La baja relación C: N de 13 a 9:1, evita los fenómenos de competencia por nutrientes entre los microorganismos del suelo y los

cultivos; su actividad fito-hormonal tiene efectos sobre semillas en germinación y plántulas en crecimiento para favorecer el desarrollo radicular. (Sales 2021).

1.8.8 Microorganismos eficientes

Fueron desarrollados al comienzo de los años sesenta, por el Dr. Teruo Higa de la Universidad de Okinawa, Japón, como una alternativa que reemplazara el uso de fertilizantes y plaguicidas sintéticos. (Frabelse 2019)

Microorganismos que forman parte de un consorcio microbiano que interactúa benéficamente con la flora microbiana de la rizosfera. Este producto comercial presenta una amplia gama de usos para diversos fines tales como el tratamiento de aguas residuales, alimentación ganadera y acuícola y principalmente en el “balance” de la microflora de los suelos en la agricultura. (Silva 2017).

Constituyen un fluido consciente y dinámico, conocido como la ‘Solución Madre’, que posee armonía y resonancia. Esta solución tiene la capacidad de interpretar la información del entorno con el cual entra en contacto, basándose en la combinación de microorganismos benéficos como *Lactobacillus*, *Saccharomices* (levaduras) y *Rhodopseudomonas* (bacterias fotosintéticas o fototróficas). (Frabelse 2019).

1.8.9 Grupos microbianos que componen los EM

Se componen de cinco grupos microbianos generales, siendo estos:

- **Bacterias ácido-lácticas:** son cocos o bacilos Gram+. Su principal actividad es la fermentación de carbohidratos, son ácidos tolerantes pudiendo crecer en pH menores a 3.2 y tan altos 9.6. Incluyen géneros como: *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. casei*). Estas pueden mostrar efecto antagónico frente a agentes fitopatógenos del suelo debido a la disminución del pH, la

producción de péptidos con actividad antimicrobiana (bacteriocinas clase I y la nisina) contra bacterias Gram+. (Morochó 2019).

- **Bacterias fotosintéticas:** microorganismos autótrofos facultativos representados fundamentalmente por las especies *Rhodopseudomonas palustris* y *Rhodobacter sphaeroides*. Este grupo utiliza como fuente de carbono moléculas orgánicas producidas por los exudados de las raíces de las plantas y como fuente de energía utilizan la luz solar y la energía calórica del suelo.

La especie *R. palustris* es capaz de producir aminoácidos, ácidos orgánicos, hormonas, vitaminas y azúcares, donde todos ellos pueden ser utilizados por microorganismos heterótrofos para su crecimiento. Mientras que la especie *R. sphaeroides*, muestra gran diversidad metabólica que incluyen litotrofismo, respiración aeróbica y anaeróbica, la fijación de nitrógeno y la síntesis de tetrapiroles, clorofilas, hemo y vitamina B12. (M.A 2019).

- **Levaduras:** grupo microbiano presente en la preparación de los ME capaces de utilizar diversas fuentes de carbono y de energía. Sintetizan sustancias antimicrobianas a partir de azúcares y de aminoácidos secretados por bacterias fotosintéticas. Producen hormonas y enzimas que pueden ser utilizadas por las BAL. Como parte de su metabolismo fermentativo producen etanol el cual en elevadas concentraciones puede tener actividad antifúngica. (YS 2019).
- **Actinomicetes:** bacterias gran+ capaces de formar micelio con ramificaciones. Se consideran un grupo intermedio entre bacterias y hongos, ampliamente distribuidos por la naturaleza a través de esporas o fragmentos de su micelio en suelos alcalinos o neutros, con escasa cantidad de agua y ricos en materia orgánica. Juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica. (Instituto Valenciano de Microbiología 2017).

- **Hongos filamentosos con capacidad fermentativa:** contribuyen con los procesos de mineralización del carbono orgánico del suelo; además una gran cantidad de los hongos son antagonistas de especies fitopatógenas. Poseen requerimientos relativamente bajos de nitrógeno, lo que brinda una ventaja competitiva en la descomposición de materiales como la paja y la madera. Dentro de los principales representantes de estos hongos encontramos a las siguientes especies: *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, *Penicillium sp*, *Trichoderma sp* y *Mucor hiemalis* Wehmer. (Z 2019).

1.8.10 Aplicación de microorganismos eficientes (EM) en purines y estiércol

La gestión biotecnológica de las deyecciones pecuarias mediante la incorporación de microorganismos eficientes (EM) representa una estrategia clave para optimizar la maduración de los abonos orgánicos. Estos inoculantes biológicos consisten en un consorcio sintrófico de bacterias ácido-lácticas, levaduras y bacterias fotosintéticas que colonizan activamente el sustrato (Malińska 2021). Su función principal radica en inducir una fermentación de tipo antioxidante en la masa de residuos, regulando las rutas metabólicas de la descomposición.

A través de esta colonización microbiana dirigida, se inhiben los procesos de putrefacción y descomposición anaeróbica que comúnmente provocan la volatilización del nitrógeno en purines y excretas. La estabilización acelerada de estos coproductos no solo mitiga el impacto ambiental y las emisiones de gases ofensivos en las unidades productivas, sino que incrementa significativamente la retención de nutrientes y la calidad biológica del fertiabono final. (Zandvakili 2022)

- **Mejora la descomposición:** catalizan la descomposición de la materia orgánica, reduciendo el tiempo necesario para que el estiércol se convierta en compost usable. Esto resulta en un compost con mejor olor, menos patógenos y una mayor cantidad de nutrientes disponibles para las plantas.

- **Reducción de olores:** los microorganismos trabajan transformando compuestos volátiles que causan malos olores, como el amoníaco y los sulfuros, en formas no volátiles y menos olorosas.
- **Control de patógenos:** contienen bacterias benéficas que pueden competir con y suprimir a microorganismos patógenos presentes en el estiércol. Esto disminuye el riesgo de enfermedades tanto para los animales en la granja como para las personas que manejan estos desechos. El estiércol tratado con EM es más seguro para ser utilizado como fertilizante, reduciendo el riesgo por contaminación.
- **Reducción de emisiones nocivas:** al promover una descomposición más eficiente y aeróbica, los EM pueden ayudar a reducir la emisión de gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso.
- **Mejora de la calidad del fertilizante:** el estiércol tratado con EM tiende a ser más rico en nutrientes disponibles, como nitrógeno, fósforo y potasio, debido a la actividad microbiana que ayuda a liberar estos nutrientes de las formas orgánicas. Esto resulta en un fertilizante de mayor calidad que puede mejorar la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos. (Frabelse 2019).

1.8.11 Aplicación de microorganismos eficientes (EM) en ganadería

1.8.11.1 Mejora la calidad del estiércol y control de olores

Efectivos en mejorar la descomposición del estiércol y en la reducción de olores. Esto no solo mejora la calidad ambiental de las instalaciones de ganado bovino lechero, sino que también convierte el estiércol en un fertilizante más valioso y reduce la presencia de patógenos.

1.8.11.2 Salud animal

Pueden ser administrados directamente a los animales a través de su agua de bebida o como parte de su alimento. Esto ayuda a mejorar la flora intestinal y la digestión, lo que puede resultar en una mejor

salud general, mayor resistencia a enfermedades y un aumento en la eficiencia alimenticia. (Frabelse 2019).

1.8.11.3 Reducción de la incidencia de enfermedades

Contienen bacterias que son beneficiosas para el ambiente gastrointestinal de los animales, lo que puede ayudar a prevenir infecciones y reducir la incidencia de enfermedades. Esto es particularmente valioso en reducir la necesidad de antibióticos, promoviendo un enfoque más natural y sostenible en el manejo de la salud animal.

1.8.11.4 Ambiente de alojamientos mejorados

Se pueden utilizar para tratar las áreas donde los animales viven, incluyendo establos, corrales y lechos. Su aplicación puede ayudar a reducir la carga de patógenos y mejorar la calidad del aire, haciendo que el ambiente sea más seguro y confortable para los animales.

Uso de forrajes: actúan facilitando la fermentación para mejorar la calidad nutricional y la digestibilidad del forraje.

Sostenibilidad y bienestar animal: la implementación de EM en la ganadería promueve prácticas más sostenibles, al reducir la dependencia de productos químicos y antibióticos, y mejorar la gestión de residuos. Además, un mejor ambiente y una salud óptima del ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), contribuyen al bienestar animal, un aspecto cada vez más importante tanto desde el punto de vista ético como económico. (Frabelse 2019)

1.8.12 Análisis fisicoquímico de lombricomposta en excretas de ganado bovino lechero

Tabla 10. Características nutricionales de la lombricomposta y composta empleadas

Características fisicoquímicas	Lombricompost	Compost
C (%)	18.57	14.91
N-total (%)	2.24	2.20
Relación C/N	8.13	7.05
N-NO ₃ (mg Kg ⁻¹)	532	769
P (%)	0.12	0.14
K (%)	0.79	0.22
Ca (%)	1.33	0.95
Mg (%)	1.21	0.84
Na (%)	0.12	0.26
Fe (mg Kg ⁻¹)	357	367
Zn (mg Kg ⁻¹)	91	86
Mn (mg Kg ⁻¹)	196	213
Cu (mg Kg ⁻¹)	38	41
pH (mg Kg ⁻¹)	6	7.42

Fuente: Tomado de (Olivares-Campos 2012)

1.8.13 Manejo ambiental de las excretas de origen animal

Aunque las patologías humanas directas ocasionadas por deyecciones animales son poco frecuentes, en las explotaciones avícolas los operarios pueden manifestar asma, neumonía e irritación ocular cuando la ventilación de las instalaciones es deficiente. Asimismo, el consumo de agua contaminada con escorrentías de estiércol representa un riesgo sanitario severo debido a la presencia de bacterias patógenas, siendo *Escherichia coli* el agente más común asociado a cuadros de diarrea y distensión abdominal. (Pinos-Rodríguez 2012).

Adicionalmente, la lixiviación de estas deyecciones hacia las fuentes hídricas puede inducir altas concentraciones de nitratos, responsables de desencadenar metahemoglobinemia al reducir la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre humana. Del mismo modo, la infiltración de hormonas residuales, principalmente estrógenos, se ha vinculado con la disminución en la calidad espermática. El impacto ambiental, la eutrofización de cuerpos de agua y la sobrecarga de nutrientes dependerán de la especie pecuaria y el manejo del estiércol (Pinos-Rodríguez, García-López y Peña-Galeana 2012).

Por otra parte, la aplicación de estiércol en tierras de cultivo proporciona un beneficio ecológico directo al reincorporar macronutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo al recurso edáfico. El nitrógeno presente se encuentra predominantemente en forma de amonio (NH_4^+), el cual es asimilado eficazmente por la biomasa vegetal. A pesar de estas bondades agronómicas, la valorización del estiércol como fertiabono orgánico suele ser minimizada frente al uso generalizado de fertilizantes de síntesis química. (Pinos-Rodríguez 2012)

Debido a sus propiedades estructurales, esta enmienda incrementa la capacidad de retención de humedad, optimiza el intercambio catiónico y favorece la filtración de agua al subsuelo, mitigando los procesos de erosión hídrica y eólica. Asimismo, el aprovechamiento de la fracción líquida del estiércol contribuye a disminuir la volatilización de formas gaseosas de nitrógeno, carbono y azufre en el suelo, reduciendo la dependencia de insumos químicos y atenuando el impacto ambiental (Pinos-Rodríguez 2012).

1.9. Hipótesis

- Ho. No existe diferencia estadísticamente significativa en cuanto a la eficiencia biotransformadora de los diferentes tratamientos.
- Ha. Uno de los 9 tratamientos presenta diferencia significativa en cuanto a la eficiencia biotransformadora del compost.

1.10 Tipo de investigación

Hipotético-deductivo, debido a que la investigación propuesta comienza con la formulación de una hipótesis, la cual es puesta a prueba mediante la deducción y la experimentación para verificarla o cuestionar.

CAPÍTULO 2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Postura paradigmática

La investigación tuvo un enfoque positivista e hipotético-deductivo, puesto que en su fase de ejecución se basó en la observación y medición de fenómenos observables, Este tipo de enfoque se caracterizó por el uso de análisis estadísticos y la medición de fenómenos para generar resultados comparables con las hipótesis.

2.2 Metodología

El proceso experimental tuvo la finalidad de evaluar la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), y microorganismos eficientes (EM), en excretas bovinas, por lo que se realizó una comparación entre los diferentes tratamientos.

2.2.1 Diseño experimental

Para la realización de este trabajo de investigación, se utilizó un diseño experimental de Bloques Completos al Azar (DBCA), con un factor de variación (agente transformador), compuesto por 9 tratamientos y tres repeticiones (bloques), totalizando 27 unidades experimentales.

2.2.1.1 Modelo matemático

El modelo estadístico para el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) se definió mediante la siguiente ecuación lineal aditiva:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} : representó la respuesta cuantitativa observada de la variable en el i -ésimo tratamiento dentro del j -ésimo bloque.
- μ : correspondió a la media general o constante común del experimento; representó el valor base esperado de la variable

analizada en ausencia de efectos específicos de tratamientos o bloques

- A_i : representó el efecto fijo del i -ésimo tratamiento (agente transformador, donde $i = 1, 2, 3, \dots, 9$). Matemáticamente, midió la desviación de la media del tratamiento i respecto a la media general μ .
- B_j : Representó el efecto del j -ésimo bloque o repetición (donde $j = 1, 2, 3$). Este parámetro aisló la variabilidad ambiental o del terreno atribuida a las repeticiones para reducir el error experimental)
- E_{ij} : representó el error experimental o residuo aleatorio asociado a la parcela que recibió el tratamiento i en el bloque j . Se asumió que estos errores están independiente e idéntica según una distribución normal, con media igual a cero y varianza constante σ^2 , lo cual se denotó matemáticamente como $E_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, de forma independiente.

2.2.2 Cálculo de la cantidad de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav)

Según los parámetros biológicos establecidos por la Universidad Nacional Agraria (Agraria 2011). La lombriz coqueta roja adulta, tiene una masa corporal que oscila entre 0.8 a 1.1 gramos, y se estandarizó como base para esta investigación una tasa de consumo diario de alimento de 1 gramo de sustrato por organismo. La fase experimental de biotransformación tuvo una duración de 45 días continuos y cada unidad experimental (tratamiento) fue constituido por una masa fija de 5 kilogramos de excretas bovinas lecheras precompostadas, con base en ello, se efectuaron los cálculos de carga poblacional, como sigue:

$$\frac{5 \text{ kg estiércol precompostado}}{45 \text{ días de investigación}} = 0.111 \text{ kg /día} = 111.11 \text{ gramos por día}$$

Con base a los datos obtenidos, se trabajó con 112 lombrices por tratamiento y sus respectivas repeticiones. Lo que dio como resultado lo siguiente:

- 5 tratamientos x 3 repeticiones = 15 unidades experimentales
- 112 lombrices x 15 unidades experimentales = 1680 lombrices para el total de la investigación. (1,680g de biomasa total).

Cabe mencionar que la biomasa de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), se sometió a un proceso de aclimatación por un periodo de 7 días en un entorno controlado dentro del galpón de precompostaje. Los anélidos se confinaron en contenedores plásticos aireados con un sustrato neutro de transición (50 % tierra orgánica comercial de pH 7.0 y 50 % excretas precompostadas maduras); durante esta fase se mantuvo una humedad controlada del 70 % controlada (por el método de puño, análisis cualitativo) y una temperatura constante menor a 25°C, lo cual garantizó la estabilización metabólica del ser vivo antes de su inoculación definitiva

2.2.3 Tratamientos

Para la investigación del proceso de biotransformación, se establecieron cuatro tratamientos experimentales basados en cuatro concentraciones volumétricas de microorganismos (EM), Se tomó como criterio la dosis comercial recomendada por EMAGRO; la cual consta de 25 cc de inóculo por cada 5 Kg de excretas bovinas precompostadas, la cual fue asignada como el tratamiento de referencia o control operativo (T4).

A partir de este valor de referencia se establecieron los demás niveles, que se desglosaron formalmente en la (tabla 10).

- Tratamiento 2 (T2): correspondió a una concentración reducida en un 50 % respecto al valor referencia, con una dosis de 12.5cc.
- Tratamiento 4 (T4): constituyó la dosis de referencia estándar (control) correspondiente a 25.00cc.
- Tratamiento 6 (T6): representó una concentración incrementada en un 50 % respecto al valor de referencia, con una dosis de 37.5 cc;
- Tratamiento 8 (T8): representó una concentración incrementada en un 100 % respecto al valor de referencia, con una dosis de 50 cc.

Tabla 11. Tratamientos realizados según diseño experimental (DBCA)

#	Tratamientos	
	Sustratos	Agentes transformadores
T1	Excretas bovinas	112 lombrices (112g)
T2	Excretas bovinas	12.5 cc EM
T3	Excretas bovinas	12.5 cc EM + 112 Lombrices (112 g)
T4	Excretas bovinas	25 cc EM
T5	Excretas bovinas	25 cc EM + 112 lombrices (112 g)
T6	Excretas bovinas	37.5 cc EM
T7	Excretas bovinas	37.5 cc EM + 112 lombrices (112g)
T8	Excretas bovinas	50 cc EM
T9	Excretas bovinas	50 cc EM + 112 lombrices (112g)

Fuente: rlaboración propia, 2026

De la siguiente manera se determinó el valor de referencia del tratamiento 4:

1) Cantidad de microorganismos eficientes a utilizar para 5 kg de excretas bovinas

$$\text{Dosis de EM (X)} = \frac{5\text{kg} \times 5,000 \text{ cc}}{1,000 \text{ kg}} = 25 \text{ cc}$$

La dosis de 25 cc de microorganismos eficientes (EM), se seleccionó con base en las recomendaciones técnicas de la casa comercial EMAGRO y se tomó este dato como valor de referencia, luego se definieron y establecieron los demás niveles, que fueron utilizados en la investigación.

Las dosis de microorganismos eficaces (EM) aplicadas por tratamiento en 5 Kg de excretas bovinas fueron las siguientes:

- Tratamiento 2 (T2): 12.5 cc
- Tratamiento 4 (T4): 25.0 cc
- Tratamiento 6 (T6): 37.5 cc
- Tratamiento 8 (T8): 50.0 cc

2) Las diluciones se realizaron según protocolo por el uso de los EM en el manejo de sólidos, el cual estableció que la concentración con mejores resultados correspondió a 75 cc EM por 16.000 cc de agua desmineralizada para cubrir 2.000 Kg de excretas:

$$\text{Dosis de agua desmineralizada(X)} = \frac{5\text{kg} \times 16,000 \text{ cc}}{2,000 \text{ kg}} = 40 \text{ cc}$$

3) Se utilizaron 40 cc de agua desmineralizada para la preparación de las diluciones de las diversas concentraciones de EM, según se detalló tabla 12.

Tabla 12. Diluciones a diversas concentraciones de EM

No. de aplicaciones	Días de aplicación y volteo	Concentraciones de EM + agua desmineralizada			
		C1	C2	C3	C4
1	0	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
2	3	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
3	5	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
4	7	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
5	11	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
6	15	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua
7	20	1.8 cc EM+ 38.2 cc agua	3.6 cc + 35 36.4 cc agua	5.4 cc + 34.6 cc agua	7.2 cc + 32.8 cc agua

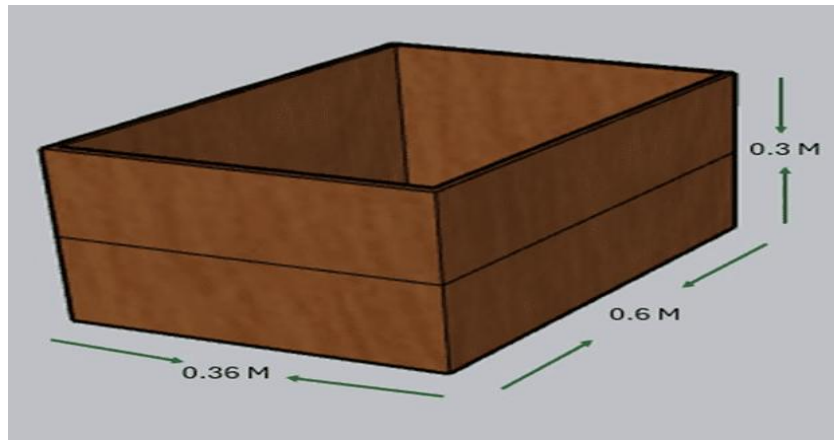
Fuente: elaboración propia, 2026

La distribución y aplicación de los microorganismos eficientes y las concentraciones consideradas se realizaron en un período de días según las recomendaciones de la casa comercial EMAGRO Biotecnología para el desarrollo del proceso, específicamente, se siguió el protocolo técnico para el manejo de residuos mediante microorganismos eficientes (EM)

2.2.4 Unidad experimental

La unidad experimental consistió en una caja de madera con medidas de 0.6 x 0.36 x 0.30 m. En cada una de ellas se colocaron 5 kg de excretas bovinas precompostadas, para el desarrollo de la investigación.

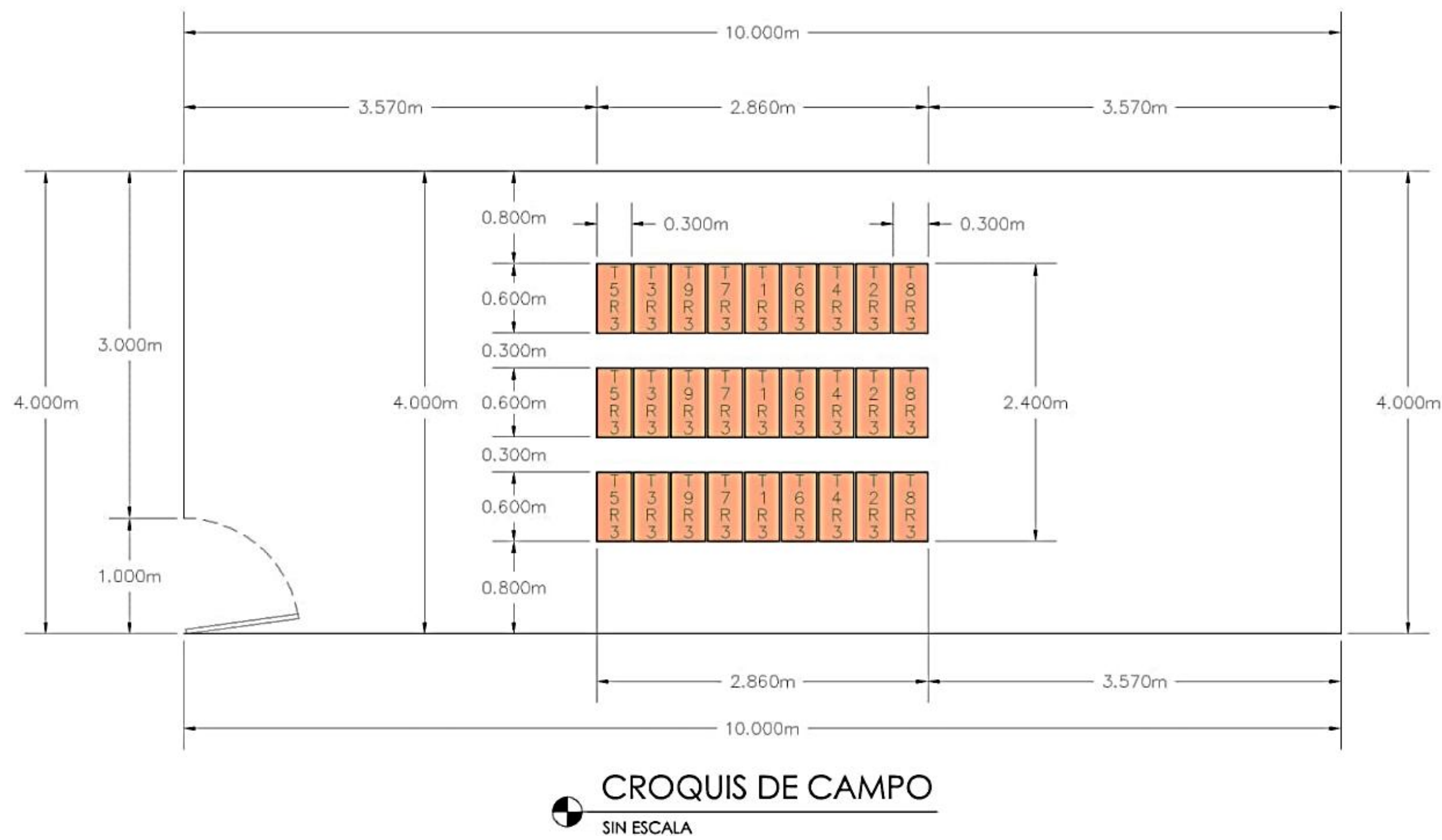
Figura 7. Diseño de la unidad experimental



Fuente: elaboración propia, 2026

Las unidades experimentales se manejaron bajo condiciones controladas dentro de un galpón acondicionado para tal efecto. Con el fin de garantizar la homogeneidad en el manejo y mitigar el error experimental, se aleatorizaron las unidades experimentales, las cuales quedaron distribuidas de forma aleatoria, según se observa en el croquis de campo que sigue a continuación.

Figura 8. Croquis de campo



Fuente: elaboración propia, 2026

Figura 9. Área de investigación



Fuente: elaboración propia, 2025

En la figura 9 se detalló el área de investigación y la disposición técnica de las lombricomposteras. Estas contaron con una pendiente del 2 % orientada hacia el punto de recolección, lo que garantiza un drenaje eficiente y la captura del lixiviado.

2.2.5 El experimento se desarrolló en cuatro fases

Al tener la planificación precisa para el manejo general de sustrato, los microorganismos eficientes y las unidades biológicas (*Eisenia foetida* Sav), se procedió a ejecutar el experimento en las fases siguientes:

2.2.5.1 Primera fase: fase de campo inicial

Con base en las fuentes consultadas y en la necesidad del manejo sostenible de las excretas bovinas en la granja de Zootecnia, sección de rumiantes del CUNOR, se determinó realizar la evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM) en ellas.

El proceso inició con el precompostaje, etapa inicial de descomposición de las excretas antes de utilizarlas en la investigación sobre compostaje EM y lombricompostaje.

Para la investigación se recolectaron 202.5 kg de excretas bovinas frescas, las cuales presentaron consistencia semisólida, color obscuro y olor característico a fermentación por la presencia de gases, después de su pesaje, se trasladaron al área de la investigación y fueron colocadas y distendidas sobre costales plásticos donde se formó una capa homogénea con una altura de 0.20 m, el sustrato permaneció por 30 días, en este estado, con el objetivo de estabilizarlo y equilibrar los componentes nitrogenados.

Durante la fase de precompostaje, el sustrato estuvo sujeto a volteos periódicos y se monitorearon las variables como la temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica (CE). Asimismo, se cubrieron las excretas, para protegerlas del sol, conservar humedad, evitar el ingreso de vectores como moscas y hormigas, está cubierta por tener agujeros diminutos evitó la putrefacción y permitió la salida de gases y mantuvo la aireación para la sobrevivencia de los microorganismos provenientes de las excretas bovinas.

En esta etapa se logró la reducción del amoníaco volatilizado debido a la combinación de la alta temperatura, el pH alcalino y la alta concentración de agua durante el proceso termófilo. Estos factores favorecieron la conversión de amonio (NH_4^+), en amoníaco (NH_3), una forma gaseosa del nitrógeno que se escapa a la atmósfera que pudo dañar o matar a las lombrices, se eliminaron patógenos, permitió la aceleración de la descomposición, lo cual redujo la contaminación ambiental, además durante el proceso se eliminaron semillas de pastos y arbustos y se homogenizó el sustrato, lo que facilitó el trabajo de las lombrices y microorganismos eficientes, mediante un consumo y una biodegradación del precompostaje de forma uniforme.

Durante este periodo se registraron las condiciones iniciales del material, y se conocieron las siguientes variables:

a. Determinación del porcentaje de humedad mediante la prueba de puño

Esta prueba se realizó cada semana, tanto en la fase de precompostaje como en la fase experimental, donde se realizó en los 9 tratamientos y sus repeticiones, el monitoreo de esta variable fue realizada durante las 11 semanas de campo (precompostaje y compostaje (EM) y lombricompostaje (*Eisenia foetida* Sav).

Para la realización de la prueba, se tomó un puñado del sustrato y se cerró la palma de la mano con fuerza, y si el puñado de sustrato se desmoronó al abrirla, significó que se encontraba muy seco, y se debió agregar agua desmineralizada, si chorreaba en exceso e incluso si salió el sustrato de los dedos, significó que hubo agua en exceso y si el sustrato mantuvo la forma después de abrir la palma de la mano, este tuvo la humedad correcta. A partir de la 4 semana de campo o última del precompostaje se tuvo la humedad requerida, en total 7 semanas.

b. Pesaje inicial de las excretas bovinas con balanza electrónica

Este pesaje se realizó con la balanza digital marca GALLACHER TM, equipo perteneciente a la granja de Zootecnia, y que se usa para obtener el peso exacto de los animales de abasto que se ofertan en el mercado local.

Para fines de la investigación se pesaron 202.5 kg de excretas bovinas, extraídos del volumen de producción diaria correspondiente a 700 kg.

c. Registro de temperatura inicial con termómetro de mercurio en campo

Esta medición se realizó semanalmente durante las 11 semanas de duración de la investigación, tanto en la fase de precompostaje como la fase experimental en los 9 tratamientos y sus repeticiones. El monitoreo tuvo como finalidad evaluar la maduración de las excretas bovinas, específicamente en la etapa de precompostaje, ya que en este sustrato se realizó la inoculación, A temperaturas mayores de 30°C, la sobrevivencia de las lombrices no es segura, además, esta medición permitió verificar la finalización de la fase termófila y la seguridad del sustrato para el aprovechamiento por las lombrices y los microorganismos eficientes (EM).

d. Medición de pH con potenciómetro en laboratorio

Se tomaron 5g de sustrato de cada tratamiento y sus repeticiones como muestra, cada una se analizó individualmente en el laboratorio de la carrera de Zootecnia, una vez homogenizada la muestra con agua destilada, se procedió a la toma de datos y su registro semanal, este procedimiento fue importante porque permitió conocer los rangos de pH en los diversos tratamientos y sus repeticiones.

e. Medición de conductividad eléctrica con potenciómetro

Esta prueba midió la salinidad (concentración de sales solubles en las excretas), la madurez del sustrato y permitió asegurar las condiciones de vida de las lombrices. Para la realización de esta prueba, se tomaron 5g de sustrato de cada tratamiento y sus repeticiones como muestra. Cada unidad se analizó individualmente en el laboratorio de la carrera de Zootecnia, una vez homogenizada con agua destilada y los datos fueron registrados semanalmente. Este registro fue importante porque permitió a la lombriz coqueta roja y a

los microorganismos eficientes (EM), biotransformar el sustrato, lo cual garantizó la obtención de un compostaje rico en nutrientes y, por ende, aprovechable como abono orgánico en pastos y plantas.

Dicha conductividad eléctrica se mantuvo en niveles bajos (menores a 3-4 dS/m), lo cual indicó que el abono no provocaría toxicidad en las raíces de las plantas al ser utilizado como sustrato y abono orgánico (FAO 2013).

f. Aplicación de tratamientos

Tras la fase de precompostaje, se establecieron 9 tratamientos de acuerdo con el diseño experimental Bloques Completos al Azar (DBCA) con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en una caja de madera con medidas de 0.6x0.36x0.30; para ello, se emplearon 27 unidades acondicionadas con 05 kg de excretas bovinas precompostadas cada una, con su respectivo drenaje (ver anexos).

Posteriormente, se procedió a la siembra de las lombrices en los tratamientos 1, 3, 5, 7 y 9 junto con sus repeticiones, a la vez, se aplicaron las concentraciones de microorganismos eficientes (EM) correspondientes, en los tratamientos 2,3,4,5,6,7,8 y 9. Estas inoculaciones de (EM) se distribuyeron en siete aplicaciones, durante los primeros 20 días, en el mismo periodo se realizaron los 6 volteos programados (tabla 12).

Asimismo, se midieron semanalmente, la humedad, temperatura, pH y conductividad eléctrica. En cada uno de los tratamientos para mantener las condiciones ideales durante el proceso.

2.2.5.2 Segunda fase: evaluación del compostaje

Durante esta fase, se evaluó la evolución de la excreta bovina (*Bos taurus* L), en cada tratamiento, y se realizaron mediciones cada semana de los siguientes parámetros:

a. Monitoreo del pH con potenciómetro (rango ideal: 6.5 – 7.5):

Para medir este parámetro se obtuvieron 05 g de sustrato y se mezcló con 50 ml de agua destilada, luego se agitó dicha mezcla, y se dejó reposar hasta que se produjo sedimentación de las partículas, luego se tomó el sobrenadante para la lectura analítica, una vez obtenido el resultado de la lectura se anotó en la tabla correspondiente. ver la sección de anexos.

b. Conductividad eléctrica (rango ideal en suelo): es un parámetro que muestra la capacidad de una disolución para transmitir corriente eléctrica, esta aptitud depende del contenido, la movilidad e interacción entre los iones y aniones presentes en la disolución (Hazelton 2016).

Para medir este parámetro se obtuvieron 05 gramos de compost y se mezcló con 50 ml de agua destilada, luego se agitó dicha mezcla, y se dejó reposar hasta que se produjo sedimento de partículas, luego se tomó el sobrenadante para la medición, una vez obtenido el resultado de la lectura se anotó en la tabla correspondiente a la variable medida para tener un buen control, la tabla se encuentra en anexos.

c. Porcentaje de humedad: para medir la humedad en campo se realizó la prueba de puño, por ser un método práctico, Se tomó un puñado del sustrato y se cerró la palma de la mano con poca fuerza, para evaluar visual y texturalmente la presencia de agua.

1. Si el puñado de sustrato se desmoronó al abrir la palma de la mano, significó que estuvo muy seco y que debió agregársele agua.
2. Si chorreó en exceso e incluso si el material salió de los dedos, existió exceso de agua.
3. Si el sustrato mantuvo su forma al abrir la palma de la mano, el material presentó la humedad correcta.

El rango ideal de humedad en un sustrato de compostaje se estableció entre 50 % y 65 % (FAO 2013).

d. Temperatura del compostaje: esta variable se midió con un termómetro de mercurio, el cual se introdujo en el sustrato para garantizar una lectura precisa, se otorgó un tiempo prudencial para que el termómetro se estabilizará y registrara la lectura correcta, luego se procedió a la anotación en la tabla correspondiente. Además, en esta fase experimental se observaron cambios en las características físicas del sustrato, como la textura, olor, color.

El registro de las variables de temperatura y humedad se sujetó a un protocolo de estandarización temporal y espacial para asegurar la validez de los datos analíticos dentro del galpón.

Las mediciones se programaron en dos etapas operativas con frecuencias diferenciadas en un horario fijo de las 09:00 horas, momento de estabilidad térmica matutina antes del incremento del mediodía. Durante la fase de precompostaje, los registros y los volteos del sustrato se efectuaron con una frecuencia de cada dos días a lo largo de las cuatro semanas de duración de esta etapa.

Por su parte, en la fase experimental (compostaje EM y lombricompostaje), las evaluaciones se realizaron una vez por semana durante los 45 días de la investigación.

La profundidad de la medición varió según la etapa para evitar sesgos por la influencia del aire ambiental en la capa superficial. Durante el precompostaje, el instrumento se introdujo a 0.10 m respecto al nivel superior del material. En la fase experimental, debido que el sustrato se asentó y ocupó una altura aproximada de 0.20m a 0.25m dentro de las cajas de madera, la medición se fijó a 0.12m de profundidad; esta distancia correspondió al centro geométrico de los contenedores y aseguró la captura de datos en el núcleo activo y homogéneo del sustrato.

El instrumental utilizado para la temperatura fue un termómetro de mercurio de inmersión parcial, con escala grabada sobre vidrio, un rango de medición de -10°C a 110°C y una resolución de precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. En cuanto a la humedad, esta variable se determinó de forma cualitativa en campo a través de la prueba del puño.

2.2.5.3 Tercera fase: análisis de la calidad del compostaje

Se recolectaron muestras representativas de 1kg por cada tratamiento, las cuales fueron enviadas al laboratorio ANALAB de la Asociación Nacional del Café, con sede en la ciudad de Guatemala, para su respectivo análisis, químico bajo la clasificación de abono orgánico (0-1), según nomenclatura manejada por ellos (ver anexos).

También se analizó el crecimiento poblacional de las lombrices y el rendimiento de biomasa, a la vez se calculó el porcentaje de mermas del compost EM y lombricompost, y se determinó el costo del kilogramo

del compost EM y lombricompost, tal como se describe en la discusión y análisis de resultados.

Los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes

a. Propiedades fisicoquímicas: las propiedades químicas del compostaje se definieron como las características y transformaciones moleculares, iónicas y de nutrientes que ocurrieron durante la descomposición de la materia orgánica, las cuales determinaron el equilibrio del proceso y la calidad del producto final (abono), para el suelo. (FAO 2013).

- 1) Estructura
- 2) Textura (método de Bouyoucos)
- 3) Densidad real
- 4) Densidad aparente (método de la probeta)
- 5) pH
- 6) Porcentaje de materia orgánica
- 7) Porcentaje de cenizas
- 8) Relación carbono/nitrógeno (C/N)

b. Macronutrientes esenciales: los macronutrientes esenciales se definieron como aquellos elementos químicos que las plantas requirieron en grandes cantidades para completar su ciclo vital, con funciones estructurales y metabólicas críticas en el suelo y los tejidos vegetales. (Moral 2008).

c. Micronutrientes: los micronutrientes se definieron como aquellos elementos químicos esenciales que las plantas requirieron únicamente en trazas o cantidades muy pequeñas, con funciones principales como cofactores enzimáticos y catalizadores en procesos bioquímicos vitales. (Morocho 2019).

Estos análisis permitieron determinar el tratamiento que produjo el compost (EM) y lombricompost con mayor contenido de nutrientes y su potencial como fertilizante orgánico.

d. Análisis estadístico

Las variables fisicoquímicas, de macro y micronutrientes y materia orgánica, se analizaron mediante las siguientes herramientas estadísticas:

- Análisis de varianza (ANOVA): fue realizado para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos, se verificaron los supuestos de normalidad según Shapiro-Wilks y la prueba de varianzas con la prueba de Levene, luego se procedió a la estadística paramétrica correspondiente.
- Prueba de Tukey ($p < 0.05$): fue utilizada solo en los casos donde se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, para determinar el método más eficiente en la descomposición del estiércol bovino y la calidad del compost obtenido.
- Las variables de respuesta fueron tiempo de producción final y características fisicoquímicas del compost EM y lombricompost, (temperatura, pH, humedad, materia orgánica y conductividad eléctrica).
- Para finalizar se realizó un análisis económico que permitió determinar los costos de producción de cada tratamiento y a su vez establecer cuál de ellos presentó las mejores características técnicas e imprevistos económicos para el desarrollo de los cultivos.

Las variables fisicoquímicas del compost final, utilizado como abono incluyeron la temperatura, humedad, pH, relación carbono-nitrógeno (C/N), materia orgánica, nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y conductividad eléctrica (CE). Estos indicadores resultaron cruciales para evaluar la calidad del abono y su capacidad de fertilización en el suelo.

1. Variables físicas

- **Temperatura:** indica la actividad microbiana y la fase de descomposición del compost.
- **Humedad:** constituyó la condición necesaria para el desarrollo de los microorganismos y la mineralización de la materia orgánica.
- **Relación C/N:** determinó la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la actividad microbiana.
- **Tamaño de partícula:** influyó en la velocidad de descomposición y la disponibilidad de nutrientes.

2. Variables químicas

- **pH:** marcó el grado de acidez o basicidad del compost, factor que condicionó la disponibilidad de los nutrientes.
- **Materia orgánica:** representó la base de la fertilidad del suelo y el soporte para la actividad microbiana.
- **Nutrientes:** abarcaron los contenidos de N, P, K y otros minerales esenciales para el crecimiento de las plantas.
- **Conductividad eléctrica:** midió la concentración de sales solubles, para prevenir posibles efectos tóxicos en la raíz de las plantas en altas concentraciones.

Estas variables se mantuvieron interrelacionadas y se afectaron mutuamente durante el proceso de compostaje. Por ejemplo, la temperatura y la humedad influyeron en la actividad microbiana, que a su vez modificó la relación C/N y la liberación gradual de nutrientes. La correcta gestión de estas variables fue clave para la obtención de un compost de calidad adecuado para las plantas.

2.2.5.4 Cuarta fase: análisis y discusión de resultados

2.2.6 Análisis costo-beneficio

Para realizar este análisis se identificaron y definieron los tratamientos de la investigación y se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

a. Evaluar los costos de producción

- 1) Costos directos:** se incluyó la inversión en la adquisición de las lombrices, el costo de microorganismos eficientes (EM), el valor asignado al sustrato (excretas bovinas), y los materiales para la conformación de los lechos de lombrices y microorganismos eficientes (costales, cajas de madera), mano de obra a través del registro detallado del tiempo en minutos destinado al manejo general de la investigación y a la cosecha final del lombricompost y compost EM.
- 2) Costos indirectos:** abarcaron el costo de la infraestructura (vida útil), así como el consumo de agua destilada y desmineralizada durante el proceso.

- a. Beneficios** (precio de venta del lombricompost, y compost EM (se debe considerar la calidad y destino)).

b. Co-beneficios

- **Disminución de excretas bovinas:** se calculó el volumen total de residuos orgánicos procesados con el lombricompost y microorganismos eficientes EM y el valor económico de no tener que desechar o tratar esos residuos.
 - **Beneficios ambientales:** considerar el impacto positivo del lombricompost y compost EM en la salud del suelo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros.
- 3) **Calcular el costo por tratamiento:** se sumaron los costos directos e indirectos para cada tratamiento evaluado.
- 4) **Calcular el beneficio total por tratamiento:** se integraron la totalidad de los ingresos proyectados (ventas) y los valores asignados a los co-beneficios generados en cada tratamiento.
- 5) **Realizar el análisis costo-beneficio con su valor presente:** se determinó la relación mediante dividir el beneficio total por el costo total para cada tratamiento. Un valor mayor a 1 indicó que el tratamiento es rentable. Además se realizó un análisis de sensibilidad, para evaluar cómo cambian los resultados si se modifican algunos parámetros (ej. precio de venta o costo de las excretas bovinas).
- 6) **Comparar los tratamientos:** se identificó el tratamiento más rentable (con la mayor relación beneficio/costo), o el que mejor se adapta a las necesidades y recursos disponibles.

2.3 Método

El método constituyó el medio por el cual acercamos la investigación a la realidad, con base en el marco teórico y permitió estudiar el tema de investigación de una manera específica. En la investigación se aplicó el método hermenéutico, el cual permitió combinar con otros métodos de ser necesario. Algunas estrategias utilizadas para la investigación fueron:

- Recopilación y análisis de información de fuentes escritas.
- Observación del desarrollo poblacional de las lombrices en los tratamientos respectivos.
- Manipulación de variables independientes para observar su efecto entre variables de respuesta.
- Aplicación de técnicas estadísticas para analizar datos numéricos obtenidos.

2.4 Técnicas de investigación

Se emplearon las técnicas de observación, estudio correlacional y análisis de datos.

2.5 Muestra inicial

Se recolectaron en el establo de la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, 202.5 kg de excretas bovinas (*Bos taurus* L), para iniciar la fase de precompostaje, que duró 4 semanas, al realizar el pesaje final de esta etapa, se registró una merma de 15.5 kg, por lo que se contó con 187 kg de sustrato estabilizado. De este volumen, se pesaron 135 kg para su distribución y evaluación en los tratamientos correspondientes de compostaje con microorganismos eficientes y lombricompostaje.

2.6 Instrumentos, equipo y recursos

2.6.1 Instrumentos:

- Matrices y tablas impresas en hojas de papel bond para el registro de las variables de temperatura, pH, humedad y conductividad eléctrica, en mediciones de campo y laboratorio.

2.6.2 Equipo:

- 27 cajas de madera 0.60 m de largo x 0.36 m de ancho y 0.30 m de altura.
- Regadera o atomizador para aplicación de riegos.
- Carretas para transporte de excretas bovinas.
- Costales plásticos
- Palas y rastrillos
- Guantes de protección personal
- Cubetas y recipientes de plástico
- Cuaderno de campo y lápiz

2.6.3 Recursos:

2.6.3.1 Recursos humanos:

- Estudiante investigador
- Personal de campo de la granja de Zootecnia del CUNOR
- Asesor de tesis
- Consultores especializados

2.6.3.2 Recursos materiales:

- Computadora personal
- Cámara fotográfica
- Termómetro de mercurio de inmersión parcial
- Potenciómetro portátil para lecturas de pH y conductividad eléctrica
- Balanza digital marca GALLAGHER
- Calculadora CIENTÍFICA
- Agua destilada (laboratorio) y desmineralizada (riegos de los tratamientos).

2.6.3.2 Recursos biológicos:

- 202.5 kg de excretas bovinas frescas (*Bos taurus* L).
- 4 concentraciones de microorganismos eficientes (EM) evaluadas.
- 2 kg de lombriz coqueta roja en estado adulto (*Eisenia foetida* Sav), del cual se utilizó una población total de 1,680 individuos para la inoculación de las unidades experimentales.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis y la discusión de los resultados abarcó cuatro fases consecutivas, como se detalló en la metodología, las dos primeras se realizaron en un periodo continuo de 75 días de trabajo de campo. La primera correspondió al precompostaje, con una duración de 30 días, del 01 al 30 de septiembre de 2025; durante esta, no se utilizaron agentes biotransformadores. Posteriormente se inició la segunda fase experimental de biotransformación, mediante la inoculación de microorganismos eficientes (EM) y la siembra de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav).

Esta fase experimental se extendió por 45 días, durante los meses de octubre y noviembre de 2025. Durante el ciclo de la investigación, se efectuaron los monitoreos semanales para evaluar las variables fisicoquímicas, específicamente la temperatura, potencial de hidrógeno (pH), el porcentaje de humedad y conductividad eléctrica (CE).

La tercera etapa consistió en la evaluación de la calidad del compost EM y lombricompost, para ello, se realizó el pesaje de sustratos, el análisis de mermas y la cuantificación de biomasa de lombriz coqueta roja. Asimismo, se prepararon las muestras de los compost según especificaciones técnicas de ANALAB, entregándose en las oficinas de Anacafé Cobán, Alta Verapaz, el 19 de noviembre de 2025, para su ingreso formal al laboratorio central el 02 de diciembre del mismo año.

Finalmente, la cuarta fase abarcó el análisis integral y discusión de resultados. Esta, se fundamentó en la correlación de matrices elaboradas en base a las características fisicoquímicas de las fases de precompostaje y compostaje experimental, con la integración de la actividad de los dos agentes biotransformadores, asimismo, incluyó la interpretación del informe analítico de ANALAB, la determinación de la textura por el método de Bouyoucos y los valores de densidad real y aparente.

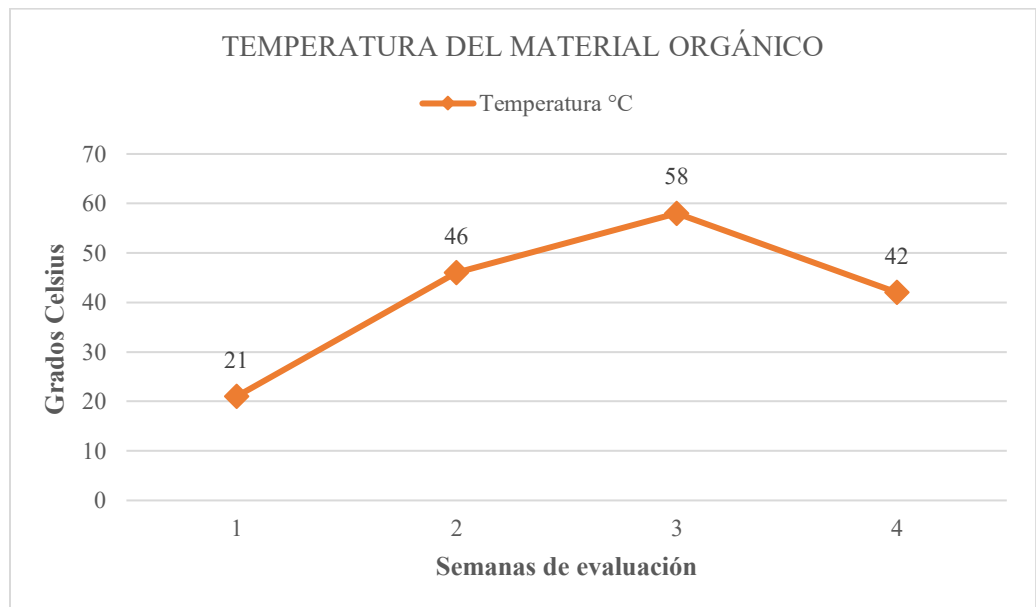
3.1 Fase de precompostaje

Durante esta fase se monitorearon cada semana las variables: temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica (CE) y los datos obtenidos fueron registrados en las matrices y tablas de control.

3.1.1 Temperatura

Desde una perspectiva biológica y agropecuaria aplicada al manejo de sustratos orgánicos, esta variable operó como un indicador cinético directo de la actividad metabólica e intensidad de las reacciones exotérmicas celulares ejecutados por las poblaciones microbianas durante la degradación de la materia (Fuentes 2022)

Figura 10. Comportamiento de temperatura de material orgánico en fase de precompostaje.



Fuente: elaboración propia, 2026

En la figura 10 se registró la evolución de la temperatura de las excretas bovinas lecheras durante las 4 semanas que duró la fase de precompostaje. La curva reflejó las fases microbiológicas de degradación de la materia orgánica,

Con un inicio con una fase mesófila hasta un periodo termófilo evidente, y un cierre con la fase de enfriamiento y estabilización.

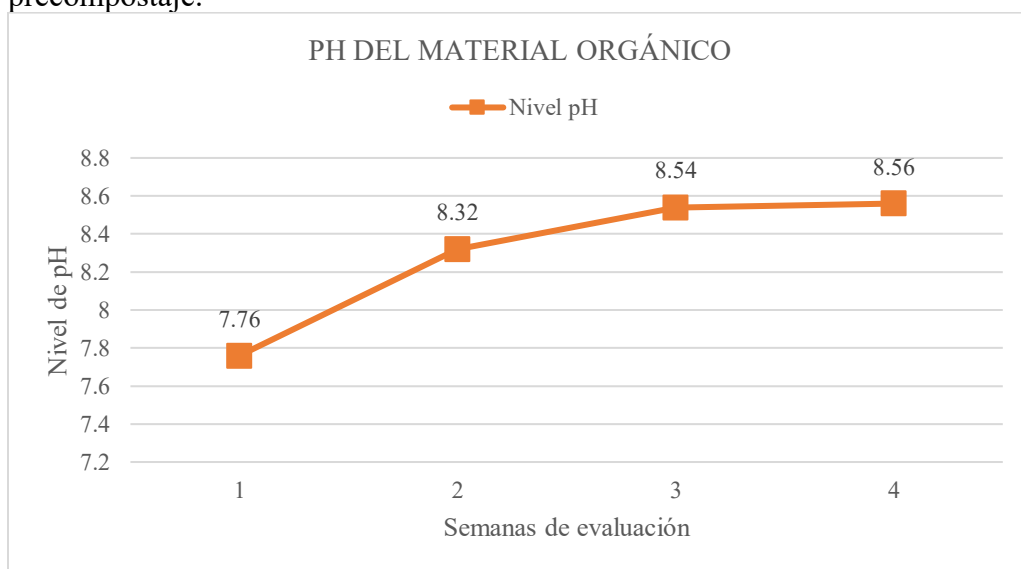
- La primera semana, registró una temperatura inicial de 21°C, valor asociado con la fase mesófila temprana. Según (Domínguez 2023), en este punto, los microorganismos autóctonos mesófilos comienzan la asimilación de los compuestos orgánicos solubles y de fácil degradación presentes en las excretas frescas (insumos carbonados y nitrogenados de cadena corta), un proceso metabólico exotérmico que indujo el aumento progresivo del calor en la pila.
- En la segunda semana, este incremento se hizo evidente y la temperatura ascendió de forma acelerada hasta alcanzar los 46°C.
- En la tercera semana alcanzó su punto máximo, con un registro de 58°C. Según (Edwards 2011), este pico térmico representó la consolidación de la fase termofílica, etapa en la cual las poblaciones de bacterias, hongos termófilos y actinomicetos especializados en la descomposición de polímeros más complejos (como la celulosa y la hemicelulosa), reemplazan a los microorganismos mesófilos.
- Asimismo, esta fase cumplió una función biológica de higienización del sustrato. Según (Shuldt 2022), las temperaturas superiores a los 55 °C garantizaron la destrucción efectiva de patógenos entéricos (como *Salmonella* sp y *Escherichia coli*), así como la inactivación de semillas de malezas presentes en el estiércol bovino, lo cual aseguró la inocuidad del material.

- Finalmente, en la cuarta semana, la temperatura disminuyó a 42°C, evento que marcó el inicio de la fase de enfriamiento, provocada por el agotamiento de los sustratos biodegradables de fácil acceso. Según (Domínguez 2023), este fenómeno redujo paulatinamente la actividad metabólica celular global en el lecho (ver anexo 2).

3.1.2 pH (potencial de hidrógeno)

Según (Fuentes 2022), durante el proceso de biotransformación, esta variable actuó como un indicador ambiental crítico que reguló la solubilidad de los nutrientes, la presión osmótica celular y el desarrollo de las comunidades biológicas encargadas de la estabilización orgánica

Figura 11. Comportamiento de nivel de pH de material orgánico en fase de precompostaje.



Fuente: elaboración propia, 2026

En la figura 11 se detalló la evolución del nivel de pH en las excretas bovinas lecheras, durante las cuatro semanas de estabilización del precompostaje. Como se observó en la curva, existió una tendencia hacia la alcalinización, con un valor inicial de 7.76 hasta 8.56 al cierre de esta etapa.

El sustrato registró un pH inicial de 7.76 en la primera semana. Según (Edwards 2011) (Shuldt 2022), este valor resultó propio de las excretas frescas de ganado bovino lechero, cuya composición presenta sistemas amortiguadores (*buffers*) naturales y una concentración inicial de ácidos orgánicos de cadena corta derivados de la fermentación entérica ruminal.

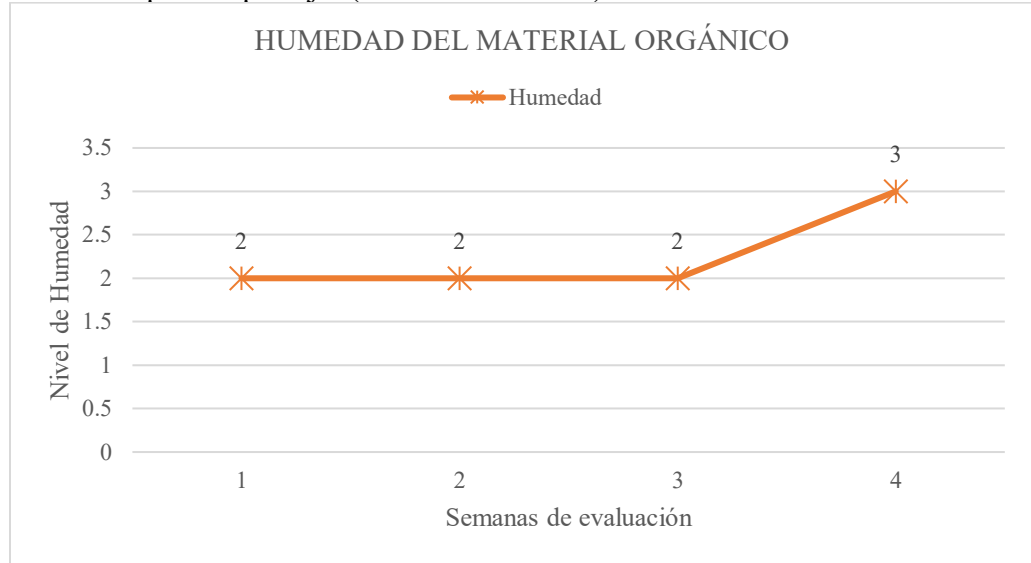
En las semanas 2 y 3, se observó el mayor incremento del pH, con valores que alcanzaron 8.32 y 8.54, respectivamente. Esta elevación coincidió con la fase termofílica activa, fenómeno que respondió a la degradación de compuestos nitrogenados solubles por parte del microbiota autóctono. Dicho catabolismo proteico genera una liberación masiva de grupos amino y la consecuente producción de amoníaco gaseoso (NH_3), un compuesto de carácter básico que, al disolverse en la fracción acuosa del sustrato, se transforma en amonio (NH_4^+) e incrementa el pH hacia la alcalinidad (Shuldt 2022).

Finalmente, durante la semana 4, el potencial de hidrógeno entró en una fase de estabilización, con un registro final de 8.56. Esta desaceleración en la tasa de alcalinización reflejó el paulatino agotamiento de las fracciones nitrogenadas de fácil degradación y una progresiva volatilización del excedente de amoníaco, lo que indujo a un equilibrio químico temporal en la matriz orgánica (Domínguez 2023). (ver anexo 3).

3.1.3 Humedad

En los procesos de estabilización orgánica y vermicompostaje, actúa como el solvente universal y medio de transporte indispensable que disuelve los nutrientes, viabiliza la respiración cutánea de los macroorganismos y permite la difusión de las enzimas extracelulares producidas por la microbiota (Fuentes 2022).

Figura 12. Comportamiento del nivel de humedad de excretas bovinas lecheras, en fase de precompostaje. (control cualitativo)



Fuente: elaboración propia, 2026

En la figura 12 se observó el nivel de humedad registrado por medio de control cualitativo de campo realizado durante las cuatro semanas de la fase de precompostaje. Durante las tres primeras semanas, el sustrato mantuvo un nivel constante y lineal de 2 de la escala cualitativa; este estado óptimo resultó fundamental debido a que el agua actuó como el medio acuoso indispensable para la disolución de nutrientes y la movilidad celular de las bacterias y hongos termófilos. Esta condición coincide con lo señalado por (Domínguez 2023), quien demostró que un sustrato deshidratado detiene la descomposición microbiana.

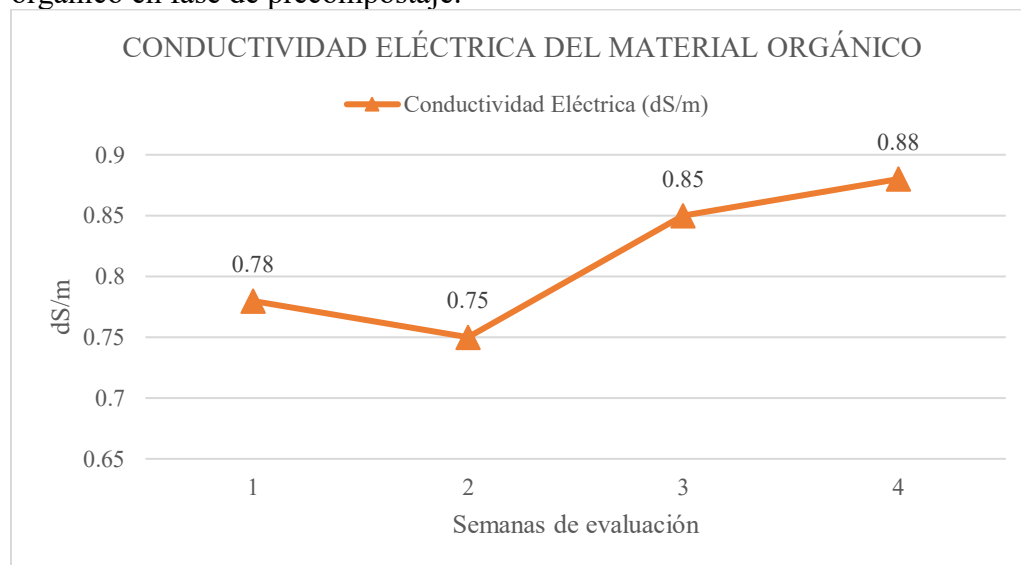
Asimismo, el agua posee un alto calor específico, lo que permitió disipar los excesos de calor metabólico y estabilizó el pico termofílico en los 58 °C registrados en la semana 3. Según lo postulado por (Edwards 2011), este comportamiento térmico evitó la carbonización o desecación del material, e este hecho constituyó un fenómeno de estabilización que validó los principios fundamentales del manejo térmico en sustratos orgánicos.

En la semana 4, se observó un incremento en la curva, la cual alcanzó un valor de 3. Según (M. M. Pilar Román 2019), de este modo, la estabilización de la humedad aseguró la presencia de un espacio poroso libre de agua suficiente para garantizar la difusión de oxígeno y evitó la aparición de zonas de anoxia y malos olores. Este equilibrio fisicoquímico estructuró el ambiente ideal y el confort térmico necesario para dar por concluido el precompostaje, lo cual favoreció la inmediata inocuidad y siembra de los agentes biotransformadores seleccionados: los microorganismos eficientes (EM) y la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav). (ver anexo 4).

3.1.4 Conductividad eléctrica (CE)

Según (Fuentes 2022), la conductividad eléctrica en la evaluación de abonos orgánicos se emplea como un indicador indirecto del proceso de mineralización y de la salinidad total del sustrato, lo cual facilita la determinación de la liberación de nutrientes disponibles y el riesgo potencial de fitotoxicidad en las plantas.

Figura 13. Comportamiento de conductividad eléctrica (dS/m) del material orgánico en fase de precompostaje.



Fuente: elaboración propia, 2026

En la figura 13 se detalló la evolución de la conductividad eléctrica (CE), expresada en deciSiemens por metro (dS/m), en excretas bovinas lecheras durante las cuatro semanas de precompostaje. En la curva se observó un ligero descenso en la primera semana, seguido de un incremento a partir de la segunda semana, estabilizándose en un valor de 0.88dS/m, al finalizar esta fase.

Durante la fase de precompostaje, la conductividad eléctrica experimentó un descenso inicial debido a la dinámica bioquímica del residuo. Según (Román, Martínez y Pantoja 2013), este decremento temprano respondió a la pérdida de sales volátiles como el amoníaco (NH_3), gas generado por la hidrólisis de la urea en las deyecciones. Asimismo, influyeron la lixiviación y la asimilación biológica transitoria de iones por parte de la microbiota mesófila.

Posteriormente, la curva describió un incremento gradual y progresivo hacia el cierre de esta etapa experimental. Según lo expuesto por (Edwards, Arancon y Sherman (2011), respaldado por Domínguez (2023), dicha tendencia ascendente constituyó un indicador del avance en la mineralización de la materia orgánica, puesto que la actividad microbiana degradó macromoléculas complejas. Este proceso provocó la liberación y concentración de sales minerales solubles, fosfatos y potasio en la solución del sustrato.

Esta dinámica fisicoquímica se agudizó por la pérdida de masa del material, lo que elevó la conductividad de forma pasiva. A pesar del alza, el valor máximo de 0.88 dS/m aseguró un entorno de confort para los agentes biotransformadores. Según lo postulado por (Schuldt 2022), este registro se mantuvo significativamente por debajo del umbral crítico de tolerancia para la lombriz coqueta roja, el cual se estipula entre 2.0 y 2.5 dS/m. (ver anexo 5).

Tabla 13. Resultados de los parámetros evaluados del material orgánico durante la fase de precompostaje.

PARÁMETROS EVALUADOS				
Semanas	Temperatura °C	Nivel pH	Humedad	Conductividad eléctrica (dS/m)
1	21	7.76	2	0.78
2	46	8.32	2	0.75
3	58	8.54	2	0.85
4	42	8.56	3	0.88

Fuente: elaboración propia, 2026

3.2 Fase de compostaje (EM) y lombricompostaje.

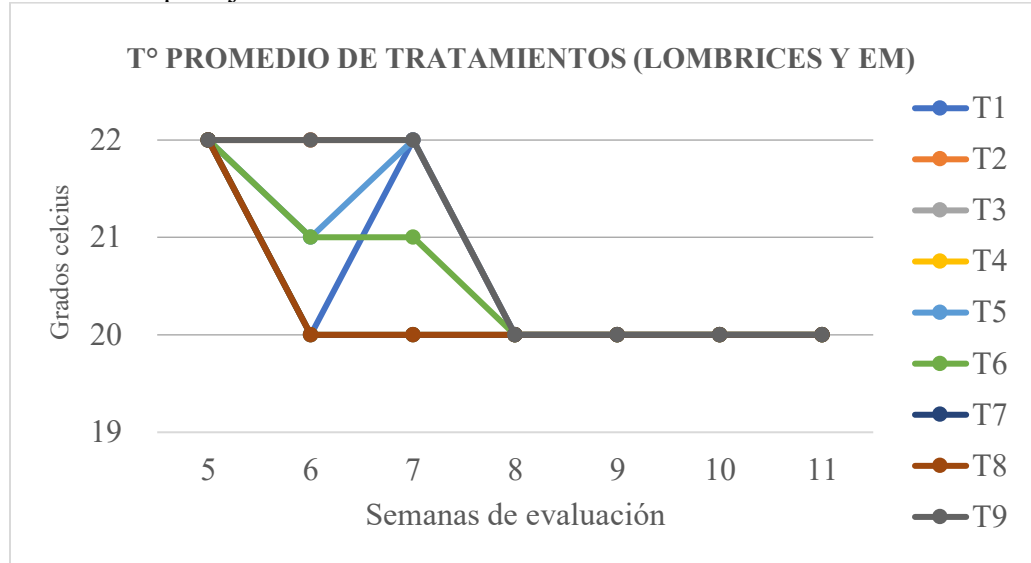
En esta fase se utilizaron las excretas bovinas lecheras precompostadas, distribuidas en 27 unidades experimentales, correspondientes a los 9 tratamientos y 3 repeticiones establecidas. Con base en la dosificación descrita en la tabla 11, se incorporados los agentes biotransformadores: la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav.) y los microorganismos eficientes (EM).

El proceso fue monitoreado semanalmente mediante matrices de registro, tanto a nivel de campo como de laboratorio. Al finalizar la fase experimental, la información fue procesada estadísticamente para el análisis e interpretación de resultados a partir del comportamiento promedio de cada parámetro evaluado.

3.2.1 Temperatura

Los registros de temperatura en las unidades experimentales muestran variaciones claras a lo largo del tiempo. De acuerdo con (Juárez-Sánchez 2022), estos cambios de calor permitieron identificar el comportamiento del sustrato durante el ensayo.

Figura 14. Comportamiento de temperatura promedio de los tratamientos en fase de compostaje



Fuente: elaboración propia, 2026

Tabla 14. Temperatura promedio en grados *Celsius* por tratamiento en fase de compostaje.

TRATAMIENTOS EVALUADOS									
Semanas	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
5	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
6	20.0	22.0	20.0	20.0	21.0	21.0	20.0	20.0	22.0
7	22.0	22.0	20.0	20.0	22.0	21.0	20.0	20.0	22.0
8	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
11	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

Fuente: elaboración propia, 2026

Los registros de la tabla 14, demostraron un comportamiento térmico homogéneo y estable entre los tratamientos evaluados (T1 a T9), desde la semana 5 a la 11. A partir de la semana 5, se detectó que todos los tratamientos iniciaron con una temperatura promedio de 22°C. En las semanas 6 y 7, se presentaron leves fluctuaciones; los tratamientos (T2 y T9) mantuvieron una estabilidad constante de 22°C, y los tratamientos (T1, T4 y T7) descendieron a 20°C.

De acuerdo con (Bernal 2017), la estabilidad térmica visualizada indicó el procesamiento adecuado que tuvo la degradación de la materia orgánica durante la fase termofílica previa, este comportamiento brindó un hábitat estable para garantizar el desarrollo de la lombriz *E. foetida*, cuyo punto adecuado de temperatura es por debajo de los 30 °C.

Por otra parte, las temperaturas registradas en todos los tratamientos oscilaron entre los 20 °C y 22 °C, valores que mostraron una cercanía inmediata con la temperatura ambiental del municipio de Cobán, Alta Verapaz, como se muestra en el anexo 2. Esta disminución drástica del calor interno indicó el cese de la actividad microbiológica exotérmica, un comportamiento que coincidió con lo planteado por (López-Vázquez 2023), quien atribuye este descenso al agotamiento de las fuentes de carbono de fácil degradación.

Al respecto (M. F. Fuentes 2022), señalaron que un sustrato orgánico alcanza su madurez y estabilidad térmica inicial cuando su temperatura se iguala con el entorno. En este escenario, la ausencia de picos térmicos diferenciados entre los tratamientos sugirió que la estabilización de las excretas bovinas lecheras ocurrió de manera uniforme en toda la unidad experimental durante de la semana 5 a la 11.

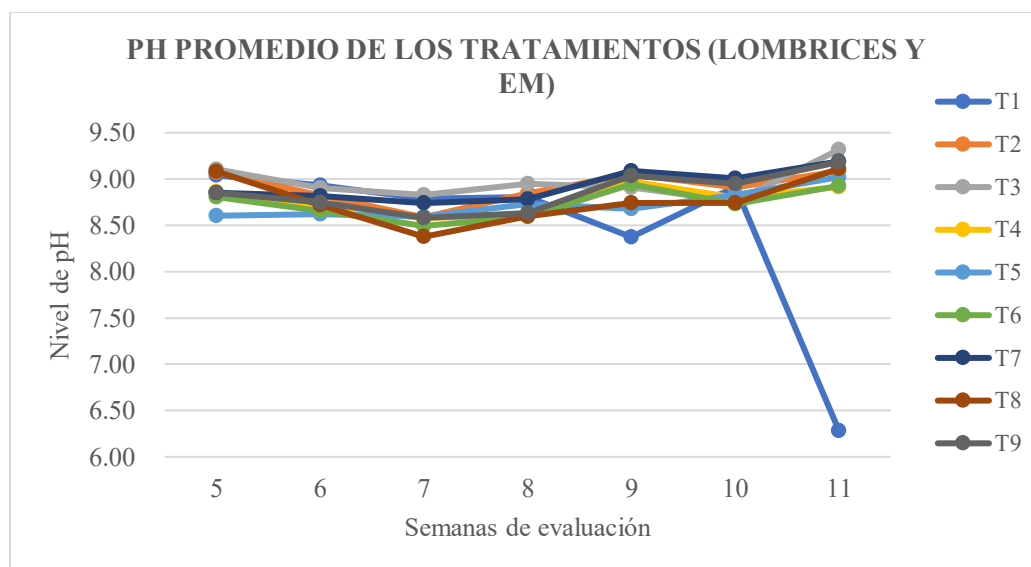
Esta homogeneidad absoluta demostró que las condiciones ambientales fueron idóneas y estables para la acción sinérgica entre los microorganismos eficientes y la población de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida*). De acuerdo con los criterios de manejo poblacional propuestos por (A. Mansoor 2024), dicho equilibrio térmico garantizó un nicho ecológico seguro y libre de recalentamientos letales, lo que propició la biotransformación acelerada del sustrato. homogeneidad absoluta demostró que las condiciones ambientales fueron idóneas y estables para la acción sinérgica de los microorganismos eficientes y la población de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav).

Ello garantizó un nicho ecológico seguro, libre de recalentamientos letales y óptimo para la biotransformación acelerada del sustrato.

3.2.2 pH

El monitoreo del pH permitió registrar los cambios químicos del sustrato durante la investigación. Las lecturas anotadas mostraron la estabilidad del medio a través de los siguientes resultados.

Figura 15. Comportamiento de pH promedio de los tratamientos en fase de compostaje



Fuente: elaboración propia, 2026

Tabla 15. pH promedio por tratamiento en fase de compostaje.

TRATAMIENTOS EVALUADOS									
Semanas	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
5	9.04	9.07	9.11	8.86	8.60	8.80	8.85	9.08	8.85
6	8.93	8.82	8.90	8.71	8.62	8.66	8.82	8.72	8.75
7	8.79	8.59	8.83	8.58	8.59	8.49	8.74	8.38	8.58
8	8.80	8.85	8.95	8.62	8.73	8.59	8.78	8.60	8.63
9	8.37	9.05	8.91	8.97	8.68	8.94	9.09	8.74	9.04
10	8.91	8.91	8.76	8.80	8.83	8.73	9.01	8.74	8.95
11	6.28	9.09	9.32	8.92	9.02	8.93	9.19	9.11	9.18

Fuente: elaboración propia, 2026

La tabla 15 presentó los valores de pH registrados, los cuales mostraron un carácter alcalino en la mayoría de los tratamientos evaluados. En la semana 5, el pH osciló entre un mínimo de 8.60 (T5) y un máximo de 9.11 (T3).

Entre las semanas 6 y 8, se observó un ligero descenso hacia la neutralidad en prácticamente todas las unidades experimentales, alcanzando valores mínimos que rondaron los 8.38 a 8.58 en la semana 7.

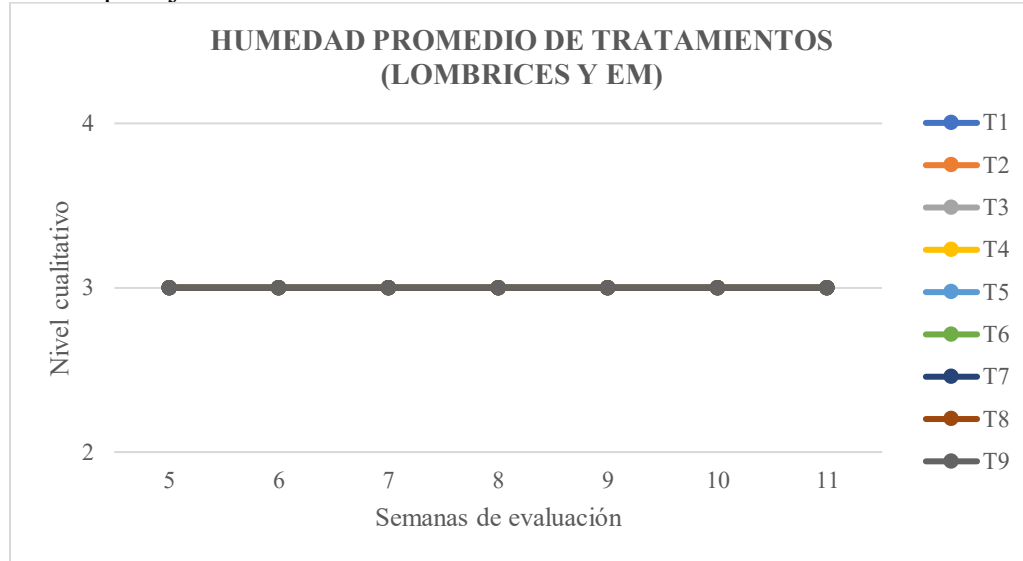
Asimismo, a partir de la semana 9 hasta la 11, la mayoría de los tratamientos manifestaron un repunte en su alcalinidad, estabilizándose en niveles superiores a 8.90 y alcanzando picos de 9.32 (T3) y 9.19 (T7) al cierre del ciclo. En contraposición, el tratamiento testigo, (T1) que no contó con (EM), sufrió un descenso hasta un valor de 6.28 en la semana 11 (ver anexo 3).

Este comportamiento posicionó al testigo como el único registro de carácter levemente ácido en todo el bloque experimental. Esta disminución abrupta en las etapas maduras del proceso coincidió con lo descrito por (A. M.-T.-Y. López-Vásquez 2023), quien asocia este fenómeno a una intensificación de la actividad de las bacterias nitrificantes, las cuales liberaron iones de hidrógeno al transformar el amonio (NH_4^+), en nitrato, o bien a la acumulación de ácidos orgánicos de cadena corta ante variaciones locales en la aireación del sustrato.

3.2.3 Humedad

El monitoreo de la variable sirvió como control básico para vigilar la cantidad de agua disponible en el sustrato durante la investigación, las mediciones reflejaron la estabilidad del medio a través de los datos siguientes:

Figura 16. Comportamiento de humedad promedio de los tratamientos en fase de compostaje



Fuente: elaboración propia, 2026

Tabla 16. Humedad promedio por tratamiento en fase de compostaje.

Semanas	TRATAMIENTOS EVALUADOS								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	3	3	3	3	3	3	3	3	3
11	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Fuente: elaboración propia, 2026

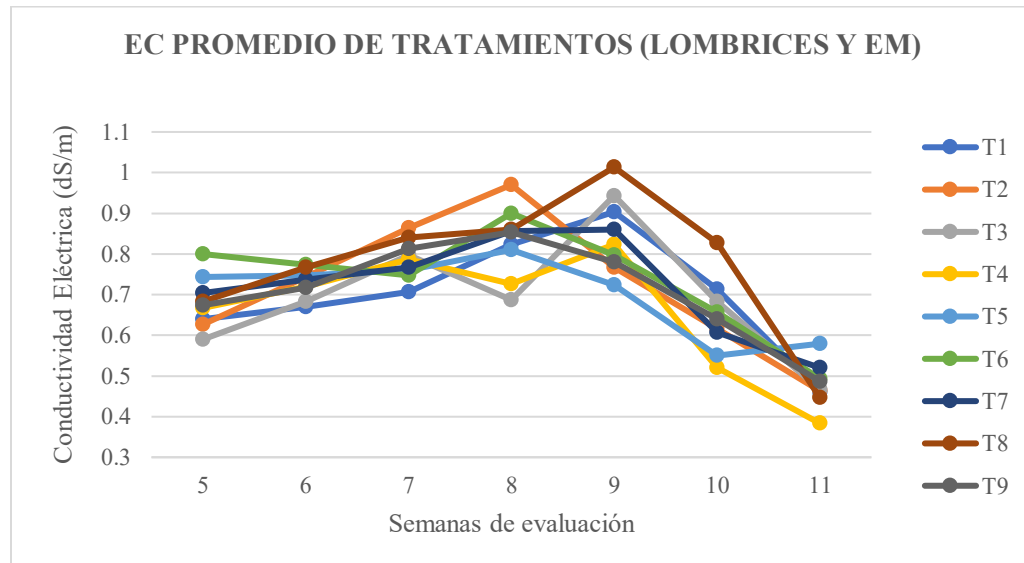
Al analizar los datos en la tabla 16, la humedad destacó como uno de los parámetros de mayor estabilidad durante la fase de evaluación, pues todos los tratamientos mantuvieron la clasificación cualitativa de tres, como se muestra en el anexo 4. Al realizar el control de campo por medio de la técnica de puño, se observó que el sustrato permaneció húmedo al tacto sin liberar exceso de agua por escurrimiento ni manifestar resequedad. Según (G. Fuentes 2022), esta escala representó el punto óptimo de equilibrio hídrico. Dicha constancia evidenció que las pérdidas de evaporación natural y el metabolismo celular se compensaron de forma precisa mediante riegos controlados aplicados a las unidades experimentales.

Esta estabilidad previno la compactación del medio y evitó tanto la desecación del material base como la saturación de los poros por encharcamiento (Schuldt 2005). Al respecto (Mansoor 2024), señaló que un rango óptimo de humedad previene la migración de los anélidos y optimiza sus tasas de reproducción. En consecuencia, el manejo uniforme reflejado en los resultados garantizó un nicho ecológico seguro para la respiración cutánea de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y salvaguardó la vitalidad de los microorganismos eficientes (EM), para la degradación de las fracciones orgánicas.

3.2.4 Conductividad eléctrica

El monitoreo de la conductividad eléctrica sirvió para vigilar el comportamiento químico y la liberación de nutrientes en el sustrato. Los registros obtenidos reflejaron la estabilidad del medio a través de la siguiente evolución de los datos:

Figura 17. Comportamiento de conductividad eléctrica promedio en fase de compostaje



Fuente: elaboración propia, 2026

Tabla 17. Conductividad eléctrica promedio por tratamiento en fase de compostaje.

Semanas	TRATAMIENTOS EVALUADOS								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
5	0.64	0.63	0.59	0.67	0.74	0.80	0.70	0.68	0.67
6	0.67	0.74	0.68	0.72	0.75	0.77	0.74	0.77	0.72
7	0.71	0.86	0.80	0.79	0.76	0.75	0.77	0.84	0.81
8	0.82	0.97	0.69	0.73	0.81	0.90	0.86	0.86	0.85
9	0.90	0.77	0.94	0.82	0.72	0.80	0.86	1.01	0.78
10	0.71	0.62	0.68	0.52	0.55	0.66	0.61	0.83	0.64
11	0.46	0.46	0.47	0.38	0.58	0.49	0.52	0.45	0.49

Fuente: elaboración propia, 2026

Al analizar la tabla 17, la conductividad eléctrica (CE) mostró una dinámica de oscilación en todas las unidades experimentales entre las semanas 5 y 11. En la semana 5, la variable inició en un rango bajo y homogéneo entre 0.59 dS/m (T3) y 0.80 dS/m (T6), seguido de un incremento progresivo que alcanzó sus puntos máximos en las semanas 8 y 9. De manera particular, el T8 registró el valor más alto de todo el ciclo con 1.01 dS/m en la semana 9, seguido por el T2 con 0.97 dS/m en la semana 8. Según lo descrito por (López-Vásquez 2023). Este aumento respondió a la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos eficientes (EM), proceso en el cual se dio la liberación de sales solubles como amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-)

Posteriormente, a partir de la semana 10 se detectó un descenso uniforme que se consolidó al cierre del experimento (semana 11), donde las lecturas disminuyeron hacia sus niveles mínimos, con valores de 0.38 dS/m (T4) y 0.58 dS/m (T5). De acuerdo con (G. Fuentes 2022), esta reducción de la salinidad en las etapas de maduración se asoció al lavado paulatino de los iones libres provocado por el manejo constante de los riegos periódicos. Asimismo, (A. Mansoor 2024), atribuye esta dinámica a la asimilación biológica e inmovilización nutricional, donde la microbiota y las lombrices absorbieron los nutrientes solubles para la síntesis de biomasa celular.

El monitoreo de la CE resultó vital debido a que como señalaron (A. Mansoor 2024), el umbral crítico de tolerancia para la supervivencia y reproducción de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), se sitúa por debajo de los 4.0 dS/m. Dado que el valor máximo en este estudio fue de tan solo 1.01 dS/m y el promedio final se mantuvo inferior a 0.60 dS/m, se corroboró que el sustrato mantuvo condiciones óptimas de inocuidad osmótica, como se muestra en el anexo. Estos niveles eliminaron el riesgo de estrés hídrico en los anélidos y consolidaron un abono orgánico final seguro y libre de fitotoxicidad.

3.3 Análisis de las variables fisicoquímicas en las fases de precompostaje y compostaje (EM) y lombricompostaje

3.3.1 Temperatura

Fase precompostaje (semanas 1 a 4): mostró una curva de campana, dio inicio en 21°C (fase mesófila) y ascendió aceleradamente en la segunda semana (46°C), alcanzó un pico termófilo de (58°C), en la tercera semana, Este incremento de temperatura permitió la higienización del sustrato (eliminación de patógenos como *Salmonella sp*, *E coli* y semillas de malezas). En la semana 4, descendió a 42°C por el agotamiento de nutrientes de fácil degradación.

Fase de compostaje: (semanas 5 a 11): presentó un comportamiento plano, homogéneo y frío en todos los tratamientos (T1 a T9), con oscilaciones estrictamente entre 20°C y 22°C. La ausencia de picos térmicos indicó que la actividad exotérmica cesó debido a la madurez del sustrato, igualándose con la temperatura ambiental del municipio de Cobán, A.V. lo que garantiza un nicho seguro (menor a 30°C) libre de recalentamientos letales para la (*Eisenia foetida* Sav).

3.3.2 Potencial de hidrógeno (pH):

- Fase de precompostaje (semanas 1 a 4): sufrió una marcada tendencia hacia la alcalinización, con un incremento de 7.76 a 8.56. El aumento más agudo ocurrió en las semanas 2 y 3 (8.32 y 8.54), debido al catabolismo proteico

microbiano que liberó grupos amino, este proceso generó amoníaco gaseoso (NH_3), que al disolverse en el agua formó amonio (NH_4^+), lo que elevó el pH del medio.

- Fase de compostaje (semanas 5 a 11): la mayoría de los tratamientos con microorganismos eficientes (EM), mantuvieron niveles marcadamente alcalinos, al final del ciclo hasta valores entre 8.90 y 9.32 debido al equilibrio de la matriz orgánica. No obstante, existió una notable excepción: el tratamiento testigo (T1, sin EM), sufrió un colapso ácido en la semana 11 y provocó una caída a 6.28, atribuido a la actividad de bacterias nitrificantes (que liberan protones H^+), o acumulación local de ácidos orgánicos cortos por falta de aireación.

3.3.3 Humedad

- Fase de precompostaje (semanas 1 a 4): se manejó en un nivel constante de 2 (escala cualitativa) mediante riegos programados para la disipación del calor metabólico en el pico termofílico. En la semana 4, se alcanzó el numeral 3 para preparar el material de cama para los agentes biodegradadores.
- Fase de compostaje (semanas 5 a 11): se mantuvo con una estabilidad absoluta en el nivel 3 en todos los tratamientos. Evaluado bajo la prueba del puño, el sustrato retuvo su forma sin escurrimientos ni resequedad. Esta constancia hídrica fue fundamental, porque: permitió la difusión de enzimas extracelulares de las bacterias ácido-lácticas y levaduras (EM) y garantizó la respiración cutánea de (*Eisenia foetida Sav*) y evitó la deshidratación o la anoxia por encharcamiento.

3.3.4 Conductividad eléctrica (CE)

- **Fase de precompostaje** (semanas 1 a 4): inició con un descenso transitorio en la semana 1 (0.78 dS/m) debido a la asimilación microbiana y volatilización del amoníaco, seguido de un incremento gradual hasta 0.88 dS/m en la semana 4. Este aumento inicial fue el primer indicador de la

mineralización y del efecto de concentración por la pérdida de masa carbonada volátil.

- **Fase de compostaje** (semanas 5 a 11): exhibió una dinámica parabólica muy clara en todos los tratamientos. Entre las semanas 6 y 9 la salinidad aumentó de forma generalizada por la liberación continua de iones disponibles (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+), con un pico máximo del ensayo en el T8 con 1.01 dS/m (semana 9). Sin embargo, en las semanas 10 y 11, los valores cayeron drásticamente hasta un mínimo de 0.38 dS/m (T4) y 0.58 dS/m (T5). Esta disminución final se debió a la lixiviación de sales por los riegos y a la inmovilización biológica (asimilación de nutrientes en los tejidos de las lombrices).

Toda la dinámica fisicoquímica de la transición demostró que la fase de precompostaje preparó el sustrato de manera óptima. Al iniciar el compostaje, la CE máxima (1.01 dS/m) y la temperatura estable (20°C - 22°C) se mantuvieron muy por debajo de los umbrales de estrés de la lombriz (límites críticos de 4.0 dS/m y 30°C respectivamente), lo cual consolidó un ecosistema seguro, balanceado y metabólicamente viable para la biotransformación de las excretas bovinas lecheras.

3.4 Tratamiento con menor tiempo de biodegradación

Según el informe de ANALAB para las variables fisicoquímicas y los indicadores de estabilización de la materia orgánica evaluados en el laboratorio, el tratamiento que presentó el menor tiempo de biodegradación y la mayor eficiencia en la velocidad de maduración fue el tratamiento (T6), y se tomaron los siguientes criterios:

3.4.1 Relación carbono/nitrógeno (C/N)

El T6 logró la relación C/N más baja al terminar la fase experimental (20.37). Una disminución acelerada de esta relación fue el indicador principal de una alta actividad microbiana y una degradación rápida del carbono orgánico.

3.4.2 Mayor grado de mineralización (cenizas)

Este tratamiento reflejó un incremento significativo en el porcentaje de cenizas, lo que demostró que la materia orgánica se descompuso y se convirtió en sustancias estables en un menor periodo de tiempo.

3.4.3 Estabilización del pH y Humedad

El T6 mostró una transición más eficiente hacia la fase de maduración, por lo que alcanzó la estabilidad óptima requerida para el compost final, impulsado por los microorganismos eficientes (EM). Por lo tanto, el tratamiento 6 se identificó como el más eficiente en términos de cinética de biodegradación, por conseguir la estabilización del sustrato de manera más precoz que los demás tratamientos evaluados.

3.5 Análisis fisicoquímico de los nueve tratamientos evaluados

Con base en el informe de resultados emitido por el laboratorio ANALAB, los valores de cada variable fisicoquímica permitieron determinación y categorización de los grupos de significancia correspondientes, de acuerdo con la prueba estadística de comparación de medias Tukey (Di Rienzo 2020).

Tabla 18. Resumen de análisis de laboratorio

Variable	Tratamiento más bajo (grupo Tukey)	Tratamiento más alto (grupo Tukey)	Media general	Comentario práctico
pH	T6 (8.57, A)	T3 (9.05) y T7 (9.03)	8.80	Alcalino; T6 minimiza pérdida de N
C/N	T6 (20.37, A)	T1 y T7 (24.7, G)	22.9	T6, T4 y T8 más maduros
% N	T1 y T7 (1.73 %, A)	T4 (2.04 %, D)	1.87	T4, T8 y T6 mejor aporte N
% P ₂ O ₅	T8 (0.89 %, A)	T3 (1.01 %, C)	0.97	T3 favorable para raíces
% K ₂ O	T7 y T3 (1.13 %, A)	T6 (1.35 %, C)	1.28	T6 mejor aporte K
% MgO	T8 (1.35 %, A)	T3 (1.75 %, E)	1.46	T3 claramente superior

Fuente: Adaptado de análisis de datos de ANALAB, 2026.

La marcada tendencia hacia la alcalinidad observada al finalizar la biotransformación constituyó un comportamiento característico de la madurez y estabilidad en excretas de bovinos lecheros. Al respecto, (C. M. López-Vázquez 2023), señaló que este incremento en el pH respondió al catabolismo microbiano y a la

consecuente liberación de amoníaco (NH_3), durante la desaminación de las proteínas. Bajo este escenario, la capacidad del tratamiento T6 para mitigar dicha alcalinización presentó un hallazgo técnico de gran valor. Como explica orgánica (M. F. Fuentes 2022), una menor fluctuación del pH reduce la volatilización del nitrógeno gaseoso, lo cual justificó el motivo por el cual este tratamiento conservó de mejor manera sus cualidades nutricionales.

Esta dinámica de estabilización se validó mediante la contracción de la relación carbono/nitrógeno (C/N), en los tratamientos T6, T4 y T8, lo cual denota un estado superior de madurez y humificación. Con relación a este fenómeno, (A. Mansoor 2024), afirmó que la reducción de este índice ocurre porque la microbiota utiliza el carbono como fuente de energía y lo libera en forma de dióxido de carbono (CO_2), mientras que el nitrógeno se recicla e inmoviliza en la biomasa microbiana para concentrarse en el producto final. En contraposición, los tratamientos T1 y T7 evidenciaron un proceso de degradación rezagado o de menor eficiencia metabólica, lo que comprometió la maduración oportuna del abono.

Por último, el éxito de T4 en la retención de nitrógeno total sugirió que la incorporación de microorganismos eficientes optimizó la inmovilización biológica del elemento antes de sufrir pérdidas por volatilización, un comportamiento en el que coincide orgánica (M. F. Fuentes 2022), al clasificar a estos tratamientos como excelentes portadores de dicho elemento. En cuanto al fósforo (P_2O_5), potasio (K_2O) y magnesio (MgO), (C. M. López-Vázquez 2023), aclaró que sus fluctuaciones no implicaron una síntesis mineral por los agentes biotransformadores, sino un efecto de concentración derivado de la pérdida de peso de la masa inicial por la destrucción de la materia orgánica volátil. Desde una perspectiva práctica, la superioridad de T3 en fósforo y magnesio potenció el desarrollo radicular y la fotosíntesis, mientras que (A. Mansoor 2024), destacó que el aporte de potasio en T6 favoreció la regulación osmótica vegetal, lo que demostró que la selección de los agentes alteró drásticamente la calidad de la enmienda (ver anexo 1).

3.5.1 El pH (potencial de hidrógeno)

En el ámbito zootécnico y ambiental actúa como un parámetro crítico que regula la solubilidad de nutrientes, las pérdidas gaseosas de nitrógeno y la viabilidad biológica de la microbiota encargada de la estabilización orgánica (M. F. Fuentes 2022).

Tabla 19. Comparación de medias de pH por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T6	8.57	A
T4	8.63	AB
T2	8.69	AB
T8	8.75	ABC
T5	8.80	BC
T9	8.81	BC
T1	8.92	CD
T7	9.03	D
T3	9.05	D

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

Los valores del potencial de hidrógeno (pH) al cierre del estudio mostraron una tendencia general hacia la alcalinidad. Como se muestra en anexo 12, comportamiento que (C. M. López-Vázquez 2023), atribuyó a la liberación de amoníaco (NH_3) durante la desaminación de las proteínas en excretas bovinas. No obstante, la capacidad del T6 para mitigar este incremento constituyó un indicador técnico de gran valor técnico. Al contrastar este resultado con los criterios de (M. F. Fuentes 2022), se confirmó que un pH menos alcalino reduce la volatilización del nitrógeno gaseoso; lo que explicó por qué dicho tratamiento conservó de mejor manera sus cualidades nutricionales.

Esta estabilidad química se corroboró mediante la relación carbono/nitrógeno (C/N), donde los valores más bajos se dieron en el tratamiento (T6), denotaron un mayor grado de madurez, humificación y estabilidad del sustrato. Según señaló (M. F. Fuentes 2022), la reducción de este índice ocurre porque la microbiota consume el carbono como fuente de energía y lo libera en forma de dióxido de carbono (CO₂). En contraste, y siguiendo la lógica de (A. Mansoor 2024), sobre los procesos biológicos retardados, las relaciones C/N más elevadas en los tratamientos T1 y T7 evidenciaron un proceso de biodegradación rezagada, donde el nitrógeno no logró concentrarse eficientemente en la biomasa microbiana.

Por otra parte, la concentración final de macronutrientes (N, P₂O₅, K₂O y MgO), reflejó la eficiencia biológica de la investigación. El éxito del tratamiento (T4), en la retención de nitrógeno sugirió que los microorganismos eficientes (EM), optimizaron la inmovilización del elemento antes de su pérdida por volatilización, dinámica que coincidió con las observaciones de (M. F. Fuentes 2022), para tratamientos biológicamente estables. Asimismo, las fluctuaciones en el resto de los minerales se explicaron bajo el modelo de (C. M. López-Vázquez 2023), quien demostró que el aumento de cenizas respondió a la pérdida de masa inicial por la reducción del material orgánico volátil.

3.5.2 Relación C/N

La relación carbono-nitrógeno, es un indicador químico que mide la proporción de masa entre el carbono y nitrógeno total, presentes en el sustrato, fue usado para medir la velocidad de descomposición y valor nutricional del compostaje. (Román 2013).

Tabla 20. Comparación de medias para la relación C/N por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T6	20.37	A
T4	20.96	B
T8	21.67	C
T9	22.75	D
T2	23.29	E
T3	23.40	E
T5	24.20	F
T1	24.72	G
T7	24.74	G

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

La relación carbono/nitrógeno (C/N) constituyó el parámetro bioquímico fundamental para verificar la dinámica de la degradación y el grado de madurez alcanzado por el sustrato al finalizar los 45 días de la fase experimental. Los resultados analíticos que emitió el laboratorio ANALAB revelaron que, al cierre del ciclo, los valores de la relación C/N oscilaron entre un mínimo de 20.37 (Tratamiento 6) y un máximo de 24.72 (tratamiento 1,7) (ver anexo 13).

Para comprender el alcance de estos datos fue necesario contrastarlos con los postulados de (C. A. Edwards 2011), quienes señalan que una relación C/N en un rango de 15 a 20 es el indicador universal de un vermicompost maduro, estabilizado y quimio-orgánicamente seguro para los agroecosistemas. Bajo este criterio bioenergético, los tratamientos evaluados alcanzaron una fase de madurez temprana e intermedia.

Aunque algunos valores se situaron ligeramente por encima del límite ideal de 20, reflejaron un descenso drástico respecto a las relaciones C/N habitualmente elevadas de las excretas bovinas frescas, las cuales superan un valor de 30 a 40. Esta tendencia decreciente coincidió con las investigaciones de (M. Schuldt 2022) y (P. M. Román 2013), sobre la degradación de residuos orgánicos.

Dichos autores explicaron que la reducción de la relación C/N resultó directamente de la pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono CO_2 gaseoso, el cual se liberó de forma continua debido a la respiración y al metabolismo energético de la microbiota aeróbica y de los microorganismos eficientes (EM) inoculados.

Asimismo, influyó el efecto de concentración pasiva del nitrógeno total, catalizado por la disminución de la masa total del sustrato a medida que los polímeros carbonados complejos fueron digeridos por los agentes biotransformadores.

Al analizar minuciosamente el bloque experimental. Se destacó que el tratamiento 6 (T6) obtuvo la relación más baja (20.37), seguido de cerca por el tratamiento 4 (T4) (20.96). Desde una perspectiva cinética, estos dos tratamientos manifestaron la mayor velocidad de descomposición y mineralización del carbono orgánico inicial.

Este comportamiento demostró la alta eficiencia bioquímica de las cepas inoculadas de microorganismos eficientes (EM) utilizadas. Al operar como agente biotransformador único en los tratamientos pares, los EM aceleraron de forma acelerada el catabolismo celular de las fracciones celulíticas y lignocelulósicas de las excretas de ganado bovino lechero sin asistencia de anélidos.

En contraste, los valores más altos registrados en el tratamiento 1 (testigo, con un valor de 24.72), confirmaron que, ante la ausencia de agentes biotransformadores inoculados, la microbiota nativa procesó el carbono a una tasa significativamente más lenta.

Desde el punto de vista de la aplicación agrícola, la obtención de estos rangos intermedios-bajos garantizó que el material biotransformado poseía la estabilidad biológica necesaria para ser incorporado al suelo de manera inmediata.

Según sostuvieron (G. Fuentes 2022) y (J. Domínguez 2023), una relación C/N cercana a 20 aseguró que el equilibrio microbiológico del suelo no se verá alterado por fenómenos de “hambre de nitrógeno e inmovilización de nutrientes.

Al ser aplicado en las dosis técnicas correspondientes para los cultivos de la región de Cobán, Alta Verapaz, el abono actuará como un sustrato liberador y mineralizador de nitrógeno neto disponible, lo que elimina cualquier riesgo de competencia nutricional o fitotoxicidad inducida en la rizósfera de las plantas.

3.5.3 Materia orgánica

Su presencia es crucial para el funcionamiento del ecosistema edáfico, ya que la descomposición biológica y la posterior estabilización del carbono orgánico dictan propiedades fundamentales como la retención de humedad, la estructura porosa, el intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes a través de la mineralización (Base 2025).

Tabla 21. Comparación de medias de MO por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T6	73.00	A
T3	75.07	B
T4	76.97	C
T7	77.00	C
T9	77.00	C
T1	77.00	C
T2	78.00	CD
T5	78.07	D
T8	79.00	D

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

De acuerdo con los análisis de laboratorio reflejados en la tabla 21, el porcentaje de materia orgánica (MO), remanente al final del ensayo constituyó un indicador inverso de la eficiencia en el proceso de biotransformación. Como se muestra en el anexo 14. Al respecto, (J. M. López-Vázquez 2023), explicó que, en la estabilización de excretas bovinas, una disminución pronunciada en los valores finales de MO refleja una mayor tasa de mineralización y degradación de los compuestos complejos. Mediante este proceso metabólico, los agentes biológicos transformaron el carbono inestable en energía celular y lo liberaron al ambiente en forma de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua.

Bajo esta premisa, el éxito del tratamiento T6 confirmó que fue el medio biológicamente más activo de la investigación. De acuerdo con los criterios establecidos por (M. F. Fuentes 2022), la adición de microorganismos eficientes (EM), optimizó la colonización del microbiota heterótrofa, lo cual estimuló la secreción de enzimas extracelulares que atacaron polímeros recalcitrantes del estiércol como la celulosa y la hemicelulosa. Como consecuencia de esta intensa actividad, el sustrato mutó hacia un producto final más estable y concentrado químicamente, lo que justificó su correspondencia directa con una relación C/N más estrecha y un pH controlado.

Por el contrario, los tratamientos de menor desempeño (como T8 y T5) manifestaron un retraso en la dinámica de descomposición de la materia orgánica. (M. F. Fuentes 2022), atribuyó este comportamiento a la falta de un acoplamiento metabólico ideal entre las poblaciones nativas y los EM inoculados. Asimismo, y en consonancia con el modelo de (J. M. López-Vázquez 2023), esta baja actividad biológica prolongó el periodo necesario para alcanzar la madurez comercial e inocuidad del abono, puesto que la eficiencia de los consorcios microbianos dependió estrictamente de las condiciones microambientales de cada tratamiento.

3.5.4 Nitrógeno

Tabla 22. Comparación de medias de N total por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T1	1.73	A
T7	1.73	A
T3	1.78	AB
T5	1.79	B
T2	1.86	C
T9	1.88	C
T6	1.99	D
T8	2.02	D
T4	2.04	D

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

El nitrógeno constituyó uno de los macronutrientes más críticos en la evaluación de los abonos orgánicos, debido a que su conservación refleja el éxito biológico en el manejo de las excretas. Al respecto, (J. M. López-Vázquez 2023), señaló que, en la estabilización de estiércol bovino, este elemento suele perderse con facilidad debido a la volatilización del amoníaco gaseoso (NH_3), un proceso físico que se estimula ante condiciones de alta temperatura y pH básico en el sustrato. Por lo tanto, la capacidad del sistema para retener este nutriente definió el valor comercial y agronómico final para la nutrición vegetal.

Bajo esta premisa, el notable desempeño de tratamientos como el T4, T8 y T6 representó una alta eficiencia en la retención del nitrógeno. (Ver anexo15). Con base en las investigaciones de (M. F. Fuentes 2022), este fenómeno de conservación se fundamentó en la inoculación de microorganismos eficientes (EM), los cuales promovieron la asimilación del nitrógeno soluble en formas orgánicas estables; de este modo, la microbiota utiliza los iones amonio (NH_4^+) disueltos para la síntesis de proteínas celulares, lo cual fijó el elemento en sus propias estructuras biológicas antes de su escape hacia la atmósfera.

Este comportamiento mostró plena coherencia con las variables fisicoquímicas analizadas previamente, ya que las unidades experimentales más eficientes coincidieron con los valores más bajos de pH y las relaciones C/N más estrechas. Tal como describe (M. F. Fuentes 2022), un pH controlado por debajo de los rangos altamente alcalinos disminuyó drásticamente la conversión de amonio a gas amoníaco, lo que salvaguardó la riqueza química del abono. En contraste, en los tratamientos deficientes (T1 y T7) prevaleció la vía de la volatilización libre debido a una menor interacción biológica equilibrada.

3.5.5 Fósforo

Tabla 23. Comparación de medias de P_2O_5 por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T8	0.89	A
T7	0.91	AB
T2	0.95	ABC
T6	0.96	ABC
T1	0.97	ABC
T5	0.97	ABC
T9	0.98	BC
T4	0.98	BC
T3	1.01	C

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

A diferencia del nitrógeno o del carbono, el fósforo constituyó un elemento sumamente estable dentro de la matriz orgánica que no se perdió por vías gaseosas o de volatilización. Al respecto, (J. M. López-Vázquez 2023), señaló que la dinámica de este macronutriente a lo largo del proceso se rigió principalmente por dos fenómenos contrapuestos: la asimilación biológica para el desarrollo celular y el efecto físico de concentración mineral derivado de la pérdida de masa del sustrato.

Bajo este principio, la mayor presencia de fósforo en tratamientos como el T3 respondió a un marcado efecto de concentración aparente. (ver anexo 16). Tal como describió (A. Mansoor 2024), cuando los microorganismos y la macrofauna degradaron activamente la materia orgánica fácil de metabolizar, redujeron el volumen total y el peso seco del medio mediante la liberación de CO₂ y agua. Al contraerse la masa total, los elementos estables, como los fosfatos, incrementaron su proporción relativa en el producto final humificado.

Por otro lado, los tratamientos que mantuvieron porcentajes menores (como T8 y T7) sugirieron una dinámica de inmovilización y consumo biológico. (M. F. Fuentes 2022), atribuyó este comportamiento a que, durante las etapas de alta actividad metabólica, tanto las bacterias benéficas como las lombrices absorbieron los fosfatos solubles para la biosíntesis de ácidos nucleicos y ATP. Este equilibrio aseguró que el elemento se mantuviera en formas químicas estables pero asimilables para las plantas al momento de su aplicación en campo.

Las ligeras diferencias estadísticas observadas entre los tratamientos demostraron que cada combinación específica de agentes biotransformadores moduló de manera única el balance entre el consumo microbiano y la concentración por pérdida de peso seco.

3.5.6 Óxido de potasio

Tabla 24. Comparación de medias de óxido de potasio (K_2O) por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T7	1.12	A
T3	1.14	A
T8	1.23	AB
T5	1.25	BC
T4	1.29	BC
T2	1.29	BC
T9	1.30	BC
T1	1.34	BC
T6	1.35	C

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

La tabla 24 reportó los valores promedios del contenido de óxido de potasio (K_2O), en porcentajes (%), registrados al finalizar la fase experimental, donde las medias oscilaron en un rango que va desde 1.12% hasta 1.35% (ver anexo 17).

A diferencia del nitrógeno, el potasio no se encuentra integrado en estructuras orgánicas complejas como proteínas o lípidos. Al respecto, (M. F. Fuentes 2022) señaló que este macronutriente se halla principalmente en forma iónica (K^+), dentro de los fluidos celulares del material vegetal y el sustrato. Por lo tanto, su dinámica a lo largo del proceso de biotransformación no dependió de la síntesis de nuevas moléculas, sino de la capacidad física de la matriz orgánica para retener este ion libre y evitar su pérdida por factores externos.

Bajo este principio, los menores valores registrados en tratamientos como el T7 y T3 sugirieron que las condiciones del medio propiciaron una mayor escorrentía o migración iónica del elemento. Tal como explicó (M. F. Fuentes 2022), al ser el potasio un ion sumamente móvil y soluble, cualquier exceso ocasional de humedad o un retraso en la estabilización de la matriz orgánica facilitó su lavado fuera del sistema; este fenómeno disminuyó de forma drástica la concentración remanente del mineral en el producto final humificado.

Desde la perspectiva agronómica, la retención de óxido de potasio (K_2O), liderada por el éxito del tratamiento (T6), constituyó un indicador de alta eficiencia biotransformadora. (M. F. Fuentes 2022), sostuvo que la conservación de este macronutriente en niveles óptimos demostró que el proceso biológico estabilizó el entorno adecuadamente. Esto aseguró que el elemento permaneciera en formas disponibles para cumplir su función de fertilizante, lo cual resultó clave para la estimulación del desarrollo vegetal y la osmorregulación en los cultivos.

3.5.7 Óxido de calcio

Tabla 25. Comparación de medias de óxido de calcio (CaO) por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T7	2.14	A
T6	2.34	AB
T8	2.39	AB
T2	2.41	AB
T1	2.43	AB
T9	2.46	B
T5	2.47	B
T4	2.49	B
T3	2.58	B

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

La tabla 25 mostró los valores promedio del contenido de óxido de calcio en porcentajes, registrados en los tratamientos evaluados al concluir la fase de estabilización, donde se observó un incremento progresivo en la concentración de calcio entre los sustratos, cuyos promedios oscilaron de 2.14% a 2.58%. (ver anexo 18).

A nivel bioquímico, la variabilidad en el contenido de óxido de calcio estuvo ligada a la eficiencia en la estabilización de los sustratos, debido a que este elemento desempeñó un papel estructural fundamental en las paredes celulares de los forrajes consumidos por el ganado bovino. Tal como sostuvo (M. F. Fuentes 2022), al ser un componente no volátil y con baja tasa de lixiviación en sistemas controlados, su comportamiento dinámico a lo largo de

la biotransformación no dependió de pérdidas gaseosas, sino que se gobernó por la reducción de la biomasa total del sustrato.

A nivel bioquímico, la variabilidad en el contenido de óxido de calcio estuvo ligada a la eficiencia en la estabilización de los sustratos, debido a que este elemento desempeñó un papel estructural fundamental en las paredes celulares de los forrajes consumidos por el ganado bovino. Tal como sostuvo (M. F. Fuentes 2022), al ser un componente no volátil y con baja tasa de lixiviación en sistemas controlados, su comportamiento dinámico a lo largo de la biotransformación no dependió de pérdidas gaseosas, sino que se gobernó por la reducción de la biomasa total del sustrato.

Bajo este enfoque, los mayores valores de calcio observados en tratamientos como el T3 se explicaron a través del fenómeno físico de concentración por pérdida de peso seco. Con base en el modelo de (A. Mansoor 2024), la intensa actividad metabólica de los agentes biotransformadores aceleró la descomposición de las fracciones de carbono lábil, las cuales se desprendieron del medio en forma de dióxido de carbono (CO₂) gaseoso y vapor de agua.

Esta merma en la masa total causó que los minerales estables e inmóviles elevaran de forma proporcional su porcentaje en el producto final humificado.

En contraste, el menor desempeño del tratamiento T7 sugirió un menor grado de degradación de la materia orgánica o una menor tasa de mineralización del estiércol bovino. De acuerdo con (M. F. Fuentes 2022), si la actividad de la macro y microbiota fue más pausada, la reducción del volumen total resultó menos pronunciada, lo que atenuó el efecto de concentración aparente del mineral. No obstante, la presencia de niveles significativos de este elemento en el ensayo aseguró un producto idóneo para regular el intercambio catiónico y estimular el crecimiento radicular en los cultivos.

3.5.8 Óxido de magnesio

Tabla 26. Comparación de medias de óxido de magnesio (MgO) por tratamiento mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
T8	1.35	A
T7	1.37	AB
T2	1.40	AB
T9	1.41	AB
T6	1.42	AB
T4	1.44	BC
T5	1.51	CD
T1	1.54	D
T3	1.75	E

Nota. Medias con al menos una letra en común no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

La tabla 26 mostró los valores promedio del contenido de óxido de magnesio (MgO) en porcentajes, registrados en los diferentes tratamientos al finalizar la fase experimental, los cuales reflejaron una variación notable en la concentración del elemento, con medias que fueron desde 1.35% a 1.75% (ver anexo 19).

El magnesio constituyó un activador enzimático esencial en el metabolismo microbiano, además de ser el átomo central de la molécula de clorofila en el material vegetal consumido por el ganado. Al respecto, (M. F. Fuentes 2022), señala que, al ser un elemento químicamente estable y no volátil dentro de la matriz del estiércol, su dinámica de acumulación porcentual no sufrió pérdidas por vías gaseosas. Por lo tanto, el comportamiento de esta variable a lo largo del ensayo estuvo ligado de forma directa al grado de descomposición de cada sustrato.

Bajo este principio, la máxima concentración de magnesio registrada en el tratamiento T3 denotó una alta eficiencia en la tasa de biotransformación de las fracciones de carbono orgánico. (J. M. López-Vázquez 2023), explicó que cuando los microorganismos eficientes (EM) y las lombrices procesan activamente la materia orgánica, causaron una reducción sustancial del peso

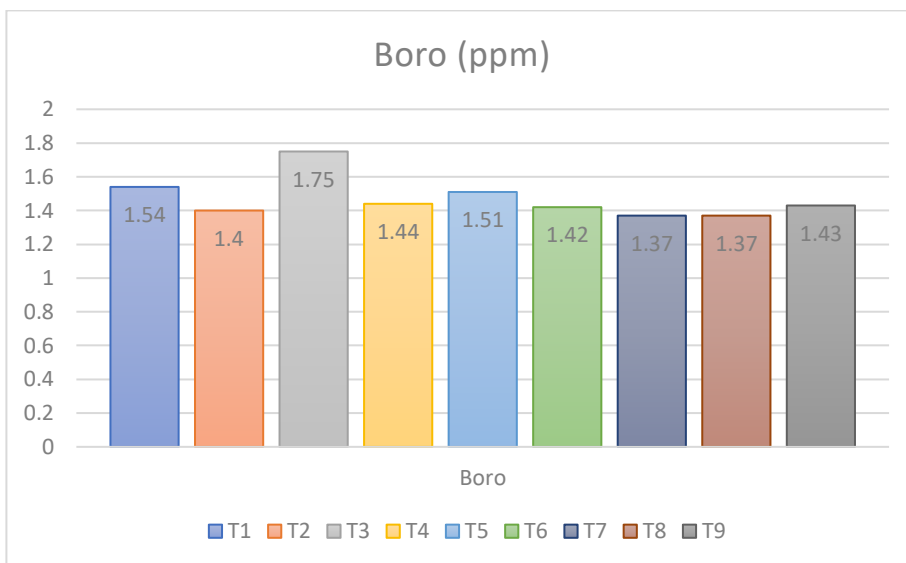
seco y del volumen total mediante la liberación de dióxido de carbono (CO₂) y agua. Esta merma en la masa total generó un efecto de concentración aparente, el cual, según modelo planteado por (A. Mansoor 2024), elevó la proporción de los minerales estables remanentes.

Por el contrario, los tratamientos que se agruparon en los rangos de menor concentración (como el T8) sugirieron un escenario donde la actividad degradativa fue menos intensa. (M. F. Fuentes 2022) atribuyó este comportamiento a que, durante las fases de alta proliferación microbiana, las bacterias benéficas absorbieron los iones libres de magnesio (Mg²⁺) para satisfacer sus requerimientos metabólicos. Estos iones se integraron de forma temporal dentro de la biomasa celular, lo que limitó su presencia inmediata en el medio, aunque aseguró un nutriente balanceado para los cultivos.

3.5.9 Boro

Es un micronutriente esencial para el desarrollo, crecimiento y reproducción de las plantas superiores. Se localiza principalmente en la pared celular y en las membranas citoplasmáticas, siendo indispensable para la síntesis celular, el metabolismo de carbohidratos y el transporte de (Marschner 2012).

Figura 18. Contenido de boro en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 18 detalló la concentración de boro (ppm) obtenida en los nueve experimentos evaluados al finalizar el proceso de estabilización, el rango de las concentraciones osciló entre un mínimo de 1.37ppm hasta un máximo notable de 1.75 ppm.

El boro se caracteriza históricamente por presentar un rango sumamente estrecho entre los umbrales de deficiencia y la inducción de fitotoxicidad en los cultivos. Al respecto, (Camberato 2021) señaló que, al ser un elemento regulado principalmente por el flujo transpiratorio de los vegetales, un exceso en el medio provocó acumulaciones letales en los márgenes foliares de forma acelerada. Aunque las plantas requieren este micronutriente en cantidades mínimas, las concentraciones excesivas en el suelo o en el abono causan necrosis marginal en las hojas.

En tal sentido, los valores encontrados en esta investigación representaron un aporte seguro y benéfico para el manejo agronómico regional, ya que la estabilidad cuantitativa indicó regularidad general en el proceso de biotransformación. Al realizar la comparación bibliográfica con los estándares

de calidad para enmiendas orgánicas revisados por la FAO (2023) y reportados por (O. I.-G.-M. Vargas-Pineda 2019), se sugirió que los niveles de boro inferiores a 2.0 ppm en abonos maduros son ideales para el uso agrícola.

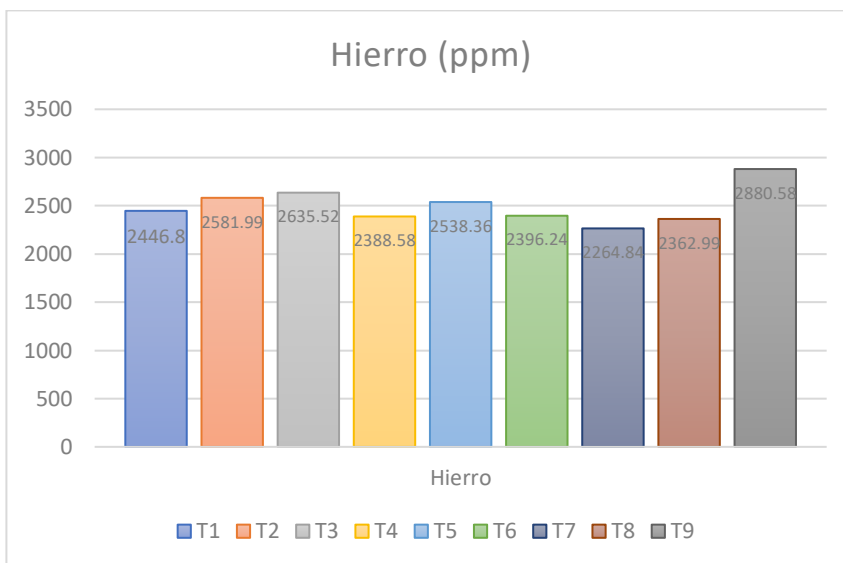
Esta condición de seguridad química, fundamentada en los criterios establecidos por (Vargas-Pineda 2019), aseguró un suministro bioestimulante adecuado para cultivos exigentes como leguminosas o frutales. El mantenimiento de la variable dentro de este margen óptimo descartó cualquier riesgo por estrés o fitotoxicidad osmótica, debido a que dichos niveles estimularon los procesos enzimáticos vegetales sin saturar la capacidad de absorción radicular.

Al cierre de la investigación, se demostró que las formulaciones biológicas estabilizaron el micronutriente dentro de un umbral seguro y nutricionalmente adecuado para el desarrollo vegetal.

3.5.10 Hierro (Fe)

Este elemento constituye un micronutriente esencial cuyo rol fisiológico crítico regula el metabolismo celular de las plantas y la microbiota del suelo. Al respecto, Marschner (2012) señala que este componente actúa como un cofactor estructural en sistemas enzimáticos clave; como citocromos y peroxidasas, los cuales gobiernan la cadena de transporte de electrones en la respiración celular y la fijación biológica de nitrógeno. Por lo tanto, su presencia en el sustrato asegura el dinamismo bioquímico necesario para la maduración eficiente del abono orgánico.

Figura 19. Contenido de hierro en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

En la figura 19, se mostraron los resultados obtenidos para el micronutriente hierro (ppm) en los nueve tratamientos analizados al concluir la fase experimental, cuyos valores oscilaron entre 2,264.84 ppm y 2,880.58 ppm.

La dinámica del hierro durante la humificación estuvo ligada a la formación de complejos organometálicos o quelatos naturales con los ácidos húmicos y fúlvicos. Al respecto, (J. J. Camberato 2021), señaló que estos complejos químicos son capaces de retener eficientemente el hierro al protegerlo contra los efectos de la lixiviación; esta interacción preservó al metal en una forma altamente estable, pero bioabsorbible para las plantas. Bajo este principio, el valor máximo alcanzado en el tratamiento T9 sugirió que sus condiciones específicas promovieron una mayor formación de estos grupos funcionales estables.

Asimismo, el comportamiento general de los tratamientos demostró que las concentraciones se situaron en un rango completamente normal para enmiendas orgánicas provenientes de excretas de bovinos de leche.

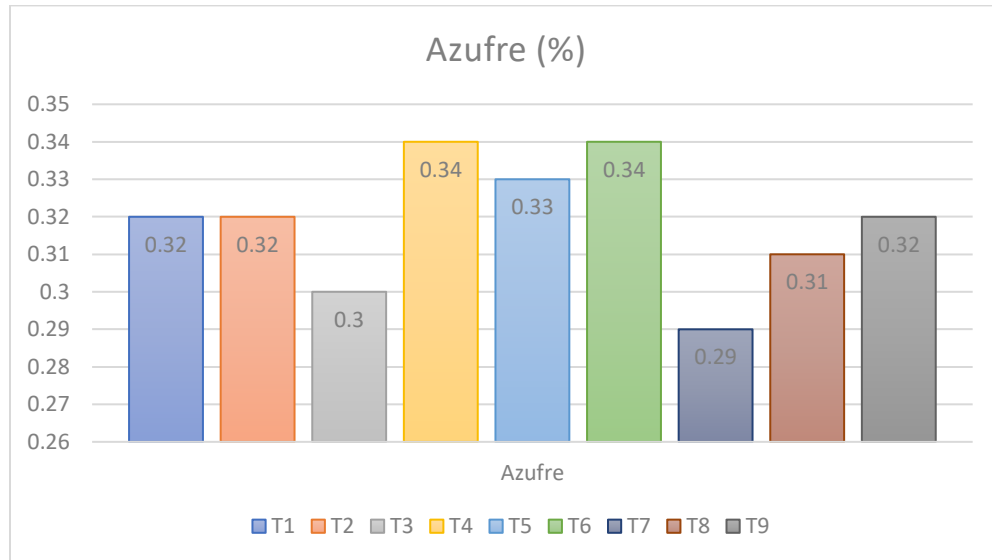
De acuerdo con los parámetros evaluados por (Vargas-Pineda 2019), esta estabilidad mineral aseguró que el producto final contara con la riqueza necesaria para corregir deficiencias en el suelo, sin alcanzar niveles críticos de acumulación que causaran problemas colaterales de fitotoxicidad en los cultivos comerciales.

Esta condición de seguridad química coincide con las directrices de la (FAO 2023), donde se estableció que los abonos orgánicos maduros deben proveer micronutrientes esenciales sin generar riesgos de acumulación por metales pesados. Al cierre de la investigación, las diferencias observadas entre las unidades experimentales confirmaron que cada consorcio biológico modificó el microambiente de la pila de manera particular, lo cual moduló el balance final de la concentración por pérdida de peso seco.

3.5.11 Azufre (S)

Este elemento constituye un macronutriente secundario que interviene directamente en la transferencia de electrones en la fotosíntesis a través de la ferredoxina y en los procesos de fijación de nitrógeno, tal como señala (Marschner 2012). En consecuencia, al evaluar los análisis analíticos de los abonos orgánicos, (P. M. Román 2013) sostiene que la cuantificación de este mineral determina el valor real de la enmienda para el desarrollo agrícola, puesto que su presencia garantiza un balance nutricional apto que previene fisiopatías en las plantas y estimula la fertilidad del suelo a largo plazo.

Figura 20. Contenido de azufre en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 20 presentó los valores obtenidos para el macroelemento secundario azufre (S) en los nueve tratamientos analizados al finalizar la fase de estabilización, los cuales oscilaron entre 0.29% (T7) y 0.34%, compartido por T4 y T6.

La sutil diferencia entre los tratamientos demostró un comportamiento uniforme a lo largo de la investigación. El mantenimiento de rangos estables se debió a la degradación coordinada de la materia orgánica volátil, un fenómeno que, de acuerdo con (M. K.-H. Awasthi 2020), se consolidó paulatinamente durante la maduración aeróbica de los residuos. Al perderse carbono en forma de dióxido de carbono (CO_2) por la respiración celular de bacterias heterótrofas y hongos inoculados, los elementos minerales estructurales no volátiles sufrieron una concentración pasiva en la masa final remanente de la enmienda.

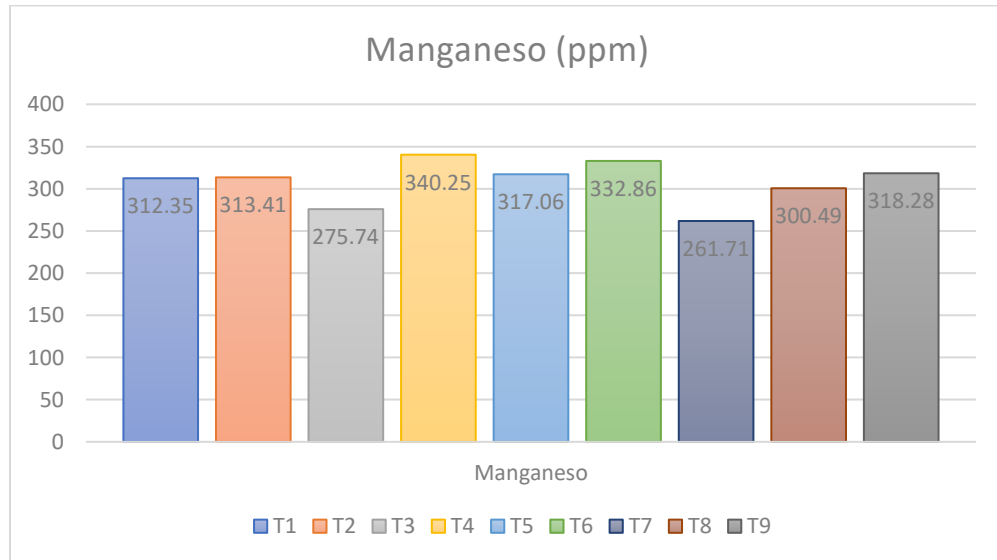
Al realizar el contraste bibliográfico, las investigaciones desarrolladas por (M. K.-H. Awasthi 2020) y (Manu 2021) documentaron este comportamiento al ratificar que el azufre total tiende a incrementarse o estabilizarse porcentualmente hacia el final de la fase de maduración del abono. Los valores obtenidos en este estudio se alinearon con los rangos reportados en la literatura científica para enmiendas maduras de origen bovino de alta calidad, los cuales suelen oscilar típicamente entre el 0.20% y el 0.50% de azufre total bajo condiciones óptimas de biotransformación.

Esta correspondencia garantizó un aporte mineral inocuo y benéfico para los sistemas agrícolas, debido a que, según los criterios de (Román 2013), los contenidos de azufre estables en este rango optimizan el balance nutricional del suelo sin generar riesgos de salinización. De este modo, la dinámica de estabilización del sustrato no solo aseguró la madurez del producto transformado, sino que preservó la integridad de los macroelementos secundarios esenciales. Este equilibrio evitó pérdidas por volatilización, lo cual, en concordancia con el modelo de (M. K.-H. Awasthi 2020), validó de forma directa la eficiencia metabólica de los consorcios biológicos evaluados.

3.5.12 Manganeso (Mn)

Es un micronutriente o elemento traza esencial que actúa primordialmente como un agente catalítico y activador de diversos sistemas enzimáticos que regulan el metabolismo de carbohidratos en el tejido vegetal (Marschner 2012).

Figura 21. Contenido de manganeso en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 21 presentó los valores obtenidos para el microelemento manganeso (Mn) en partes por millón (ppm), en los nueve tratamientos analizados, los cuales oscilaron entre 261.71 ppm en el T7 y 340.25 ppm en T4 .

El comportamiento de retención y acumulación final del manganeso estuvo ligado estrechamente a las condiciones biológicas particulares de cada sustrato. Al respecto, (He 2022) explicó que la presencia de concentraciones estables en el ensayo constituyó un indicador directo del efecto de concentración pasiva; a medida que las bacterias, los hongos y la macrofauna degradaron las cadenas de carbono para su transformación en dióxido de carbono (CO₂), gaseoso y vapor de agua, la masa y el volumen total de las excretas disminuyeron, lo que provocó que los minerales estables quedaran concentrados en la matriz sólida remanente.

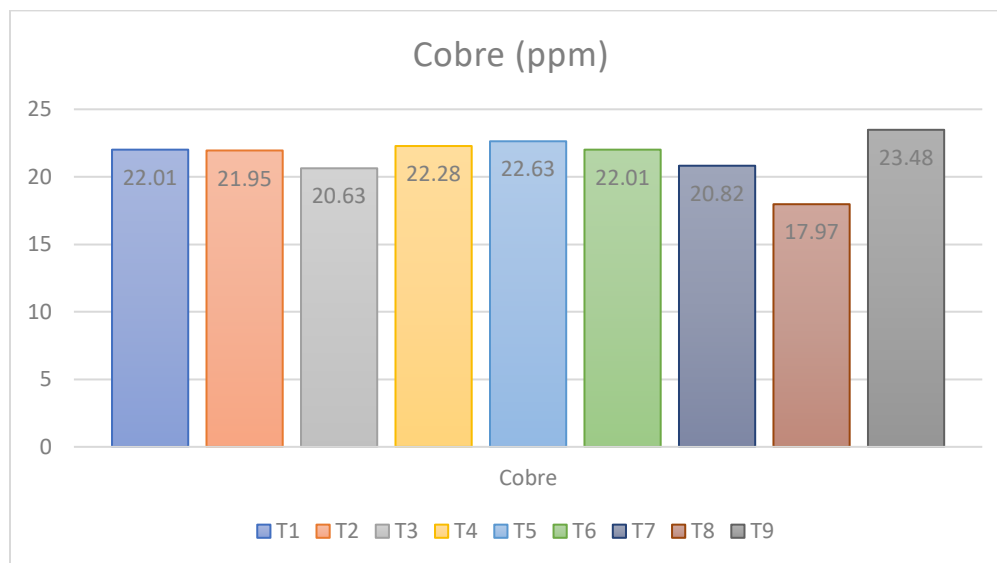
Al realizar el contraste bibliográfico, (M. K.-H. Awasthi 2020) y (He 2022), confirmaron esta tendencia al ratificar que micronutrientes como el manganeso experimentan un aumento porcentual neto hacia las fases finales de maduración del compost EM y del vermicompost. Los valores medidos en este estudio se situaron firmemente dentro de los rangos normales reportados en la literatura científica para abonos estables derivados de estiércoles de rumiantes, lo cual valida la eficiencia del manejo biológico implementado en las pilas.

De acuerdo con los hallazgos de (He 2022), estos parámetros suelen oscilar típicamente entre los límites normales debido a la composición de la dieta basal de los animales y a la ingesta accidental de partículas de suelo ricas en óxidos de manganeso. De este modo, los resultados confirmaron que el proceso de estabilización biológica logró preservar la integridad de los microelementos esenciales. Este equilibrio consolidó un producto final seguro para la estimulación enzimática vegetal y libre de cualquier efecto perjudicial por acumulación mineral.

3.5.13 Cobre

Es un micronutriente esencial que actúa fundamentalmente como un cofactor catalítico en sistemas enzimáticos que regulan procesos redox, destacando su participación en la plastocianina durante el transporte de electrones fotosintéticos (P. Marschner 2012).

Figura 22. Contenido de cobre en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 22 presentó los valores obtenidos para el micronutriente cobre (Cu) en partes por millón (ppm) en los nueve tratamientos analizados al concluir la fase experimental. Los contenidos oscilaron entre 17.97 ppm registrado en el T8 y 23.48 ppm observado en el T9.

El comportamiento de retención de este microelemento estuvo estrechamente ligado a las condiciones y dinámicas biológicas particulares de cada unidad experimental. Al respecto, (X. J. He 2022) explicó que la presencia de concentraciones estables constituyó un indicador directo del efecto de concentración pasiva; a medida que las bacterias, los hongos y la macrofauna degradaron las cadenas de carbono para su transformación en dióxido de carbono (CO₂) gaseoso y vapor de agua, la masa y el volumen total disminuyeron, lo que provocó que los iones estables quedaran retenidos en la matriz sólida remanente.

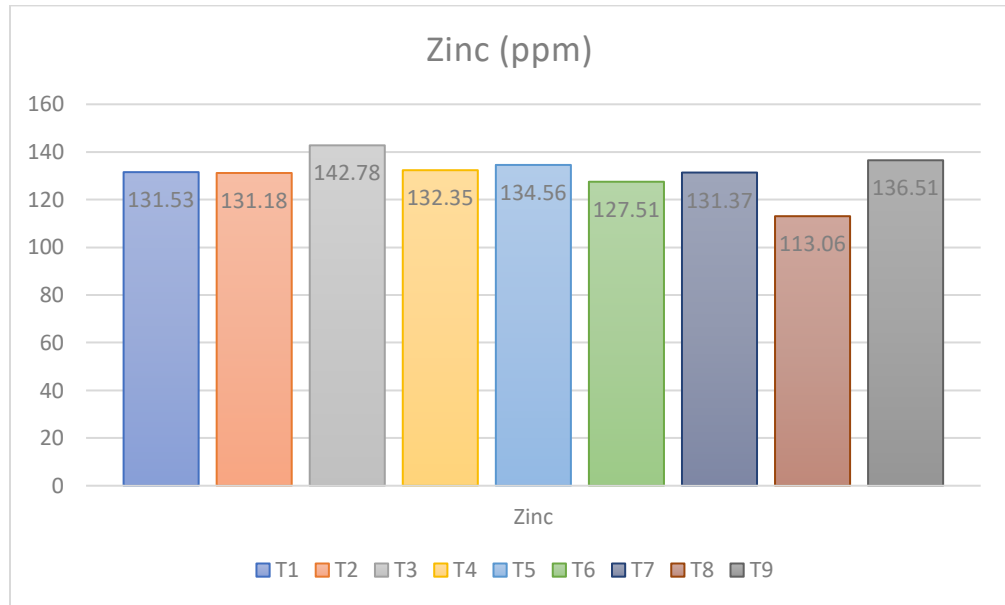
Al realizar el contraste bibliográfico, (M. K.-H. Awasthi 2020) y (X. J. He 2022), confirmaron que micronutrientes como el cobre experimentan un incremento porcentual neto hacia las fases finales de maduración del compost EM y vermicompost debido a la pérdida de materia orgánica volátil. En este contexto, los valores medidos en el presente estudio se situaron firmemente dentro de los rangos normales reportados en la literatura científica para abonos estables, lo cual validó que la actividad del sustrato no generó desbalances minerales.

Según las observaciones de (M. K.-H. Awasthi 2020), estos parámetros históricos para abonos maduros oscilan típicamente por debajo de los límites críticos de acumulación. Estos niveles moderados resultaron idóneos para la producción agrícola, ya que, tal como sostuvo (X. J. He 2022), el cobre es un elemento esencial para los sistemas enzimáticos vegetales en concentraciones traza. Por lo tanto, el estricto control analítico del proceso biológico previno cualquier riesgo latente de fitotoxicidad o contaminación en el suelo receptor.

3.5.14 Zinc (Zn)

Es un micronutriente esencial que actúa primordialmente como un cofactor estructural y catalítico en sistemas enzimáticos vegetales, siendo indispensable para la biosíntesis de la auxina ácido indolacético (AIA) y la fijación fotosintética del carbono (P. Marschner 2012).

Figura 23. Contenido de zinc en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 23 presentó los valores obtenidos para el micronutriente zinc (Zn) en partes por millón (ppm) en los nueve tratamientos analizados al concluir la fase de estabilización. Los contenidos absolutos oscilaron entre 113.06 ppm en el T8 y 142.78 ppm en el T3.

La capacidad de retención de este microelemento estuvo estrechamente vinculada a las condiciones y dinámicas biológicas particulares de cada unidad experimental. Al respecto, (X. J. He 2022) explicó que la presencia de concentraciones significativas constituyó un indicador directo del efecto de concentración pasiva; a medida que las bacterias, los hongos y la macrofauna degradaron las cadenas de carbono para su posterior desprendimiento en forma de dióxido de carbono (CO₂) gaseoso y vapor de agua, la masa y el volumen total disminuyeron, lo que concentró los iones estables en la matriz sólida remanente.

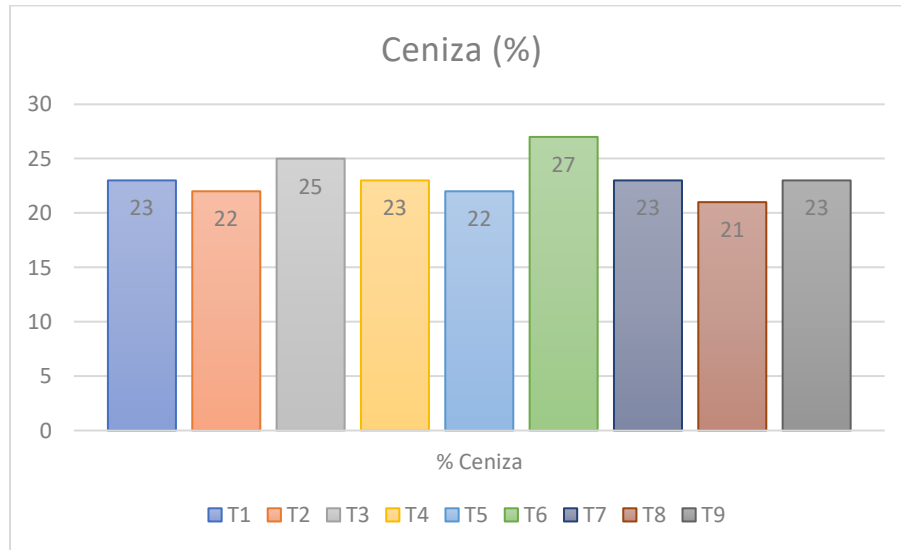
Al realizar el contraste bibliográfico, (M. K.-H. Awasthi 2020) y (X. J. He 2022) confirmaron que los micronutrientes como el zinc experimentan un incremento porcentual neto hacia las fases finales de maduración del compost y vermicompost debido a la reducción de la biomasa orgánica global. En este contexto, los valores medidos en el presente estudio se encontraron plenamente alineados con los rangos normales citados por la literatura para enmiendas estables a partir de estiércol bovino, lo cual valida la madurez química del producto obtenido.

Según las observaciones de (M. K.-H. Awasthi 2020), estos parámetros históricos reafirmaron la estabilidad del abono y garantizaron un aporte balanceado de este cofactor esencial, el cual resultó clave para la biosíntesis de auxinas y la activación enzimática vegetal. Asimismo, tal como sostuvo (X. J. He 2022), el control de este mineral durante el proceso de biotransformación evitó la acumulación desmedida del elemento. Esto aseguró que el producto final permaneciera muy por debajo de los límites normativos de fitotoxicidad en los suelos agrícolas receptores.

3.5.15 Porcentaje de ceniza

El incremento y estabilización de la fracción mineral remanente al cierre de la investigación evidenció el avance del proceso de humificación. Al respecto, (M. H. Zainudin 2024) y (X. J. He 2022) demuestran que el porcentaje de cenizas funciona como un parámetro de control de calidad crítico durante los procesos de biotransformación de residuos; a medida que la microbiota y la macrofauna consumen selectivamente la biomasa orgánica volátil (carbono, hidrógeno y oxígeno), la masa y el volumen total disminuyen, lo que correlaciona directamente con la concentración, retención y estabilización final de la fracción mineral en el abono maduro.

Figura 24. Porcentaje de cenizas en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 24 presentó los porcentajes de ceniza obtenidos en los nueve tratamientos analizados al concluir el proceso de biotransformación. Los valores oscilaron entre 21.00 en el T8 y 27.00% en el T6.

El comportamiento en la retención y concentración de la fracción mineral estuvo directamente condicionado por las características biológicas de cada tratamiento, donde la tasa de actividad metabólica de los microorganismos y la macrofauna determinó la eficiencia en la degradación de la materia orgánica volátil. Al respecto, (Zainudin 2024) sustentó que la pérdida de masa global del sustrato debido a la respiración microbiana y la asimilación biológica de los compuestos carbonados alteró de forma directa la proporción de los componentes finales dentro de la pila de biotransformación.

Este consumo selectivo de la materia orgánica indujo un enriquecimiento relativo y una estabilización mecánica de la fracción inorgánica no volátil, lo cual consolida al parámetro como un indicador directo de la madurez. Al realizar el contraste bibliográfico, (M. K.-H. Awasthi 2020) y (X. J. He 2022),

confirmaron que el porcentaje de cenizas experimentó un aumento neto y progresivo hacia las fases finales de maduración del compost y vermicompost debido a la reducción de los polímeros carbonados biodegradables.

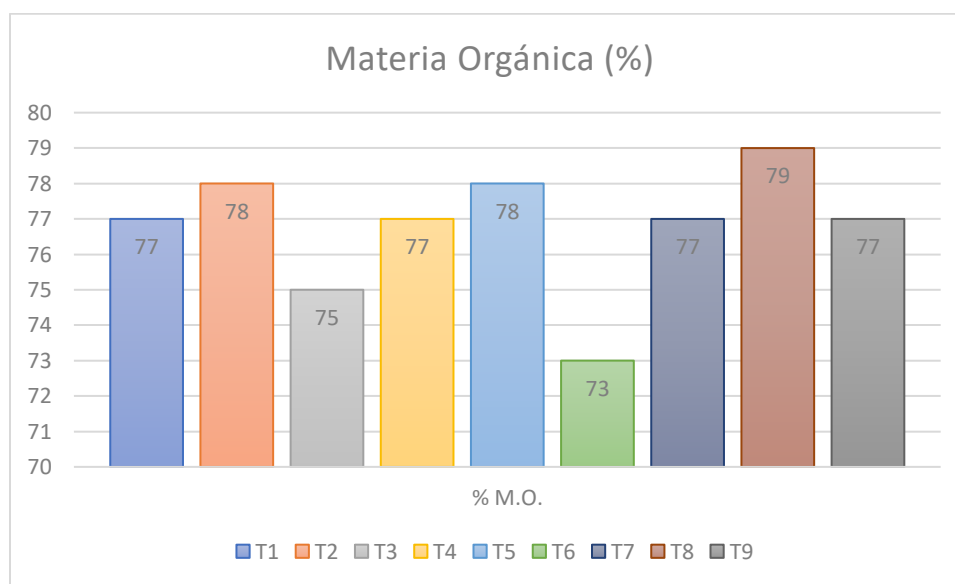
Los valores medidos en este estudio se encontraron plenamente alineados con los rangos normales citados en la literatura científica para abonos orgánicos estables derivados de estiércol bovino, los cuales según las directrices de (FAO 2013), se situaron entre los límites normales de retención mineral para enmiendas maduras. Este incremento de la fracción inorgánica frente a la orgánica corroboró el éxito de la estabilización biológica. Asimismo, este balance químico aseguró la obtención de un producto final metabólicamente estable y apto para su incorporación agrícola, un comportamiento que, de acuerdo con el modelo de maduración postulado por (M. K.-H. Awasthi 2020), confirmó la degradación eficiente de los polímeros carbonados volátiles por acción de los consorcios microbianos.

3.5.16 Porcentaje de materia orgánica

La materia orgánica se define como todo aquel material compuesto por moléculas basadas en cadenas de carbono, derivado de los residuos, tejidos y subproductos de organismos que alguna vez estuvieron vivos; como plantas, animales y microorganismos, en cualquier nivel de descomposición. De acuerdo con (Station. 2024) y (Tecnilab. 2025), en el ámbito de las ciencias del suelo y la agricultura, este componente se clasifica dinámicamente en fracciones que van desde la biomasa viva y los residuos frescos altamente lábiles, hasta las formas más estables y transformadas como el humus.

Como indicaron (Base. 2026); (Tecnilab 2025), su presencia es crucial para el funcionamiento del ecosistema edáfico, ya que la descomposición biológica y la posterior estabilización del carbono orgánico dictan propiedades fundamentales como la retención de humedad, la estructura porosa, el intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes a través de la mineralización.

Figura 25. Porcentaje de materia orgánica (MO) en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 25 presentó los valores obtenidos de materia orgánica (%) obtenido en los nueve tratamientos analizados al concluir el proceso experimental, los cuales oscilaron entre 73.00% en (T6) y 79.00% en (T8), la variación máxima entre los tratamientos es de 6.00%. Lo que evidenció intensidades distintas en los procesos de degradación biológica.

Los tratamientos con mayor retención de materia orgánica fueron T8 (79.00%), T2 (78.00%) y T5 (78.00%), seguidos por T1, T4, T7 y T9 (77.00%), mientras que las mermas más eficientes se registraron en T3 (75.00%) y T6 (73.00%). Como explicaron (M. K.-H. Awasthi 2020) (X. J. He 2022), esta reducción porcentual neta hacia las fases finales de maduración se debió a una intensa actividad metabólica comunitaria que degradó las cadenas de carbono. Bajo esta premisa, el hecho de que el T6 exhibiera el valor mínimo (73.00%) reconfirmó que su consorcio microbiológico aceleró de manera óptima la biotransformación y pérdida de la matriz sólida original.

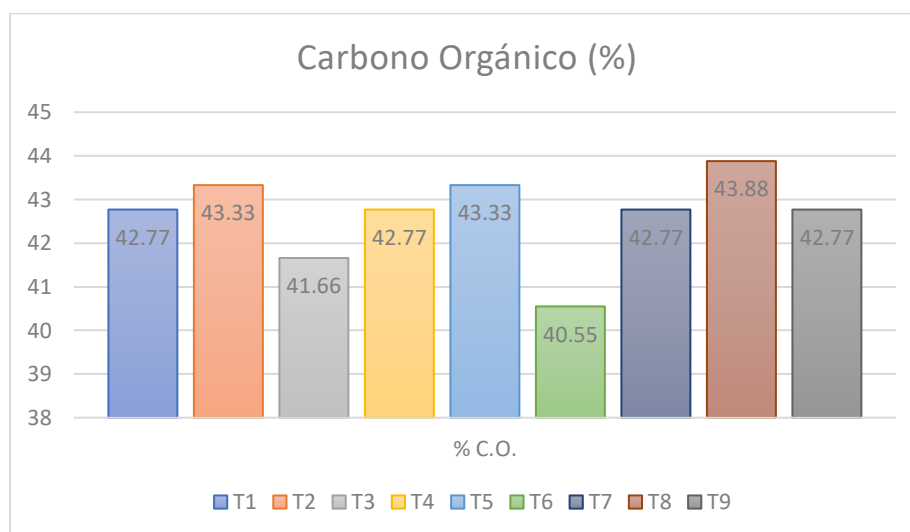
Este comportamiento general, con valores determinados entre el 73.00% y 79.00%, se alineó con los rangos reportados por (M. K.-H. Awasthi 2020), para sustratos estables derivados de estiércol bovino. Dicha concordancia se atribuyó a que la elevada concentración inicial de fibras lignocelulósicas, provenientes de la dieta del rumiante, sostuvo niveles altos de carbono estructural a lo largo de las etapas de estabilización. De este modo, la resistencia de estos polímeros complejos justificó que los porcentajes remanentes se mantuvieran elevados en todas las variantes evaluadas.

3.5.17 Carbono orgánico

El carbono orgánico determinado en la matriz sólida constituyó el núcleo estructural de la materia orgánica, representando la reserva energética degradada por la actividad biológica. Como señalaron (ANALAB, 2025) y (America 2026), este parámetro funcionó como un indicador analítico global para evaluar la madurez de los sustratos a través de la dinámica del Carbono Orgánico Total (COT). Bajo este criterio, las variaciones en los porcentajes de carbono reflejaron el grado de estabilización alcanzado en cada tratamiento durante la biotransformación de las excretas.

Esta estabilización de los compartimentos de carbono no dependió únicamente de la complejidad química intrínseca del residuo bovino, sino de la interacción molecular y la actividad microbiológica del entorno. De acuerdo con (Lehmann 2025) y (Agricultura 2024), el monitoreo de dicho balance de masa permitió auditar la calidad del proceso de biotransformación de los residuos. De este modo, la reducción o persistencia del carbono en las variantes evaluadas sirvió para verificar de forma directa la eficiencia y madurez de los sustratos finales.

Figura 26. Porcentaje de carbono orgánico en los diferentes sustratos evaluados según informe ANALAB



Fuente: Vilma Quezada, 2025

La figura 26 presentó los porcentajes de carbono orgánico (CO), de los nueve tratamientos evaluados durante la biodegradación de excretas bovinas lecheras (*Bos taurus* L), dichos valores oscilaron entre 40.55% y 43.88%.

El tratamiento T8 registró el mayor contenido de carbono (43.88%), por lo tanto, superó al T6 (40.55%) en un 3.33%, lo que se tradujo en una menor tasa de degradación neta, mientras que el 44.4% de las variantes (T1, T4, T7 y T9),

mostraron un comportamiento constante de 42.77%; dicha homogeneidad reflejó la estabilidad y persistencia del componente orgánico bajo las condiciones experimentales evaluadas en la granja.

Este comportamiento contrastó inicialmente con los hallazgos de (Loyde de la Cruz 2022), quien señaló que durante el metabolismo bacteriano nativo una gran proporción de carbono se liberó hacia la atmósfera como (CO_2). Sin embargo, el comportamiento del T6 validó lo demostrado por (Uribe 2016) y (J. M.-B.-C. Domínguez 2020), donde la adición de consorcios microbianos eficientes indujo un consumo acelerado del carbono disponible.

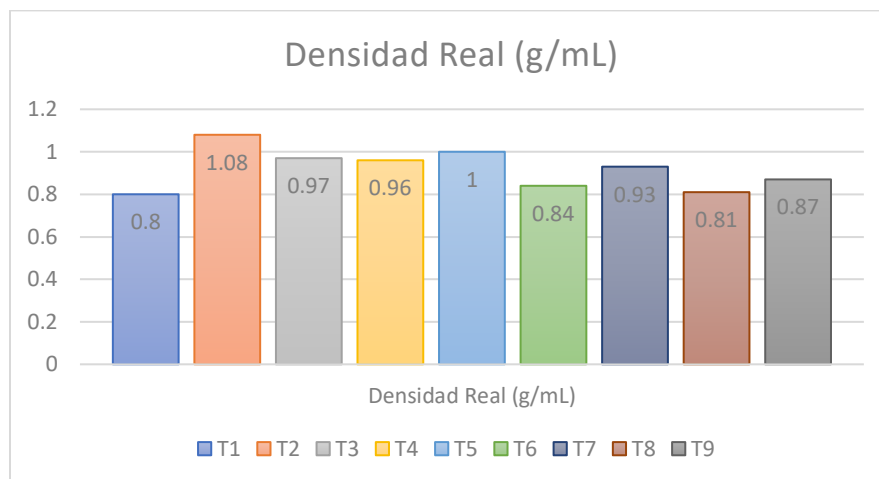
De este modo, la reducción controlada observada en T6 confirmó un proceso de biotransformación exitoso, donde la microbiota asimiló el sustrato para la biosíntesis de sus estructuras celulares mediante una vía de homofermentación sintrófica.

3.5.18 Densidad real

El incremento neto observado en la densidad real hacia el final del ciclo evidenció una alteración directa en la relación sólido-poro de los abonos. Como señaló (Xu 2024), este parámetro físico evaluó estrictamente la matriz esquelética sólida del material, reflejando cómo la pérdida de carbono volátil modificó la estructura interna de los tratamientos evaluados en la granja.

Dicho comportamiento se atribuyó a la degradación de la materia orgánica compleja por acción de la microbiota y la macrofauna. De acuerdo con (M. H. Zainudin 2024), la liberación de (CO_2) indujo una concentración pasiva de la fracción inorgánica no volátil (cenizas); al poseer estos componentes minerales una gravedad específica mayor que la fracción orgánica, la densidad de la fase sólida remanente aumentó, consolidándose como un indicador directo de la mineralización y madurez del sustrato.

Figura 27. Valores promedio de densidad real (g/mL), en los diferentes tratamientos evaluados.



Fuente: Vilma Quezada, 2025.

La figura 27 presentó los valores de densidad real (g/mL) contenidos en los nueve tratamientos analizados al finalizar el proceso de estabilización biológica, los registros oscilaron entre 0.80 g/mL en (T1) y 1.08 g/mL en el T2. La variación máxima calculada entre las unidades experimentales fue de 0.28 g/IL.

El tratamiento T2 reportó el mayor valor de densidad real con 1.08 g/mL, seguido en orden decreciente por T5 (1.00 g/mL), T3 (0.97 g/mL), T4 (0.96 g/mL), T7 (0.93 g/mL), T9 (0.87 g/mL), T6 (0.84 g/mL), T8 (0.81 g/mL) y T1 con el mínimo (0.80 g/mL), (ver anexo 8). Como explicaron (X. J. He 2022) y por (M. K.-H. Awasthi 2020), este comportamiento constituyó un indicador directo del reordenamiento estructural y la mineralización pasiva, donde la degradación de tejidos vegetales de baja densidad por la microbiota provocó que la matriz sólida remanente adquiriera una masa compacta más homogénea hacia las fases finales de maduración.

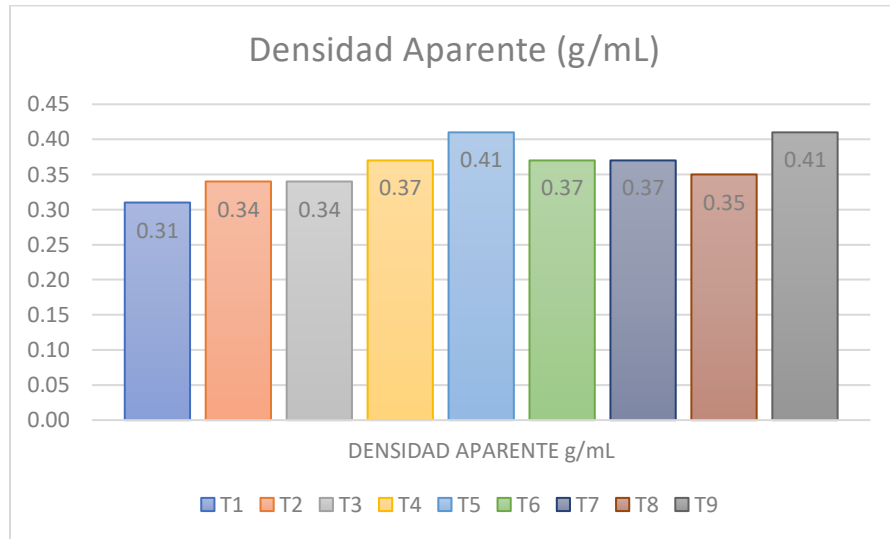
Los valores registrados (0.80 a 1.08 g/mL) se encontraron alineados con los rangos normales de 0.70 a 1.20 g/mL citados por (M. K.-H. Awasthi 2020), para abonos estables derivados de estiércol bovino. De acuerdo con (X. J. He 2022), el mantenimiento de la densidad real dentro de estos límites comerciales e ideales aseguró que las enmiendas orgánicas producidas en la granja poseyeran la solidez estructural adecuada, con la porosidad necesaria para la retención de agua y la aireación al incorporarse al suelo.

3.5.19 Densidad aparente (método de la probeta)

La determinación de la densidad aparente en las muestras evaluadas se realizó mediante el método de la probeta, el cual cuantificó la relación matemática entre la masa seca y el volumen total ocupado tras el asentamiento del material. Como estableció la Asociación Española de Normalización en la normativa (UNE 2021), este parámetro contempló tanto el volumen de las partículas sólidas como el espacio poroso interparticular.

Procedimentalmente, el protocolo de compactación y asentamiento normalizado permitió evaluar el grado de acomodo de las partículas y la susceptibilidad a la compactación del abono. Bajo este criterio, la metodología se consolidó como una herramienta física altamente reproducible en laboratorio para verificar de forma directa la calidad estructural del producto final obtenido en la granja.

Figura 28. Valores promedio de densidad aparente (g/mL) en los diferentes tratamientos evaluados.



Fuente: Vilma Quezada, 2025

Los tratamientos T5 y T9 alcanzaron los valores más altos de densidad aparente (0.41 g/mL), mientras que el T1 registró el mínimo (0.31 g/mL), comportamiento que reflejó variaciones significativas en el reordenamiento estructural del material, (ver anexo 8). Como explicaron (X. J. He 2022) y (M. K.-H. Awasthi 2020), este incremento gradual hacia las fases finales se debió al colapso de las partículas vegetales grandes por acción de la microbiota, lo que provocó que la matriz sólida remanente adquiriera una estructura más compacta y homogénea debido a la formación de agregados húmicos finos. Todos los valores determinados (0.31 a 0.41 g/mL) se encontraron alineados con el rango óptimo inferior a 0.60 g/mL reportado por (M. K.-H. Awasthi 2020), para abonos de calidad derivados de estiércol bovino. De acuerdo con (X. J. He 2022), el mantenimiento de esta densidad aparente baja garantizó una porosidad adecuada en el producto final; dicha condición favoreció la retención de humedad y una correcta aireación, sustentando la viabilidad técnica y agronómica de las variantes bioestabilizadas en la granja.

3.6 Identificación del tratamiento con menor tiempo de biodegradación

Para determinar la estabilidad y madurez del compost (EM) y vermicompost con precisión científica, se analizaron los indicadores de la relación carbono/nitrógeno (C/N), materia orgánica y pH al cierre de la fase experimental (semana 11), con base en el informe generado por ANALAB. El tratamiento T6 se identificó matemáticamente como la alternativa con el menor tiempo de biodegradación y la mayor velocidad de estabilización orgánica de todo el ensayo, fundamentado en su posicionamiento exclusivo en los rangos superiores de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$):

3.6.1 Menor relación C/N

El tratamiento T6 alcanzó un índice de 20.37 (grupo A), constituyéndose como el valor más estrecho y cercano al umbral ideal de madurez comercial. Esta reducción acelerada de la relación C/N se debió a una mayor pérdida de carbono en forma de CO₂ y a la retención pasiva del nitrógeno mediante la síntesis de biomasa microbiana. La proximidad de este valor al rango óptimo evidenció que el sustrato completó su fase termofílica y de estabilización de manera anticipada en comparación con las demás variantes.

3.6.2 Menor contenido de materia orgánica residual

El tratamiento T6 reportó apenas un 73.00% de materia orgánica remanente (grupo A), lo que significó que transformó y mineralizó un mayor porcentaje de polímeros carbonados. Como explicaron (A. Mansoor 2024) y (J. M. López-Vázquez 2023), este menor tiempo de biodegradación demostró la alta eficiencia del agente biológico empleado, cuyas enzimas extracelulares (celulasas y proteasas) colonizaron y catabolizaron rápidamente las fracciones de carbono lábil.

En contraste, variantes como el T1 y el T7 se mantuvieron rezagadas en el grupo G de Tukey, con relaciones C/N superiores a 24.7 e índices de materia orgánica estancados en el 77.00%. De acuerdo con lo sustentado por (J. M. López-Vázquez 2023), este comportamiento denotó que dichos sustratos requirieron de un periodo de tiempo más prolongado para metabolizar las cadenas carbonadas complejas, lo que extendió el ciclo y retrasó la obtención de un abono final estable, inocuo y maduro.

3.7 Análisis fisicoquímico y evaluación de la calidad del producto biotransformado

Con base en los análisis de varianza y las pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$), se dio cumplimiento al tercer objetivo específico de la investigación. Los resultados de ANALAB confirmaron que el tratamiento T6 alcanzó el mayor grado de madurez biológica y humificación, estableciéndose de forma exclusiva en el grupo A con la relación carbono/nitrógeno más estrecho (20.37) y el menor porcentaje de materia orgánica residual (73.00%). Como explicó (A. Mansoor 2024), este comportamiento ratificó una alta tasa de mineralización donde los microorganismos eficientes aceleraron la degradación del carbono volátil.

Asimismo, el T6 demostró la mayor eficiencia técnica al registrar el pH más moderado (8.57, grupo A), con lo cual logró mitigar la alcalinización extrema observada en los tratamientos T3 (9.05) y T7 (9.03). De acuerdo con (M. F. Fuentes 2022), un pH controlado reduce la conversión de los iones amonio (NH_4^+) hacia amoníaco gaseoso, lo que minimizó las pérdidas por volatilización y conservó la integridad química del sustrato. En contraste, las variantes testigos T1 y T7, con relaciones C/N superiores a 24.7, evidenciaron procesos de descomposición marcadamente rezagados.

Por otra parte, las concentraciones de macronutrientes esenciales se rigieron por un efecto de concentración pasiva derivado de la merma del peso seco. Como señalaron (M. F. Fuentes 2022), (J. M. López-Vázquez 2023) y (A. Mansoor 2024), esta contracción de la matriz orgánica resaltó los elementos minerales estables, permitiendo que el T4 obtuviera el mayor contenido de nitrógeno total (2.04%), el T3 destacara en fósforo (1.01%), magnesio (1.75%) y calcio (2.58%), y el T6 alcanzara el porcentaje más alto de potasio (1.35%). De este modo, se determinó al T6 como el sustrato de mayor madurez y equilibrio sistémico, mientras que el T3 y T4 se consolidaron como las mejores variantes en densidad nutricional.

Se estructuró una matriz resumen para el análisis y la discusión de los resultados, que integró los valores analíticos exactos de las propiedades fisicoquímicas estructurales, orgánicas, de azufre y micronutrientes del producto. Esta tabla permitió identificar los valores máximos y mínimos de cada parámetro, lo que facilitó la evaluación de los criterios de fitotoxicidad y el éxito agronómico del producto final con base al marco teórico.

Tabla 27 Resumen: análisis de micronutrientes y macronutriente secundario y propiedades fisicoquímicas estructurales del sustrato según informe ANALAB.

Variable analizada	Tratamiento máximo valor	Tratamiento mínimo valor	Interpretación técnica (éxito de la biodegradación)
Micronutriente Boro (B) Ppm	T3 1.75ppm	T7 y T8 1.37 ppm	Los valores obtenidos (1.37 a 1.75 ppm) se situaron por debajo de los límites críticos de fitotoxicidad (5 a 10 ppm) y dentro del rango ideal (< 2.0 ppm) establecido por la FAO (2023). Esta condición constituyó un aporte seguro y bioestimulante para cultivos exigentes.
Micronutriente Hierro (Fe) (ppm)	T9 (2,880.58 ppm)	T7 (2,264.84 ppm)	Las concentraciones analizadas no evidenciaron fitotoxicidad y se mantuvieron en el rango normal para enmiendas de excretas bovinas. El valor máximo en el tratamiento T9 (2,880.58 ppm) indicó una alta tasa de humificación y la formación de quelatos organometálicos estables con ácidos húmicos y fúlvicos, lo que previno la lixiviación del elemento FAO (2023).

Micronutriente Manganeseo (Mn) (ppm)	T4 (340.25 ppm)	T7 (261.71 ppm)	Los resultados se ubicaron firmemente en el rango normal para estiércoles de rumiantes (200 a 500 ppm), por lo que se descartó la fitotoxicidad. Las concentraciones superiores a 260 ppm reflejaron un efecto de concentración pasiva derivado de la degradación de las cadenas de carbono FAO (2023).
Micronutriente Cobre (Cu) (ppm)	T9 (23.48 ppm)	T8 (17.97 ppm)	El elemento mostró un comportamiento seguro y se posicionó muy por debajo de los límites normativos críticos (50 a 100 ppm), descartando efectos fitotóxicos. Los niveles hallados permitieron asegurar su función como oligoelemento esencial para los sistemas enzimáticos foliares y radiculares FAO (2023).
Micronutriente Zinc (Zn) (ppm)	T3 (142.78 ppm)	T8 (113.06 ppm)	Las concentraciones se alinearon con los rangos normales para estiércol bovino (100 a 300 ppm), sin indicios de fitotoxicidad. Este balance garantizó un aporte adecuado para la biosíntesis de auxinas (ácido indolacético, AIA) FAO (2023).
Macronutriente secundario Azufre (S) (%)	T4 y T6 (0.34%)	T7 (0.29%)	El parámetro no aplicó para límites de peligrosidad por tratarse de un nutriente inocuo, seguro y libre de sospecha ambiental, por lo que no requirió medidas de control. Los tratamientos registraron una estabilidad uniforme (promedio~ 0.32%), atribuible a una concentración pasiva por la pérdida de CO ₂ sin volatilización del azufre FAO (2023).
Cenizas (%)	T6 (27.00%)	T8 (21.00%)	Como indicador de madurez, el valor máximo en T6 (27.00%) demostró una mayor tasa de descomposición de la materia orgánica volátil y la consecuente acumulación de la fracción mineral inorgánica. Todos los tratamientos se mantuvieron dentro del rango óptimo general (20% a 40%) FAO (2023).
Materia orgánica (MO) (%)	T8 (79.00%)	T6 (73.00%)	El valor mínimo registrado en T6 (73.00%) se consolidó como el mejor indicador de degradación biológica activa y de una transición eficiente hacia un humus estable y maduro, lo cual complementó de manera coherente el incremento en el contenido de cenizas (FAO 2023).
Carbono orgánico (C.O.) (%)	T8 (43.88%)	T6 (40.55%)	El menor contenido de carbono orgánico observado en T6 (40.55%) ratificó la eficiencia del consorcio microbiano inoculado. Este comportamiento evidenció un proceso de asimilación y homofermentación sintrófica, en lugar de una pérdida descontrolada por volatilización abierta (FAO 2023).

Densidad real (g/mL)	T2 (1.08 g/mL)	T1 (0.80 g/mL)	Los valores se sitúan en el rango ideal para enmiendas orgánicas y vermicompost estables (generalmente < 1.50 g/mL). Esto demuestra que la actividad microbiológica y/o de las lombrices degradó los compuestos de carbono volátiles, dejando un esqueleto sólido estable que no sufrirá degradación drástica posterior en el campo.
Densidad aparente (g/mL)	T5 y T9 (0.41 g/mL)	T1 (0.31 g/mL)	Todos los tratamientos cumplen con los criterios de éxito agronómico para sustratos orgánicos de alta calidad (< 0.60 g/mL). Valores entre 0.31 y 0.41 g/mL garantizan un equilibrio óptimo: el producto final es lo suficientemente liviano para facilitar su transporte y aplicación, pero posee la densidad adecuada para retener humedad y permitir el anclaje de las raíces sin causar asfixia radicular.

Fuente: FAO, ANALAB, y Awasthi et al., *Calidad y parámetros analíticos en enmiendas orgánicas*, 2025.

El comportamiento sistémico de la matriz resumen evidenció que el proceso de biotransformación indujo un efecto de concentración pasiva de la fracción mineral no volátil, correlacionado de forma directa con la madurez y la estabilidad física de los abonos. Como señalaron la (FAO 2023) y (M. K.-H. Awasthi 2020), la reducción controlada de la materia y el carbono orgánico, cuyo punto de mayor eficiencia ocurrió en el tratamiento T6 (73.00% y 40.55% respectivamente), propició el incremento proporcional de las cenizas y la consolidación de densidades reales y aparentes óptimas para el uso agrícola.

Desde la perspectiva de la inocuidad y el valor bioestimulante, los perfiles de azufre y micronutrientes (B, Fe, Mn, Cu y Zn) se posicionaron firmemente dentro de los rangos normales para excretas bovinas, descartándose cualquier criterio de fitotoxicidad. De acuerdo con lo establecido por la (FAO 2023), la persistencia segura de estos oligoelementos, catalizada por la formación de quelatos organometálicos estables y una neta estabilidad estructural, garantizó la viabilidad agronómica del producto final como una enmienda balanceada y apta para la nutrición vegetal sin sospecha de peligro ambiental.

3.8 Mermas del sustrato

Este concepto se refiere al peso o volumen reducido de materia orgánica, durante la fase de experimental, por los dos agentes biotransformadores, indicando cuanto material digirieron, evaporaron y compactaron. La variable mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, evaluados, debido a ello se procedió a realizar la comparación de medias con prueba de Tukey.

Como se observa en la tabla 28, las categorías fueron ordenadas de forma descendente por lo que la categoría A, incluyó a los tratamientos que mayor merma presentaron en la evaluación. Por el contrario , las categorías subsecuentes reflejaron un menor consumo, evaporación y compactación del material orgánico.

Tabla 28 Mermas del sustrato

Tratamiento	Medias	Grupo
T3	277.00	A
T9	291.67	A
T7	285.00	A
T5	282.33	A
T1	276.00	A
T8	158.00	B
T6	152.00	B
T4	149.00	B
T2	136.00	B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los valores promedio de la merma definieron dos bloques de comportamiento independientes con una diferencia estadística altamente significativa. El grupo A, liderado por el tratamiento T9 (291.67), concentró las mayores pérdidas de masa al combinar la acción conjunta de ambos agentes biotransformadores: la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y los microorganismos eficientes (EM). En contraste, el grupo B, donde se ubicó el tratamiento (T1) y sus repeticiones, registró la menor pérdida de peso a causa de la ausencia del consorcio microbiano inoculado, (ver anexo 7).

De acuerdo con los hallazgos de (M. K.-H. Awasthi 2020) y (X. J. He 2022), esta acentuada pérdida de biomasa constituyó un indicador directo de la tasa de mineralización y de la actividad metabólica celular. Mediante esta sinergia biológica, se degradaron activamente las fracciones de carbono lábil del sustrato, desprendiéndolas del sistema en forma de CO₂ y vapor de agua en las camas.

Asimismo, la marcada reducción del peso seco en el grupo A justificó el efecto de concentración pasiva de los nutrientes. De acuerdo con (J. M. López-Vázquez 2023), los tratamientos que combinaron ambos agentes exhibieron mayores concentraciones de macronutrientes, esto sucedió porque la disipación de las cadenas carbonadas volátiles resaltó los minerales estables en la matriz remanente del abono. Por el contrario, la menor pérdida de masa en el grupo B provocó una dilución de los nutrientes en una mayor cantidad de materia residual. De acuerdo con (M. F. Fuentes 2022), este comportamiento reflejó una estabilización más lenta del sustrato, lo que ratificó que la doble inoculación (lombrices y microorganismos eficientes) aceleró eficazmente el ciclo del carbono y la maduración del abono.

3.9 Análisis del porcentaje de mermas al finalizar la fase experimental del compostaje

Durante la fase de precompostaje de excretas bovinas lecheras el porcentaje de merma fue (8%). Como indica la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2013), este valor se situó por debajo del rango promedio del 10% al 30%, reportado por la literatura técnica para procesos estándar.

Esta baja pérdida de biomasa se debió a que en dicha etapa inicial no se utilizaron agentes biotransformadores externos, lo que limitó la actividad degradativa a la acción moderada de los microorganismos nativos sobre la materia orgánica (MO), Asimismo, las camas se mantuvieron bajo techo y la evaporación fue mínima a causa de la alta humedad relativa propia de este municipio durante los meses de experimentación, en este municipio. Por lo tanto, este comportamiento se consideró positivo porque al utilizar los agentes biotrasformadores contaron con un sustrato rico en humedad al inicio de la fase experimental activa.

Para calcular de forma exacta la merma total por tratamiento durante la fase de compostaje y vermicompostaje, primero se estandarizaron las unidades a gramos (sabiendo que el inicio son 5 kg, equivalentes a 5,000 g).

3.9.1 Cálculo general

Para cada tratamiento se aplicaron las siguientes ecuaciones matemáticas:

- Merma total (g) = peso inicial (5,000 g) - peso final (g)
- Porcentaje de merma total (%) = $\frac{\text{merma total (g)}}{5,000 \text{ g}} \times 100$
- Merma por actividad biológica (g) = merma total (g) - merma laboratorio (35 g)

Tabla 29. Resultados consolidados de merma

Tratamientos	Peso inicial en (g)	Merma Lab (g)	Merma Biol. (g)	Peso final (g)	Peso total (g)	Merma total (g)
T1	5,000	35	241	4,724	276	5.52%
Lombrices						
T2 (EM)	5,000	35	100	4,865	135	2.70%
T3 (Lombriz + EM)	5,000	35	262	4,703	297	5.94%
T4 (EM)	5,000	35	114	4,851	149	2.98%
T5 (Lombriz + EM)	5,000	35	247	4,718	282	5.64%
T6 (EM)	5,000	35	117	4,848	152	3.04%
T7 (Lombriz + (EM)	5,000	35	250	4,715	285	5.70%
T8 (EM)	5,000	35	123	4,842	158	3.16%
T9 (Lombriz + EM)	5,000	35	257	4,708	292	5.84%

Fuente: Investigación de campo. Vilma Quezada, 2025

Los datos demostraron que la interacción simultánea de ambos agentes biotransformadores incrementó de forma directa la tasa de descomposición del sustrato, donde el bloque integrado por T3, T9, T7, T5 y T1 registró los mayores porcentajes de degradación, sobresaliendo el tratamiento T3 con la máxima

merma total (5.94%, equivalente a 297 g). En contraposición, las variantes inoculadas de forma exclusiva con microorganismos eficientes (T8, T6, T4 y T2) mantuvieron una pérdida de biomasa significativamente menor, con valores que oscilaron entre el 2.70% y el 3.16%.

De acuerdo con lo sustentado por (C. A. Edwards 2011), esta marcada diferencia entre bloques respondió a la actividad fisiológica y mecánica de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), la cual redujo físicamente el tamaño de las partículas mediante la molienda mollejar. Dicho proceso optimizó el área superficial expuesta del estiércol precompostado, lo que permitió que el consorcio de los microorganismos eficientes asimilara los nutrientes con mayor velocidad y acelerara la disipación del carbono hacia la atmósfera en forma de CO₂, traduciéndose en una reducción eficiente del volumen y la masa en las camas de la granja.

3.10 Evaluación de biomasa de (*Eisenia foetida* Sav) en la fase final del experimento

La biomasa ganada, se debió al incremento del peso vivo de las lombrices (*Eisenia foetida* Sav), al concluir la fase experimental. De acuerdo con lo sustentado por (C. A. Edwards 2011), este resultado indicó que el precompostaje de excretas bovinas lecheras logró el acondicionamiento microbiológico adecuado del sustrato; por lo tanto, al sembrar la macrofauna, el material resultó palatable, sin excesos de amoníaco (NH₃), o rangos de pH ácidos, lo cual favoreció el crecimiento y desarrollo eficiente de los anélidos en la granja.

Tabla 30. Biomasa acumulada en los tratamientos con lombrices

Tratamiento	Medias	Grupo
T1	35.00	A
T5	31.67	A B
T7	28.00	B C
T3	24.67	C D
T9	23.00	D

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

El incremento diferencial de la biomasa de las lombrices (*Eisenia foetida* Sav), constituyó un bioindicador directo de la estabilidad y el valor nutricional de los sustratos, de modo que definió una secuencia decreciente donde el tratamiento T1 (grupo A) alcanzó el máximo rendimiento y el T9 (grupo D) registró el menor desempeño. De acuerdo con lo planteado por (M. F. Fuentes 2022), el desarrollo tisular de la macrofauna dependió estrictamente de la disponibilidad de carbono asimilable y de una carga microbiana equilibrada que sirvió como fuente primaria de proteína, lo que demostró que el precompostaje de las excretas proporcionó microentornos particulares en la granja, (ver anexo 6).

Bajo este enfoque, la superioridad biológica observada en el T1 reflejó que el sustrato ofreció un ambiente óptimo de palatabilidad debido a la disipación oportuna de compuestos fitotóxicos iniciales. Como explicaron (A. Mansoor 2024) y (M. K.-H. Awasthi 2020), una estabilización equilibrada reduce los niveles perjudiciales de amoníaco libre y ácidos grasos volátiles; al disminuir estos factores estresantes, los anélidos optimizaron la ingesta del material orgánico humificado y de la masa bacteriana asociada, traduciéndolo en una mayor tasa de conversión alimenticia.

Por el contrario, el bajo rendimiento en el T9 evidenció un escenario donde la acelerada mineralización química previa limitó la disponibilidad de nutrientes digeribles para la población de anélidos. Como sustentó (X. J. He 2022), aunque la pérdida de peso seco por merma tiende a concentrar los macronutrientes estables en el abono, la madurez extrema del sustrato reduce el carbono lábil necesario para el sostenimiento biológico, confirmando que la ganancia de peso tisular se optimiza cuando coexisten la estabilidad del pH y un balance adecuado de materia orgánica remanente.

3.11 Análisis del costo unitario de producción por kilogramo de compost en cada tratamiento

Tabla 31. Costos por tratamiento utilizando microorganismos eficientes (EM) y lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav).

Tratamiento	Agente transformador	Valor agente transformador Lombrices	Valor agente transformador EM	Mano de obra	Total	Tiempo de transformación en días	Valor recuperado por agente transformador	Valor recuperación compost	Total
01	Lombrices	19.60	0	31.40	51.00	45	147 lombrices x 0.18 = 26.46	14.172 kg x .00 = 14.2	14.2
02	EM	0	1.25	31.40	32.64	45		14.5 95kg x .00 = 14.6	14.6
03	Lombrices y EM	19.60	1.25	31.40	52.24	45	137 lombrices x 0.18 = 24.66	14.109 kg x .00 = 14.1	14.1
04	EM	0	2.50	31.40	33.90	45		14.553 kg x .00 = 14.6	14.6
05	Lombrices y EM	19.60	2.50	31.40	53.50	45	144 lombrices x 0.18 = 25.92	14.154 kg x .00 = 14.2	14.2
06	EM	0	3.75	31.40	35.15	45		14.554 kg x .00 = 14.6	14.6
07	Lombrices y EM	19.60	3.75	31.40	54.74	45	140 lombrices x 0.18 = 25.20	14.145 kg x .00 = 14.1	14.1
08	EM	0	5.00	31.40	36.40	45		14.526 kg x .00 = 14.5	14.5
09	Lombrices y EM	19.60	5.00	31.40	56.00	45	135 lombrices x 0.18 = 24.30	14.124 kg x .00 = 14.1	14.1

Fuente: Elaboración propia, 2026

El análisis financiero determinó que la inversión inicial de los tratamientos estuvo condicionada directamente por el tipo y combinación de los agentes biotransformadores incorporados. Las variantes inoculadas de forma exclusiva con microorganismos eficientes (EM), constituyeron el bloque económicamente más accesible debido al bajo costo de adquisición de dicho insumo y la omisión de macrofauna, mientras que las combinaciones que conjuntaron lombrices y microorganismos eficientes representaron los costos más elevados del ensayo tras adicionar el valor fijo de los anélidos.

Por su parte, el costo unitario de producción por kilogramo replicó la tendencia de la inversión inicial, de modo que la eficiencia por unidad de masa favoreció a los tratamientos que prescindieron del uso de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav). El tratamiento T2 consolidó la mayor eficiencia operativa al combinar la menor inversión inicial con el costo por kilogramo más bajo, seguido de forma estrictamente ascendente por el resto de las variantes que utilizaron únicamente el consorcio microbiano como agente acelerador del proceso.

A pesar de que el volumen a pequeña escala propio del diseño experimental provocó un balance neto negativo generalizado debido al fuerte impacto de los costos fijos sobre unidades de solo cinco kilogramos, el tratamiento T1 (solo lombrices), reportó el balance menos deficitario. Este comportamiento financiero se atribuyó a la alta tasa de multiplicación de la macrofauna, la cual generó un valor recuperado por biomasa que actuó como un activo de uso interno estratégico para garantizar la continuidad y sostenibilidad del sistema productivo en la granja.

3.12 Análisis del tiempo de transformación y calidad final del producto

El proceso de biotransformación, ejecutado durante un periodo fijo de 45 días, demostró que el compost se encontró en una fase avanzada de estabilización biológica, pero insuficiente para completar la fase de humificación total de carbono de la materia orgánica, en los nueve tratamientos evaluados. Se determinó que, si bien el producto final no es apto para su aplicación en plántulas o sistemas de germinación delicados debido a su madurez temprana, sí poseyó las condiciones de estabilidad, pH alcalino (8.33 - 8.85) y riqueza macro y micronutritiva adecuadas para actuar como un enmendador de suelos degradados, por lo que se recomendó un periodo de reposo o poscompostaje adicional para reducir la relación C/N a los límites comerciales estandarizados.

3.12.1 Comportamiento de la relación carbono/nitrógeno (C/N) como indicador de madurez

La relación C/N constituyó el parámetro fundamental para verificar el éxito del tiempo de transformación. Al finalizar los 45 días, se registraron valores que oscilaron entre 20.37 (Tratamiento 06) y 24.72 (Tratamiento 01 y 07). Estos rangos demostraron que el material biotransformado alcanzó estabilidad biológica, pero una madurez temprana, lo que lo constituyó como un producto adecuado para su incorporación al suelo al garantizar que no ocurrirían procesos de competencia por nitrógeno (inmovilización) al ser aplicado en los cultivos. Los tratamientos T6 (20.37) y el T4 (20.96) manifestaron los mayores niveles de descomposición y mineralización del carbono inicial.

3.12.2 Potencial hidrógeno (pH) y estabilidad química

El pH final del producto biotransformado se estabilizó en un rango marcadamente alcalino, el cual se situó entre 8.56 (tratamiento 6) y 9.14 (tratamiento 3). Este comportamiento reflejó la completa degradación de los ácidos orgánicos de cadena corta que caracterizan las fases iniciales del compostaje y evidenció la acumulación de bases e intercambio de amonio (NH_4^+), durante los 45 días de maduración. Dichos valores resultaron ideales para la corrección de la acidez edáfica en suelos cultivables.

3.12.3 Riqueza nutricional y calidad del abono (macronutrientes y micronutrientes)

La calidad nutricional final del abono orgánico resultó sobresaliente en todos los tratamientos analizados:

- Nitrógeno total (%N): se mantuvieron concentraciones estables que variaron desde 1.73% (Tratamientos 1 y 7) hasta 2.04% (Tratamiento 4). Esta retención de nitrógeno confirmó que los agentes transformadores (tanto la lombriz coqueta roja como los microorganismos eficientes (EM)) asimilaron e inmovilizaron el elemento en su biomasa, lo que evitó pérdidas por volatilización.
- Fósforo (% P_2O_5) y potasio (% K_2O): el fósforo disponible mostró valores constantes cercanos al 1.00% en la mayoría de las unidades, mientras que el potasio disponible osciló entre 1.13% (Tratamiento 07) y 1.37% (Tratamiento 06), lo que aseguró un aporte equilibrado de macronutrientes primarios.

- Calcio (%CaO) y magnesio (%MgO): el contenido de calcio resultó elevado y alcanzó un máximo de 2.59% en el Tratamiento 9 (combinación lombrices y EM), lo cual se atribuyó a las glándulas calcíferas de la *Eisenia foetida* Sav. El magnesio se mantuvo uniforme en torno al 1.37% y 1.75%.
- Micronutrientes esenciales: el informe reportó concentraciones óptimas de hierro (con superación de los 2,000 ppm en todas las muestras), manganeso (entre 261.71 y 340.25 ppm), zinc (entre 113.06 y 142.78 ppm), boro (con rangos de 19.60 a 30.99 ppm) y cobre (con rangos de 17.97 a 23.48), lo cual consolidó al producto como un enmendador completo para la nutrición vegetal.

3.12.4 Contenido de materia orgánica (MO) y cenizas

Al concluir el periodo experimental, el porcentaje de materia orgánica se ubicó entre 73.00% (Tratamiento 06) y 79.00% (Tratamiento 8). Esta alta proporción de M.O. libre de degradación excesiva garantizó que el abono

poseyera una elevada capacidad para mejorar la estructura física del suelo, la retención de humedad y la actividad de intercambio catiónico (CIC). Por su parte, el porcentaje de cenizas permaneció constante entre 21.00% y 27.00%, lo que reflejó una adecuada proporción de elementos minerales remanentes.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA AMBIENTAL

4.1 Estrategias de manejo sostenible de excretas bovinas (*Bos taurus* L): propuesta de biotransformación en la granja de Zootecnia del CUNOR, Alta Verapaz.

4.1.1 Introducción

La presente estrategia se basó en el diseño de un modelo de economía circular y biotransformación optimizada para el manejo técnico de los residuales pecuarios generados en la sección de rumiantes del Centro Universitario del Norte. Para la estructuración de esta propuesta, se consideraron de forma integral los indicadores fisicoquímicos de madurez, el balance nutricional y los rendimientos biocenóticos obtenidos en la fase experimental, seleccionando aquellas variantes que demostraron la mayor **eficiencia en la estabilización de la materia orgánica. Bajo este enfoque** operativo, el plan integró la sincronización del precompostaje térmico con la inoculación estratégica de microorganismos eficientes y la acción de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), lo que garantizó la obtención de una enmienda orgánica inocua, comercialmente viable y adaptada a las condiciones edafoclimáticas de la región de Alta Verapaz.

4.1.2 Justificación de la propuesta de biotransformación de excretas bovinas en la granja de Zootecnia del CUNOR.

Cobán, Alta Verapaz, es un municipio que presenta alta pluviosidad según los reportes del INSIVUMEH, debido a esto la acumulación de excretas bovinas acumuladas sin manejo adecuado, propician efectos negativos. El proceso de lixiviación de nitratos y fosfatos (dicálcicos y tricálcicos), no solo afecta el recurso edáfico al infiltrarse hacia los horizontes inferiores del suelo, sino que contamina el manto freático.

Asimismo, estos elementos pueden ser desplazados por escorrentía hacia terrenos circundantes, además las emisiones de gases de efecto invernadero (metano CH₄, óxido nitroso N₂O, dióxido de carbono CO₂, y el aumento de vectores. Finalmente, contaminando un pequeño riachuelo que nace dentro de la granja y atraviesa diversas colonias ubicadas en la periferia de la cabecera municipal de Cobán y desemboca en el río Cahabón.

Para mitigar los impactos negativos mencionados, se propuso la biotransformación de los desechos, mediante el método de lombricompostaje, este proceso consiste en la siembra de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) e inoculando microorganismos eficientes (EM). Los productos generados son útiles como mejoradores de las propiedades física del suelo, retención de humedad y mejora la aireación. Asimismo, el uso de lixiviados asperjados en el follaje de las plantas, generan mayor volumen de biomasa aprovechable para los bovinos en pastoreo y aumentan el rendimiento en los pastos de corte.

4.1.3 Objetivo general

Proponer estrategias de manejo sostenible de excretas bovinas producidas en la sección de ganado lechero (*Bos taurus* L), en la granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, mediante un modelo de economía circular, (ver anexo 10).

4.1.4 Objetivos específicos

- Cuantificar la producción diaria de excretas bovinas en la granja de Zootecnia del CUNOR.
- Implementar el lombricompostaje como alternativa para el manejo y aprovechamiento de las excretas bovinas.
- Diseñar un modelo de economía circular para el aprovechamiento de los productos derivados del lombricompostaje en la granja.
- Capacitar a estudiantes, personal de campo y productores en buenas prácticas de economía circular aplicadas a la ganadería.

4.1.5 Metodología

La presente propuesta de biotransformación de excretas bovinas tiene como objetivo cerrar el ciclo de nutrientes y se presenta un modelo de manejo diario con el asocio de dos agentes biotransformadores (lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), lombricompostaje y microorganismos eficientes (EM), mediante lombricompostaje, a partir de lo siguiente:

- El proceso inicia con la recolección diaria de las excretas bovinas producidas por el hato lechero de la carrera de Zootecnia, las cuales serán trasladadas inmediatamente al área de biotransformación.
- En el proceso de biotransformación se usará una combinación de microorganismos eficientes (EM) y la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), para acelerar la descomposición y mejorar la calidad del producto final.
- Se tendrá a los 75 días un lombricompost de alta calidad y se aplicará en las parcelas de forraje de corte, así como en los potreros de la granja, con esta práctica se sustituirá el uso de los fertilizantes químicos, por abonos orgánicos, lo que mejorará las características físicas y químicas del suelo y beneficiará una mayor retención de agua.
- Socialización de los resultados con estudiantes, grupo de mujeres, colaboradores de campo y propietarios y/o administradores de unidades productivas en la zona de influencia del CUNOR.

4.1.6 Inventario bovino

Este cuenta con 20 bovinos lecheros de la raza Jersey como sigue: 14 vacas, 1 toro, 3 novillas de reemplazo y 2 terneras, que generan 600 kg de excretas por día, las cuales al no ser manejadas de manera amigable con el

ambiente provocan impactos negativos al aire (producción de metano CH₄), suelo, recurso hídrico, proliferación de vectores (moscas y parásitos), y contaminación del arroyo superficial, ocasionado por arrastre de lixiviados con altas cantidades de nitrógeno y fosforo que se filtran al manto freático, ya que el municipio de Cobán, presenta alta pluviosidad, según datos del INSIVUMEH.

Derivado a la disminución de personal de campo en la granja los bovinos se manejan de la siguiente manera:

- Pastoreo directo: 14 vacas y 1 toro
- Estabulación: 5 bovinos: (3 novillas de reemplazo y 2 terneras)
- Ordeño: 7 vacas que solo ingresan al área de ordeño, mientras dura el mismo, una vez por día.

La producción diaria de excretas en la sala de ordeño se cuantificó en 94 kg, por lo que se convierte en un impacto negativo acumulativo de 2,820 kg mensuales, y 34,310 kg anuales. Por lo descrito con antelación, se determinó que este pasivo ambiental, acumulado a un costado del establo, debe ser mitigado, para que no sea un riesgo tanto: **a)** legal, para la carrera de Zootecnia, **b)** sanitario, para proteger la salud humana y animal y **c)** ambiental para el área de influencia directa, Con base en este diagnóstico, se propuso un manejo integral mediante su aprovechamiento biotecnológico por lombricompostaje, el cual transforma este residuo en un activo económico y productivo dentro de la granja.

Con el objetivo de operativizar esta transición y garantizar la eficiencia de la alternativa ambiental propuesta, se estructuró un plan de manejo estructurado por etapas técnicas de manejo y estabilización, que se presentan con viñetas.

- Prácticas de limpieza del establo y sala de ordeño: Se recomendó recoger las excretas en seco con rastrillos, azadones y palas. Esta práctica reducirá

el consumo de agua de lavado y minimizará el exceso de humedad en el residuo orgánico, el cual debe ser traslado al área de precompostaje.

- Fase precompostaje: al contar con la infraestructura, equipo y materiales se utilizarán las excretas frescas, para iniciar su estabilización por un periodo de 30 días. En esta fase se deben realizar volteos a cada dos días para garantizar su aireación, monitorear la humedad mediante la técnica de puño. Asimismo, controlar la temperatura que durante esta fase debe alcanzar entre 60 y 70 grados centígrados, con la finalidad de eliminar larvas de moscas y patógenos y asegurar la higiene del compostaje.
- Inoculación microbiana y siembra de macrofauna: después del periodo de precompostaje se realizará la siembra la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), con una densidad de 112 gramos de anélidos adultos por cada 5 Kg de sustrato. Simultáneamente se inocularán los microorganismos eficientes (EM), durante un ciclo de 20 días, distribuidos en siete aplicaciones bajo las proporciones recomendadas por la casa comercial. El tiempo de biotransformación será de 45 días.
- Acción de microorganismos eficientes y macrofauna: los EM aceleran la descomposición aerobia, evitarán que se pudra el residuo orgánico y disminuirán los malos olores. Por su parte, la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), digerirá la materia orgánica y destruirá patógenos. Estos dos agentes biotransformadores garantizarán un compostaje estable, sin moscas, el cual producirá humus y lixiviados estabilizados de alta calidad, para las áreas de forrajes de la granja y reducirán el uso de fertilizantes sintéticos, la recuperación de los suelos e incremento de biomasa en pastos y forrajes.

La granja de la carrera de Zootecnia del CUNOR, se convertirá en un modelo de desarrollo sostenible local y un núcleo de extensión universitaria y desarrollo comunitario. Este espacio servirá como un centro de capacitación para personal de campo, estudiantes, organizaciones no gubernamentales grupos de mujeres y productores del área de influencia de esta casa

universitaria. De esta manera, se fomentará la utilización de los desechos sólidos orgánicos que producen a diario, tanto en las labores domésticas, como en los sistemas de traspatio y las unidades de producción agropecuaria formal, por ello se plantea lo siguiente:

- Establecer una cultura de conciencia ambiental, por medio de talleres prácticos del manejo de excretas bovinas lecheras, al resaltar que el precompostaje es una fase previa al lombricompostaje, para mitigar lixiviación y proteger fuentes de agua superficiales y subterráneas aledañas.
- Fomentar la recolección de excretas animales en seco para reducir el consumo de agua en la limpieza de los corrales, priorizar que esta práctica sea realizada durante las horas luz para minimizar el uso de la electricidad el área del establo.
- Implementar protocolos de higiene, bioseguridad y emergencia mediante estaciones de lavado de manos e higienización obligatoria para el personal y visitantes, con la finalidad de evitar la diseminación de agentes infecciosos dentro de la granja del CUNOR.
- Difundir el concepto de enfermedades zoonóticas entre los usuarios de la granja, enfatizando que el manejo inadecuado de excretas, fluidos corporales y leche cruda son las vías de transmisión directa, por lo que se deberá fomentar el uso de indumentaria limpia y desinfectada.

Para estudiantes:

- Prácticas de investigación y diagnóstico ambiental, mediante prácticas académicas orientadas al análisis de la calidad del suelo y agua, mediante el uso de laboratorio.
- Implementación de modelo de economía circular en los sistemas agropecuarios donde el estudiante será capacitado en el cierre del ciclo de nutrientes, mediante la biotransformación de excretas en abonos orgánicos mejoradores de la estructura fisicoquímica del suelo.

- Extensión universitaria: formar a los estudiantes como facilitadores del conocimiento y agentes de cambio, transfiriendo tecnología validadas en la granja. Fortaleciendo el vínculo entre sector académico y sector productivo local, mediante extensión y servicio brindada por la universidad.

Grupos de mujeres:

- Empleo de metodologías participativas: aplicar el modelo estratégico “Aprender haciendo”, el que integrará la educación ambiental, seguridad alimentaria y la economía del hogar, por medio de talleres participativos.
- Capacitación en elaboración y uso de bioinsumos: se impartirán tutorías para la elaboración de lombricompost a partir de desechos orgánicos de cocina, residuos de cosecha y excretas de animales de traspatio, con el fin de promover el uso de abonos orgánicos en huertos familiares, y asegurar el autoconsumo.
- Fomentar la economía circular y emprendimiento comunitario, se transferirán capacidades comerciales a través de la venta de humus de lombriz o productos cosechados del huerto, pie de cría de lombrices (*Eisenia foetida* Sav), esto proveerá fuentes alternativas de ingresos y desarrollo comunitario.
- Gestionar de manera correcta y sustentable los residuos orgánicos por las participantes, para neutralizar la presencia de patógenos como (*E. coli* y *Salmonella* spp), con este manejo, se prevendrá la contaminación de las fuentes de agua y alimentos y se mitigará la incidencia de enfermedades gastrointestinales en la población.
- Replicación de prácticas: la participación de mujeres en la economía circular será clave para la difusión de tecnologías limpias, con buenas prácticas de manejo ambiental sostenible. Al aplicar estos métodos, podrán recrear lo aprendido y se asegurará la transferencia de los conocimientos técnicos hacia las generaciones futuras.

ONG y población en general

- Visitas guiadas a granja: se organizarán recorridos de campo orientados a la observación directa de prácticas de prácticas agropecuarias sustentables, y amigables ambientalmente como el uso de lombricomposteras, lo cual demostrará la viabilidad ambiental de los sistemas y facilitará su replicación tecnológica en sus comunidades locales.
- Validación de procesos e intercambiar experiencias. La infraestructura operará como una unidad demostrativa y de capacitación, donde se validarán los procesos biotecnológicos y se propiciará el intercambio de conocimientos técnicos con diversos actores sociales.

4.1.7 Propuesta de reutilización de los productos resultantes de los dos procesos

La utilización de las excretas tratadas con lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), producirán un humus rico en ácidos fúlvicos y húmicos. Su aplicación como enmiendas orgánicas mejoran la estructura física del suelo, la porosidad y la retención de humedad del suelo, este insumo se utilizará en las áreas de zacateras y potreros de pastoreo directo para mitigar la escorrentía provocada por la topografía de la granja; las dosis seguras se regularán mediante análisis previos de suelo, para evitar contaminación por nitratos.

Asimismo, esta práctica promoverá una economía circular dentro de la granja, reducirá la dependencia de fertilizantes sintéticos, además que su aplicación constante ayudará a restaurar el microbiota del suelo, y facilita la absorción del fósforo.

Aplicación de fertilizante líquido fermentado: el lixiviado capturado por el proceso de biotransformación se diluirá y se aplicará como fertilizante líquido, el cual será útil para obtener una respuesta rápida del forraje, estimulará el rebrote y acelerará la recuperación del área foliar de los pastos, ya que nutre a la planta porque se absorbe de manera rápida por las estomas.

4.1.8 Plan de manejo integral de las excretas bovinas

El plan de manejo integral se ejecutará mediante lombricompostaje, en el cual se emplearán como los agentes biotransformadores lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM). Los productos biofertilizantes resultantes serán aprovechados directamente en las actividades agrícolas y pecuarias diarias de la granja, lo que consolidará un modelo de economía circular.

Para el desarrollo del lombricompostaje se adecuará la infraestructura básica o se implementarán nuevos módulos funcionales que facilitarán la ejecución del proceso, la estructura se detalla en los anexos 10,11 y 12.

4.2 Análisis general e integración sistémica de la propuesta de biotransformación

El análisis integral de la propuesta ambiental demostrará que la gestión técnica de las excretas bovinas lecheras (*Bos taurus* L), en el CUNOR funcionará como un sistema de interdependencia biológica, química y económica orientado a la sustentabilidad local. La tasa de merma física de la biomasa constituirá el componente central sobre el cual se articulará todo el diseño, la cual actuará como el bioindicador directo de la actividad metabólica celular global del sistema. Al combinar la fase previa de precompostaje térmico con la acción conjunta de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida*) y el consorcio de microorganismos eficientes (EM), se acelerará el ciclo biogeoquímico del carbono.

Como sustentaron (A. Mansoor 2024) y (C. M. López-Vázquez 2023), la degradación y el desprendimiento de las fracciones de carbono lábil en forma de CO₂ y vapor de agua constituirán el fenómeno biofísico que forzará una contracción volumétrica de las camas, este proceso inducirá un efecto de concentración pasiva que incrementará la densidad y disponibilidad de macronutrientes esenciales dentro de la enmienda orgánica remanente.

Esta actividad biotransformadora y el acondicionamiento de los minerales se relacionarán directamente como los indicadores de madurez del abono y la inocuidad ambiental del modelo propuesto. La programación de los tiempos de cada etapa garantizará una humificación biológica eficiente, esto facilitará la estabilización carbono/nitrógeno (C/N) y la regulación del pH hacia rangos idóneos.

De acuerdo con los planteamientos de (M. F. Fuentes 2022), la adecuada maduración del sustrato reducirá radicalmente la volatilización libre del amoníaco gaseoso y prevendrá los procesos de putrefacción anaerobia en las camas de la granja. Por lo tanto, la calidad nutricional del abono final y la captura de lixiviados se consolidarán gracias a las condiciones óptimas del lecho, el cual asegurará que el producto final funcione como un mejorador de la estructura edáfica y como un bioestimulante foliar altamente soluble que facilitará la asimilación del fósforo en los sistemas forrajeros locales.

Al mismo tiempo, la respuesta zootécnica de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), demostrará la viabilidad y palatabilidad del material precompostado. El aumento de peso y la tasa de multiplicación de los anélidos dependerán estrictamente de la mitigación oportuna de los factores de estrés iniciales del estiércol fresco.

Según lo expuesto por (X. J. He 2022) y (M. K.-H. Awasthi 2020), cuando el sustrato supere las etapas críticas de altas temperaturas y picos de fitotoxicidad, como la presencia de ácidos grasos volátiles y amoníaco libre, las lombrices optimizarán la ingesta de la masa bacteriana y del material orgánico humificado, elementos que convertirán eficientemente en proteína animal de alto valor. De este modo, la población de lombrices actuará como un indicador vivo del éxito de la estabilización del sustrato, esto asegurará la retención de nitrógeno en su propio tejido tisular antes de la cosecha final del lombricompost.

Finalmente, esta dinámica bioquímica determinará la estructura y la viabilidad financiera de la propuesta tecnológica dentro de la granja de la carrera de Zootecnia. A pesar de que la adquisición de los agentes biotransformadores significará un gasto operativo inicial, la inversión se recuperará gracias al valor del abono y de la biomasa obtenidos. El incremento poblacional de lombrices en los lechos constituirá un activo de uso interno estratégico que asegurará el autoabastecimiento y la continuidad del sistema productivo sin depender de inventarios externos.

Para concluir, la propuesta tecnológica absorberá por completo los 34,310 kg de excretas anuales acumuladas en las instalaciones; esta acción reducirá el impacto ambiental en la zona de influencia y establecerá un modelo replicable de economía circular que mitigará los riesgos legales, sanitarios y ambientales, al mismo tiempo que ofrecerá una alternativa viable de fertilización orgánica para la comunidad ganadera de la región (ver anexo 25, anexo 26).

CONCLUSIONES

1. Se evaluó la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) y los microorganismos eficientes (EM), sobre las excretas de ganado bovino lechero (*Bos taurus* L), en la granja de Zootecnia del CUNOR. Se comprobó que el empleo de tecnologías biológicas continuas estabiliza progresivamente los pasivos ambientales. Aunque el periodo experimental de 45 días (precedido por 30 días de precompostaje), resultó insuficiente para alcanzar la madurez química total deseada, la integración simbiótica de EM y anélidos (Tratamientos T3, T5, T7 y T9) superó al rendimiento del testigo convencional (T1, solo lombrices). Esta combinación indujo una predigestión enzimática del sustrato que redujo la relación carbono/nitrógeno (C/N) a rangos de 20.37 a 25.70, estabilizó el pH entre 8.56 y 9.14 y conservó un contenido final de materia orgánica del 73% al 78%. Esto demuestra la viabilidad técnica, ambiental y de economía circular de este sistema para la conversión de excretas en enmiendas agrícolas inocuas y de alto valor nutricional en la región de Cobán, Alta Verapaz.
2. Se determinó que las variaciones del pH, temperatura y humedad durante la biodegradación de las excretas bovinas confirmaron las condiciones óptimas para la supervivencia de (*Eisenia foetida* Sav. La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos respecto a estas variables permitió ratificar la hipótesis nula sobre la estabilidad ambiental del proceso.
3. Se estableció que el tratamiento T6 es el modelo de biotransformación más eficiente en la granja de Zootecnia del CUNOR. La inoculación con microorganismos eficientes (EM), aceleró la mineralización y maduración del sustrato, con lo cual se logró un abono orgánico con un perfil de macronutrientes equilibrado, esto valida la hipótesis alternativa de la investigación.

4. Los análisis de laboratorio confirmaron la viabilidad agronómica del abono orgánico. Los tratamientos T6, T4 y T3 presentaron los indicadores de madurez más altos (relación C/N, pH y carbono orgánico). La existencia de diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia biotransformadora y en la calidad del compost EM y lombricompost confirmó la superioridad de estos tratamientos y validó la hipótesis alternativa.
5. La evaluación de *Eisenia foetida* Sav permitió determinar una respuesta en la ganancia de biomasa: el T1 (excreta bovina lechera + (*Eisenia foetida* Sav), obtuvo el mayor rendimiento, mientras que el T9 (excreta bovina lechera + *Eisenia foetida* Sav + EM), mostró una influencia negativa tras la inoculación simultánea del consorcio microbiano. Estas diferencias significativas ratifican la hipótesis alternativa sobre la influencia del tratamiento en la dinámica poblacional del anélido, al comprobarse diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia biotransformadora del lombricompost.
6. El análisis de costo-beneficio evidenció diferencias significativas en el desempeño económico de los modelos de los tratamientos inoculados con EM, tanto en la eficiencia biotransformadora como en el desempeño económico de los tratamientos evaluados. El T2, destacó por el menor costo unitario de producción, mientras que el T1 (excreta bovina + *Eisenia foetida* Sav) sobresalió en la recuperación de la inversión a través de la producción de biomasa de lombrices, esto validó la hipótesis alternativa respecto a la viabilidad económica.
7. La acción combinada de microorganismos eficientes (EM) y la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav) constituye un modelo de transferencia tecnológica viable para las unidades productivas agropecuarias de Alta Verapaz. Este sistema no solo fomenta la economía circular en las fincas locales, sino que mitiga significativamente el impacto ambiental derivado de la esorrentía y la disposición inadecuada de residuos pecuarios sobre las fuentes hídricas de la región.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el tratamiento 6 como el modelo de biotransformación preferente para las excretas bovinas lecheras en la granja de Zootecnia del CUNOR y de la región, mediante la inoculación del consorcio de microorganismos eficientes (EM), esto permitirá acelerar la maduración del sustrato, elevar la tasa de mineralización de los componentes y obtener un abono orgánico con un perfil equilibrado de macronutrientes.
2. Monitorear los parámetros fisicoquímicos durante la biotransformación, esto incluye realizar análisis químicos iniciales a las excretas frescas para ajustar la relación carbono/nitrógeno mediante fuentes carbonadas, así como controlar la humedad (prueba de puño (índice cualitativo) y la temperatura previa a la siembra de los anélidos. Esto garantizará un ecosistema seguro que prevenga la mortalidad o migración por estrés térmico u osmótico de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav).
3. Realizar análisis microbiológicos complementarios al producto final de la biotransformación, por medio de conteos de laboratorio de *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos, en el compost EM y lombricompost, esto permitirá certificar la inocuidad biológica del abono y garantizará que el pico termofílico del precompostaje eliminó por completo los patógenos fecales, con el objetivo de obtener un producto apto y seguro para su aplicación en la agricultura.
4. Utilizar el abono orgánico obtenido, como una enmienda correctiva en los suelos de carácter ácido en la región de Cobán, Alta Verapaz, mediante su aplicación directa en las parcelas de pastos y jardín de forrajes; esto permitirá aprovechar sus propiedades ligeramente alcalinas y su alto contenido de hierro y bases estables para neutralizar la acidez de los suelos de la región, a la vez contribuirá a recuperar las propiedades físicas y el perfil nutricional del suelo agrícola de forma sostenible.

5. Promover este modelo de aprovechamiento y biotransformación de excretas bovinas en las unidades productivas agropecuarias de Alta Verapaz, a través de la transferencia tecnológica de la acción combinada de microorganismos eficientes (EM) y lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), esto facilitará el establecimiento de alternativas de economía circular viables en las fincas locales, y reducirá el impacto negativo de los residuos pecuarios sobre fuentes hídricas de la región.
6. Realizar nuevas fases de investigación para evaluar la eficiencia agronómica del abono obtenido (tratamiento seis) en parcelas experimentales bajo condiciones de campo en cultivos de pastos locales. Asimismo, se recomienda validar el uso de las dosis e inóculos de microorganismos eficientes (EM) en excretas de otras especies de la granja de Zootecnia del CUNOR, para determinar sus tiempos de biotransformación y la capacidad de estabilización en diferentes sustratos orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

Agraria, Universidad Nacional. «Manual técnico de lombricultura: Guía práctica para la producción de abono orgánico.» 2011.

Agricultura, FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la. *Manual de buenas prácticas de la FAO para la producción y uso de compost*. Manual, Roma: FAO, 2013.

Almagro, Io. «Muy interesante.» 27 de enero de 2025. https://www.muyinteresante.com/naturaleza/2032.html#google_vignette (último acceso: 2025).

Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajendran, K., Kumar, S., Quan, W., Duan, Y., Awasthi, S. K., Chen, H., Pandey, A., Zhang, Z., Ahmed, S., Taherzadeh, M. J., & Taherzadeh, A. «Techno-economic insights into the carbon dioxide mitigations during pig manure composting.» *Journal of Cleaner Production*, 2020: 250.

Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Alami, I. T. «Composting parameters and quality evaluation of agricultural waste: A review.» *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2018: 141-154.

Cesaro, Alessandra, Vincenzo Belgiorno, y Alessio Siciliano. «Nutrient dynamics and leaching prevention in soils amended with organic fertilizers: A comprehensive review.» *Environmental Science and Pollution Research*, 2022: 29.

Climate data. s.f. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/guatemala/alta-verapaz/coban-53883/> (último acceso: 2025).

Compost Segriá. *Compost segriá*. 2020. <https://compostsegria.com/ca/es/fases-del-compostaje-2/> (último acceso: 11 de mayo de 2025).

Composta en Red. *Composta en Red*. 2021. <https://www.compostaenred.org/el-compost-y-el-compostaje/> (último acceso: 11 de mayo de 2025).

Domínguez, Jorge, y María Gómez-Brandón. 2023. «El vermicompostaje: un proceso biooxidativo de descomposición y estabilización de la materia orgánica mediado por las lombrices de tierra.» *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2023: 45-58.

- Edwards, Clive A., Jorge Domínguez, y Norman Q. Arancon. *Biology and Ecology of Earthworms*. Países Bajos: Dordrecht: Springer Nature Group, 2011.
- Frabelse. «Tecnología de los microorganismos efectivos.» *¿QUÉ SON LOS MICROORGANISMOS EFECTIVOS?* Almería, España, 2019.
- Gobernación de Alta Verapaz. *Gobernación de Alta Verapaz*. 2015. https://gubernacionaltaverapaz.gob.gt/?page_id=5686 (último acceso: 10 de mayo de 2025).
- Guengerich, F. P. «Drug Metabolism and Disposition,» En *Cytochrome P450 research in the 21st century: Challenges and opportunities.*, 1184-1193. 2022.
- Innovatione AgroFood Design. «Innovatione.» *Lombricultura*. 22 de julio de 2019.
- Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá. *Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá*. 2023. <https://www.incap.int/index.php/es/lombricultura> (último acceso: 10 de mayo de 2025).
- Instituto Valenciano de Microbiología . *Instituto Valenciano de Microbiología* . 13 de mayo de 2017. <https://www.ivami.com/es/microbiologia-de-abonos-y-fertilizantes/5440-actinomicetos-en-suelos-tierras-aguas-sedimentos-fertilizantes-microorganismos-eficientes> (último acceso: 11 de mayo de 2025).
- J. L. Rourke, CJ Sinal. «Enciclopedia de Toxicología (Tercera Edición).» En *Módulo de Referencia en Ciencias Biomédicas*, de CJ Sinal J. L. Rourke, 490. Halifax, Canadá: ELSEVIER, 2014.
- M.A, Feijoo. «Microorganismos eficientes y sus beneficios para los agricultores.» *Científica Agroecosistemas*, 2019: 31- 40.
- Malińska, Krystyna, Tomasz Głąb, James F. Barr, y Marina Cáceres. «Biotechnical management of livestock waste: The role of microbial consortia in organic fertilizer maturation.» *Bioresource Technology*, 2021: 325.
- Martínez-Blanco, Joan, Cristina Lazcano, y Thomas H. Christensen. «Nitrogen mobility and leaching mitigation in agricultural systems through compost application.» *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023: 342.

- Morocho, M. Tenya. «Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas.» *Centro Agrícola* , 2019: 5-8.
- NaturalistMX. *NaturalistMX*. 2023. <https://mexico.inaturalist.org/taxa/370733-Eisenia-foetida> (último acceso: 12 de mayo de 2025).
- Olivares-Campos, MA. *Scielo* . 2012. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000100003.
- Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwo, C. O., Tagbo, N. C., & Farmer, A. S. «Composting technology in agricultural waste management: A review.» *Environmental Technology & Innovation*, 2021: 22.
- Pilar Román, María Martínez, Alberto Pantoja. *MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR*. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013.
- Pilar Román, María Martínez, Alverto Pantoja. «Manual de Compostaje del Agricultor.» *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, 2019: 4-39.
- Pinos-Rodríguez, Juan M. «Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América.» *Agrociencia*, 2012: 5-7.
- Reyes, RJ Somarriba. «GUIA DE LOMBRICULTURA.» Managua, Nicaragua : Universidad Nacional Agraria , 2004.
- Sales, Francisco. «Manual de Lombricultura .» *Universidad Tecnológica del Perú*, 2021: 7-8.
- Sánchez, Juan A., María A. Olivera, y Luis F. Restrepo. «Valorización de residuos orgánicos agropecuarios mediante compostaje en el marco de la economía circular.» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2021: 45-59.
- Shuldt, M. *Las lombrices utilizadas en vermicultivos*. 5 de julio de 2022. <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/1659.html> (último acceso: 2025).
- Silva, Alexandra Florián. «Microorganismos eficientes.» *Microorganismos eficientes*. Perú: Fertilizantes Orgánicos SAC, 2017.

- US Composting Council. «Hoja informativa de USCC: El compost y sus beneficios .» *US Composting Council*, 2018: 1-2.
- USAID. «Producción de humus utilizando lombriz coqueta roja.» *Feed future*, 2021: 4-26.
- Villarreal-De la Cruz, J. A., E. De la Cruz-Lázaro, C. Márquez-Quiroz, y R. Osorio-Osorio. «Diversidad fenotípica de chile Amashito de Tabasco y Chiapas, México.» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2021.
- YS, Gao YT. Zhang. «Cinética de producción de glicerol y etanol en la fermentación del vino a baja temperatura utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cereviae*.» *Revista internacional de ciencia y tecnología de los los Alimentos*, 2019: 102.
- Z, Yang. «Evaluación del impacto de los hongos de descomposición de la madera en el módulo de elasticidad del pino silvestre.» *Biodeterioro y biodegradación internacionales*, 2019: 124.
- Zandvakili, O. R., Barker, A. V., Hashemi, M., Etemadi, F., & Autio, W. R. «Nitrogen dynamics and nutrient retention in biotransformed organic fertilizers and their impact on biological quality.» *Journal of Plant Nutrition*, 2022: 1142-1156.

ANEXOS

Anexo 1. Figura 29. Informe de análisis de abono orgánico 0_123.



ANALAB

Orden: 33-987
 Cliente: 50807 - AGUILAR VELASQUEZ, ANTONIO ESTUARDO
 Unidad Productiva: HACIENDA MONTE BASAN en Jurisdicción de: Cabaña ALTA VERAPAZ

Fecha de ingreso: 02/12/2025
 Fecha de Ejecución: 11/12/2025 04:22:28
 Fecha de Impresión: 13/01/2026

INFORME DE ANÁLISIS DE ABONO ORGANICO O-1

No.	Identificación de la muestra	pH	Grav	% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O	% CaO	% MgO	% Boro	% Azufre	% Calcio	% Hierro	% Manganeso	% C.O.	% Materia Orgánica	% Rel. C/N	
0001	L.O.T.R. Tratamiento 1	6.85	14.73	1.73	0.85	1.55	0.45	1.84	10.80	0.22	13.81	1449.00	713.00	191.85	45.77	35.00	77.00
0002	L.O.T.R. Tratamiento 2	6.71	15.30	1.68	0.87	1.51	0.46	1.80	10.80	0.22	13.80	1449.00	713.00	191.85	45.76	35.00	76.99
0003	L.O.T.R. Tratamiento 3	6.14	15.45	1.70	0.81	1.16	0.85	1.78	10.80	0.20	13.45	1403.00	678.74	140.76	41.86	35.00	75.00
0004	L.O.T.R. Tratamiento 4	6.85	15.80	1.64	0.81	1.53	0.44	1.84	10.80	0.24	13.80	1449.00	713.00	191.85	45.77	35.00	77.00
0005	L.O.T.R. Tratamiento 5	6.85	14.35	1.79	0.85	1.25	0.47	1.81	10.17	0.20	13.80	1449.00	713.00	191.85	45.76	35.00	76.99
0006	L.O.T.R. Tratamiento 6	6.86	15.37	1.69	0.82	1.17	0.43	1.82	10.80	0.24	13.81	1449.00	713.00	191.85	45.76	35.00	76.99
0007	L.O.T.R. Tratamiento 7	6.67	14.73	1.73	0.81	1.15	0.74	1.87	10.80	0.28	13.80	1449.00	713.00	191.85	45.77	35.00	77.00
0008	L.O.T.R. Tratamiento 8	6.85	15.75	1.65	0.85	1.34	0.44	1.87	10.80	0.21	13.87	1453.00	715.00	193.00	45.80	35.00	76.99
0009	L.O.T.R. Tratamiento 9	6.85	15.75	1.65	0.85	1.33	0.45	1.85	10.80	0.20	13.45	1403.00	678.74	140.76	41.87	35.00	75.00

*N Nitrogeno
 *P₂O₅ Fosforo
 *K₂O Potasio
 *CaO Calcio
 *MgO Magnesio
 *C.O. Carbono Organico
 *M.O. Materia Organica
 *C/N Relación Carbono-Nitrogeno

- Nitrógeno (N): determinación por método de Dumas
- Fosforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) y boro (B): digestión ácida con microondas y lectura por medio de Espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente - ICP/OES.
- Cénizas, Carbono orgánico (C.O.) y Materia orgánica (M.O.): método gravimétrico
- pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo: Agua.

* Análisis Acreditado ISO/IEC 17025, por ANSI National Accreditation Board - ANAB AT-3337

- Los resultados de este Informe son válidos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su Impresión ORIGINAL.
- Los resultados de este Informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
- El Laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este Informe.
- La reproducción parcial o total de este Informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.
- Las reglas de decisión utilizadas para interpretar los Informes se basan en normas nacionales, bibliografía Internacional e Investigaciones de Anacafé, para más información CLIC AQUÍ

LAB_PV108_F01 Versión 5

5a calle 0-50 zona 14 Guatemala, Guatemala C.A

E-mail: analab@anacafe.org

Teléfonos PBX: 2421-3700 ext: 1132 1133 1137

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 2. Tabla 32. Temperatura promedio semanal (°C), en los tratamiento evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje.

PRECOMPOSTAJE (°C)				TRATAMIENTOS	SEMANAS														
01	02	03	04		INCORPORACIÓN DE LOMBRICES Y EM (°C)														
					05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17		
21	46	58	42	T1R1	22	20	22	20	20	20									
				T1R2	22	20	22	20	20	20									
				T1R3	22	20	22	20	20	20									
				T2R1	22	22	22	20	20	20									
				T2R2	22	22	22	20	20	20									
				T2R3	22	22	22	20	20	20									
				T3R1	22	22	22	20	20	20									
				T3R2	22	20	20	20	20	20									
				T3R3	22	20	20	20	20	20									
				T4R1	22	20	20	20	20	20									
				T4R2	22	20	20	20	20	20									
				T4R3	22	20	20	20	20	20									
				T5R1	22	20	22	20	20	20									
				T5R2	22	22	22	20	20	20									
				T5R3	22	22	22	20	20	20									
				T6R1	22	22	22	20	20	20									
				T6R2	22	22	22	20	20	20									
				T6R3	22	20	20	20	20	20									
				T7R1	22	20	20	20	20	20									
				T7R2	22	20	20	20	20	20									
				T7R3	22	20	20	20	20	20									
				T8R1	22	20	20	20	20	20									
				T8R2	22	20	20	20	20	20									
				T8R3	22	22	20	20	20	20									
				T9R1	22	22	22	20	20	20									
				T9R2	22	22	22	20	20	20									
				T9R3	22	22	22	20	20	20									

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 3. Tabla 33. Valores promedio semanales de pH en los tratamientos evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).

PRECOMPOSTAJE				TRATAMIENTOS	SEMANAS														
					INCORPORACIÓN DE LOMBRICES Y EM														
01	02	03	04		05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17		
7.76	8.32	8.54	8.56	T1R1	9.28	8.87	8.41	8.71	9.1	9.17	9.5								
				T1R2	9.03	9.17	9.30	8.79	8.95	8.90	0.07								
				T1R3	8.81	8.75	8.66	8.91	7.07	8.67	9.28								
				T2R1	9.6	9.10	8.56	9.41	8.96	8.91	9.30								
				T2R2	8.75	8.76	8.79	8.35	8.99	8.85	8.94								
				T2R3	8.86	8.60	8.41	8.78	9.20	8.96	9.02								
				T3R1	9.26	8.90	8.79	9.13	9.28	9.03	9.37								
				T3R2	8.90	8.94	9.02	8.78	8.62	8.55	9.28								
				T3R3	9.16	8.87	8.67	8.93	8.82	8.70	9.30								
				T4R1	9.13	8.87	8.56	9.10	8.79	8.69	8.92								
				T4R2	8.70	8.71	8.71	8.49	9.01	8.57	8.82								
				T4R3	8.75	8.54	8.46	8.28	9.12	9.14	9.01								
				T5R1	9.20	8.92	8.26	9.14	8.65	8.72	8.80								
				T5R2	8.32	8.53	8.93	8.80	8.61	8.83	9.21								
				T5R3	8.29	8.42	8.59	8.25	8.78	8.93	9.05								
				T6R1	8.90	8.74	8.32	8.90	8.80	8.60	8.90								
				T6R2	8.97	8.80	8.77	8.48	8.89	8.75	8.90								
				T6R3	8.54	8.43	8.39	8.39	9.14	8.84	8.98								
				T7R1	9	8.86	8.58	8.79	8.75	8.84	9.07								
				T7R2	8.68	8.68	8.68	8.53	8.98	9.03	9.22								
				T7R3	8.88	8.91	8.96	9.03	9.54	9.15	9.28								
				T8R1	8.99	8.54	8.26	8.83	7.69	8.50	9.18								
				T8R2	9.09	8.67	8.39	8.51	8.94	8.82	9.07								
				T8R3	9.16	8.94	8.48	8.46	9.59	8.90	9.08								
				T9R1	8.96	8.85	8.72	8.70	9.01	8.70	9.18								
				T9R2	9.10	8.91	8.51	8.43	8.89	8.95	9.16								
				T9R3	8.49	8.49	8.51	8.77	9.21	9.20	9.21								

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 4. Tabla 34. Porcentaje de humedad semanal de los tratamientos evaluados mediante la prueba de puño durante las fases de (precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).

PRECOMPOSTAJE				TRATAMIENTOS	SEMANAS														
01	02	03	04		INCORPORACIÓN DE LOMBRICES Y EM														
					05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17		
2	2	2	3	T1R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T1R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T1R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T2R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T2R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T2R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T3R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T3R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T3R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T4R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T4R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T4R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T5R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T5R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T5R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T6R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T6R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T6R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T7R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T7R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T7R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T8R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T8R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T8R3	3	3	3	3	3	3	3								
				T9R1	3	3	3	3	3	3	3								
				T9R2	3	3	3	3	3	3	3								
				T9R3	3	3	3	3	3	3	3								

¿Cómo saber si la humedad del compostaje es la adecuada? Se toma un puñado del sustrato y se cierra la palma de la mano con poca fuerza:

Referencias:

- 1) Si el puñado de sustrato se desmorona al abrir la palma de la mano, esta muy seco, debe agregársele agua desmineralizada.
- 2) Si chorrea en exceso e incluso se sale de los dedos hay exceso de agua.
- 3) Si mantiene su forma al abrir la palma de la mano, el sustrato tiene la humedad correcta.

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 5. Tabla 35. Valores promedio semanales de conductividad eléctrica (dS/m) en los tratamientos evaluados durante las fases de precompostaje, compostaje (EM) y lombricompostaje).

				SEMANAS														
PRECOMPOSTAJE				TRATAMIENTOS	INCORPORACIÓN DE LOMBRICES Y EM													
01	02	03	04		05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	
0.78	0.75	0.85	0.88		T1R1	0.60	0.68	0.78	0.84	1.08	0.32	0.39						
					T1R2	0.64	0.60	0.55	0.96	0.69	0.96	0.44						
					T1R3	0.68	0.73	0.79	0.67	0.94	0.86	0.55						
					T2R1	0.61	0.87	1.07	0.88	0.94	0.38	0.42						
					T2R2	0.66	0.67	0.70	1.08	0.70	0.82	0.46						
					T2R3	0.61	0.69	0.82	0.95	0.66	0.65	0.51						
					T3R1	0.54	0.70	0.87	0.57	0.91	0.61	0.51						
					T3R2	0.52	0.63	0.77	0.88	1.14	0.77	0.49						
					T3R3	0.71	0.72	0.75	0.61	0.78	0.67	0.40						
					T4R1	0.60	0.75	0.92	0.70	0.77	0.56	0.31						
					T4R2	0.69	0.69	0.69	0.68	0.92	0.65	0.45						
					T4R3	0.71	0.72	0.75	0.80	0.78	0.35	0.39						
					T5R1	0.65	0.79	0.96	0.67	0.72	0.52	0.53						
					T5R2	0.68	0.70	0.72	0.74	0.75	0.64	0.56						
					T5R3	0.90	0.75	0.60	1.02	0.70	0.49	0.65						
					T6R1	0.78	0.80	0.83	0.91	0.91	0.77	0.38						
					T6R2	0.78	0.70	0.62	0.97	0.67	0.78	0.63						
					T6R3	0.84	0.82	0.79	0.82	0.81	0.42	0.47						
					T7R1	0.64	0.80	0.94	0.91	0.89	0.63	0.48						
					T7R2	0.73	0.67	0.61	0.79	1.03	0.60	0.44						
					T7R3	0.74	0.74	0.75	0.87	0.66	0.59	0.64						
					T8R1	0.50	0.79	1.00	0.82	0.97	1.06	0.59						
					T8R2	0.90	0.81	0.74	0.79	1.30	0.65	0.36						
					T8R3	0.65	0.70	0.78	0.97	0.77	0.77	0.39						
					T9R1	0.59	0.68	0.84	0.89	0.74	0.68	0.54						
					T9R2	0.67	0.75	0.93	0.76	0.79	0.59	0.46						
					T9R3	0.76	0.72	0.67	0.91	0.81	0.65	0.46						

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 6. Tabla 36. Evolución de la biomasa de la lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), en los tratamientos evaluados durante la fase de lombricompostaje.

Tratamientos	Inicio fase compostaje en gramos	Final compostaje en gramos	Diferencia en gramos durante la fase compostaje
T1	112	147	35
T3	112	137	25
T5	112	144	32
T7	112	140	28
T9	112	135	23

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 7. Tabla 37. Porcentaje de merma del sustrato en la fase de lombricompostaje y compostaje (*Eisenia foetida* Sav) y microorganismos eficientes (EM).

Tratamientos	Inicio Compostaje kg	Merma por análisis pH y EC	Merma alimentación lombrices y EM	Gramos de compostaje al finalizar la investigación				
T1	05	35 g	241	4,724				
T2	05	35 g	100	4,865				
T3	05	35 g	262	4,703				
T4	05	35 g	114	4,851				
T5	05	35 g	247	4,718				
T6	05	35 g	117	4,848				
T7	05	35 g	250	4,715				
T8	05	35 g	123	4,842				
T9	05	35 g	257	4,708				

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 8. Figura 30. Determinación de densidad aparente, densidad real y porcentaje de porosidad en los tratamientos evaluados

TRATAMIENTO	PESO GRAMOS	VOLUMEN SECO mL	VOLUMEN DESPALZADO AGUA	DENSIDAD APARENTE g/mL	PESO ESPECIFICO Q	DENSIDAD REAL g/mL	PESO ESPECIFICO Q REAL	% POROSIDAD	
T1	5.6	18	7	0.31	0.31	0.80	0.80	61.11	61.11
T2	6.5	19	6	0.34	0.34	1.08	1.08	68.42	68.42
T3	5.8	17	6	0.34	0.34	0.97	0.97	64.71	64.71
T4	6.7	18	7	0.37	0.37	0.96	0.96	61.11	61.11
T5	6	14.5	6	0.41	0.41	1.00	1.00	58.62	58.62
T6	6.7	18	8	0.37	0.37	0.84	0.84	55.56	55.56
T7	6.5	17.5	7	0.37	0.37	0.93	0.93	60.00	60.00
T8	6.5	18.5	8	0.35	0.35	0.81	0.81	56.76	56.76
T9	6.1	15	7	0.41	0.41	0.87	0.87	53.33	53.33

Dap	<ul style="list-style-type: none"> • 0.3 – 0.7 g/ml suelos orgánicos • 0.71 – 0.8 g/ml suelos minerales (cenizas volcánicas) • 0.81 – 2.3 o más suelos compactados 	$f = 100 - (100 \cdot Dap)$	$f = 100 \cdot (Dreal - Dap)$
		Dreal	Dreal

• Suelos ligeros 30 - 45 % Los SUELOS LIVIANOS o de textura gruesa contienen más arena. Estos suelos son de fácil labranza.

• Suelos medios 46 - 55 % La porosidad media de los suelos es del orden del 50%. Se clasifican por su tamaño en macroporos (≥ 50 micras), mesoporos (50-10 μ) y microporos (<10).

• Suelos pesados 56 - 65 % Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos. En los SUELOS PESADOS de textura fina predominan las partículas de limo y arcilla. Estos suelos son más difíciles de trabajar por su plasticidad y adherencia.

• Suelos turbosos 66 - 90 % Tipo de suelo derivado de materia orgánica muerta en un área húmeda. La menor cantidad de oxígeno disponible causa como resultado una descomposición más lenta de la materia orgánica, de modo que se pueden reconocer los residuos vegetales.

Tabla 3. Clasificación de la porosidad del suelo

Unidad (%)	Propiedades
<40	Muy bajo
40 - 45	Bajo
45 - 55	Medio
55 - 65	Alto
>65	Muy alta

Fuente: Cairo, 1995

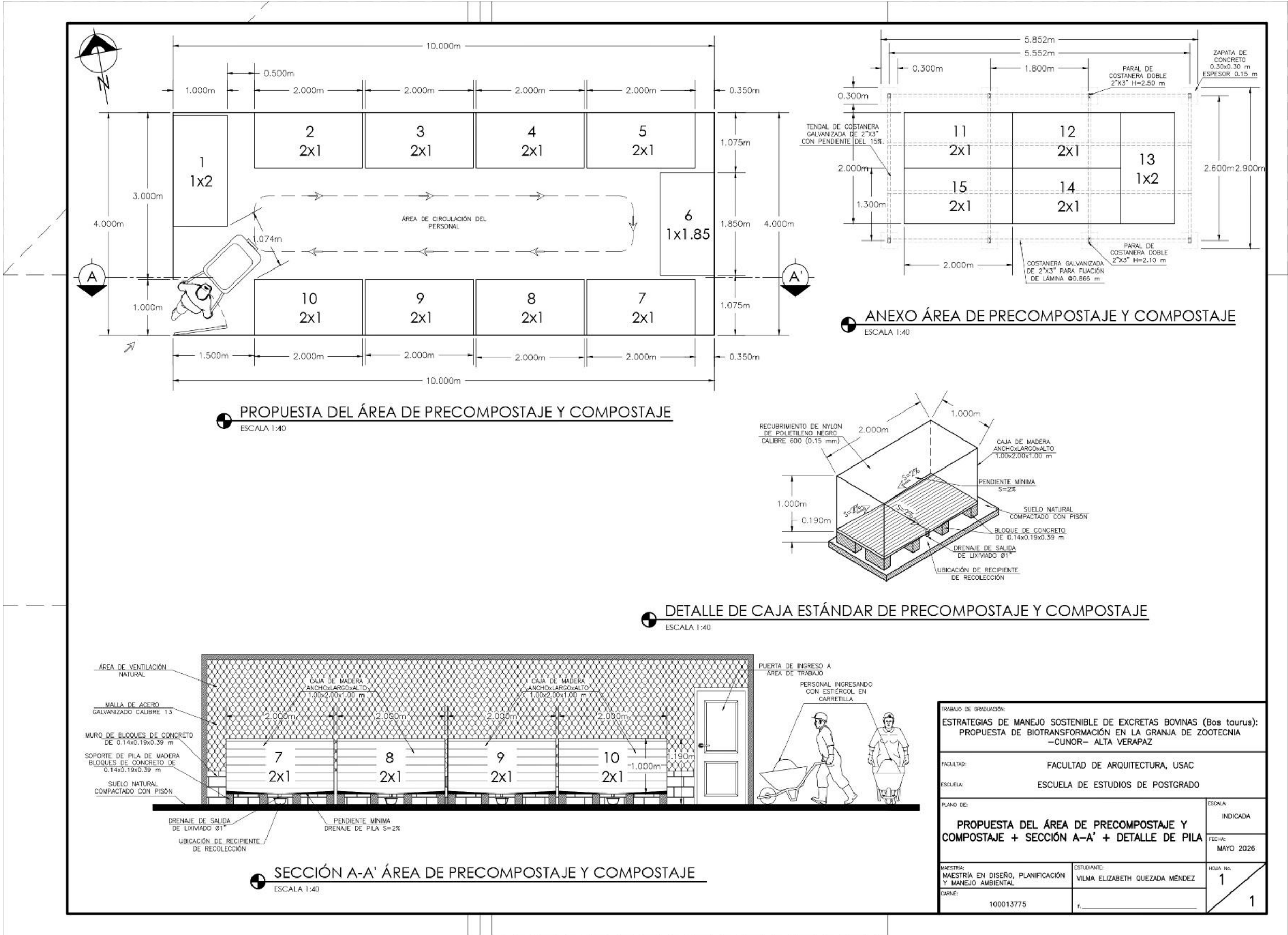
Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 9. Tabla 38. Cronograma de actividades y plan de ejecución de la investigación

Descripción de la actividad	Mayo		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo	
	Semanas																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	12	1	1	1	1	1	1	2	2
Fase de gabinete																				
Realización protocolo																				
Aprobación protocolo																				
Correcciones																				
Protocolo																				
Fase precompostaje																				
Fase experimental																				
Envío al laboratorio de muestras del compost																				
Análisis y discusión de resultados																				
Redacción informe final																				
Petición Prorroga																				
Entrega informe final																				
Solicitud examen privado																				
Correcciones e impresión final del documento																				

Fuente: elaboración propia, 2026

Anexo 10. Figura 31. Planos arquitectónicos, del área de precompostaje y lombricompostaje de la granja de Zootecnia del CUNOR



Fuente: elaboración propia, 2026.

Anexo 11. Figura 32. Registro fotográfico del proceso de precompostaje, compostaje EM y lombricompostaje.

	
<p>Pesaje de excretas bovinas</p>	<p>Costal con excretas bovinas pesadas</p>
	
<p>Costales de excretas bovinas previo al pesaje</p>	<p>Colocación de excretas para precompostaje</p>



Apilando la cama de precompostaje



Distensión de las excretas bovinas



Medición de temperatura del precompostaje



Medición de temperatura precompostaje



Pesaje de 05g de precompostaje previo al análisis de pH y conductividad eléctrica.



Mezcla del precompostaje con la adición de 50 ml de agua destilada



Análisis de pH



Análisis conductividad eléctrica

Fase compostaje incorporación de lombrices y EM



Precompostaje (30 días)



Pesaje de 5 kg



Llenado de cajas experimentales



Prueba de puño, material precompostado



Material pesado y listo para incorporar las lombrices y EM



Distribución de los tratamientos y toma de temperatura



Incorporación de lombrices y EM en la cantidad requerida e indicada en tablas para el efecto de la investigación



112g de lombrices coqueta roja



**Microorganismos eficientes
activados**



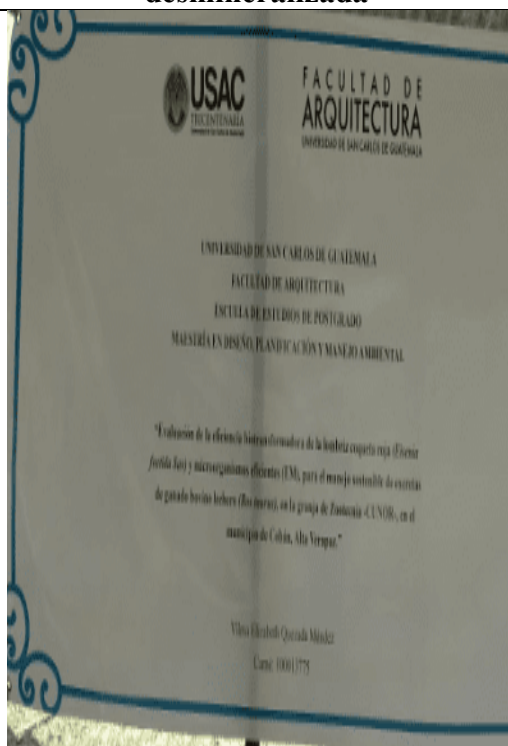
Incorporación de EM



Mezcla de EM y agua desmineralizada



Experimento acondicionado con su respectiva manta de identificación

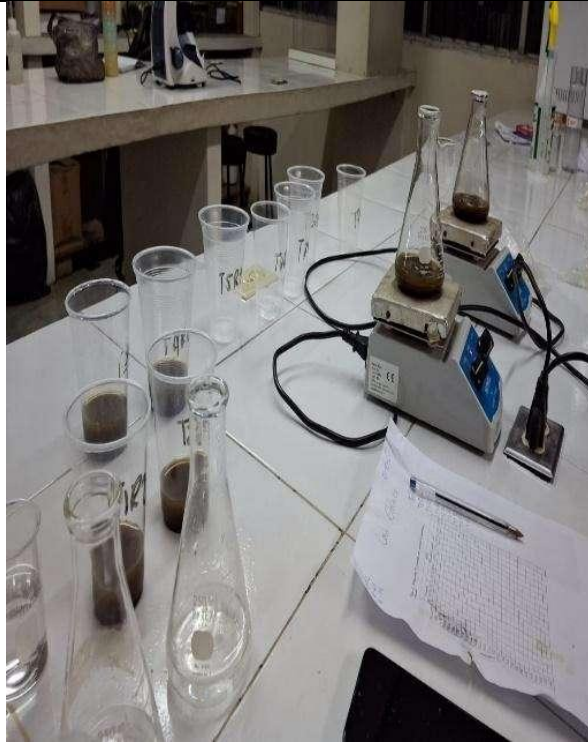




Muestras de 5g de compostaje para realización de análisis de pH y CE



Mezcla de compostaje previo a análisis de pH y CE



Preparación de muestras Para análisis pH y CE



Análisis de pH



Análisis de CE



Lombrices trabajando en T1R1



Midiendo el pH y EC, trabajo de laboratorio.

Anexo 12. Figura 33. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable : pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	27	0.88	0.82	0.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.68	8	0.08	16.26	<0.0001
TRATAMIENTO	0.68	8	0.08	16.26	<0.0001
Error	0.09	18	0.01		
Total	0.77	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.20667

Error: 0.0052 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.			
VI	8.57	3	0.04	A		
IV	8.63	3	0.04	A	B	
II	8.69	3	0.04	A	B	
VIII	8.75	3	0.04	A	B	C
V	8.80	3	0.04		B	C
IX	8.81	3	0.04		B	C
I	8.92	3	0.04		C	D
VII	9.03	3	0.04			D
III	9.05	3	0.04			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 13. Figura 34. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: relación carbono/nitrógeno (C/N)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
C/N	27	1.00	1.00	0.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	61.50	8	7.69	1686.13	<0.0001
TRATAMIENTO	61.50	8	7.69	1686.13	<0.0001
Error	0.08	18	4.6E-03		
Total	61.58	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.19317

Error: 0.0046 gl: 18

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
VI	20.37	3	0.04	A
IV	20.96	3	0.04	B
VIII	21.67	3	0.04	C
IX	22.75	3	0.04	D
II	23.29	3	0.04	E
III	23.40	3	0.04	E
V	24.20	3	0.04	F
I	24.72	3	0.04	G
VII	24.74	3	0.04	G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 14. Figura 35. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable : porcentaje de materia orgánica (MO)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% M.O.	27	0.97	0.95	0.48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	76.43	8	9.55	69.90	<0.0001
tratamiento	76.43	8	9.55	69.90	<0.0001
Error	2.46	18	0.14		
Total	78.89	26			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.05763

Error: 0.1367 gl: 18

tratamiento	Medias	n	E.E.	
VI	73.00	3	0.21	A
III	75.07	3	0.21	B
IV	76.97	3	0.21	C
VII	77.00	3	0.21	C
IX	77.00	3	0.21	C
I	77.00	3	0.21	C
II	78.00	3	0.21	C D
V	78.07	3	0.21	D
VIII	79.00	3	0.21	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 15. Figura 36. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: Porcentaje de Nitrógeno

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N	27	0.98	0.97	1.02

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.36	8	0.04	122.52	<0.0001
tratamiento	0.36	8	0.04	122.52	<0.0001
Error	0.01	18	3.6E-04		
Total	0.36	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.05450

Error: 0.0004 gl: 18

tratamiento	Medias	n	E.E.	
I	1.73	3	0.01	A
VII	1.73	3	0.01	A
III	1.78	3	0.01	A B
V	1.79	3	0.01	B
II	1.86	3	0.01	C
IX	1.88	3	0.01	C
VI	1.99	3	0.01	D
VIII	2.02	3	0.01	D
IV	2.04	3	0.01	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 16 Figura 37. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: porcentaje de fósforo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P205	27	0.68	0.53	3.22

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.04	8	4.4E-03	4.67	0.0032
tratamiento	0.04	8	4.4E-03	4.67	0.0032
Error	0.02	18	9.5E-04		
Total	0.05	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.08826

Error: 0.0010 gl: 18

tratamiento	Medias	n	E.E.	
VIII	0.89	3	0.02	A
VII	0.91	3	0.02	A B
II	0.95	3	0.02	A B C
VI	0.96	3	0.02	A B C
I	0.97	3	0.02	A B C
V	0.97	3	0.02	A B C
IX	0.98	3	0.02	B C
IV	0.98	3	0.02	B C
III	1.01	3	0.02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 17. Figura 38. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: porcentaje de potasio

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
K2O	27	0.84	0.77	3.24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.16	8	0.02	11.87	<0.0001
tratamiento	0.16	8	0.02	11.87	<0.0001
Error	0.03	18	1.7E-03		
Total	0.19	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.11628

Error: 0.0017 gl: 18

tratamiento	Medias	n	E.E.	
VII	1.12	3	0.02	A
III	1.14	3	0.02	A
VIII	1.23	3	0.02	A B
V	1.25	3	0.02	B C
IV	1.29	3	0.02	B C
II	1.29	3	0.02	B C
IX	1.30	3	0.02	B C
I	1.34	3	0.02	B C
VI	1.35	3	0.02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 18. Figura 39. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: porcentaje de CaO

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CaO	27	0.63	0.47	4.44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.36	8	0.04	3.87	0.0082
tratamiento	0.36	8	0.04	3.87	0.0082
Error	0.21	18	0.01		
Total	0.56	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.30680

Error: 0.0115 gl: 18

tratamiento	Medias	n	E.E.
VII	2.14	3	0.06 A
VI	2.34	3	0.06 A B
VIII	2.39	3	0.06 A B
II	2.41	3	0.06 A B
I	2.43	3	0.06 A B
IX	2.46	3	0.06 B
V	2.47	3	0.06 B
IV	2.49	3	0.06 B
III	2.58	3	0.06 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 19. Figura 40. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: porcentaje de MgO

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
MgO	27	0.97	0.95	1.77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.36	8	0.04	66.75	<0.0001
tratamiento	0.36	8	0.04	66.75	<0.0001
Error	0.01	18	6.7E-04		
Total	0.37	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.07407

Error: 0.0007 gl: 18

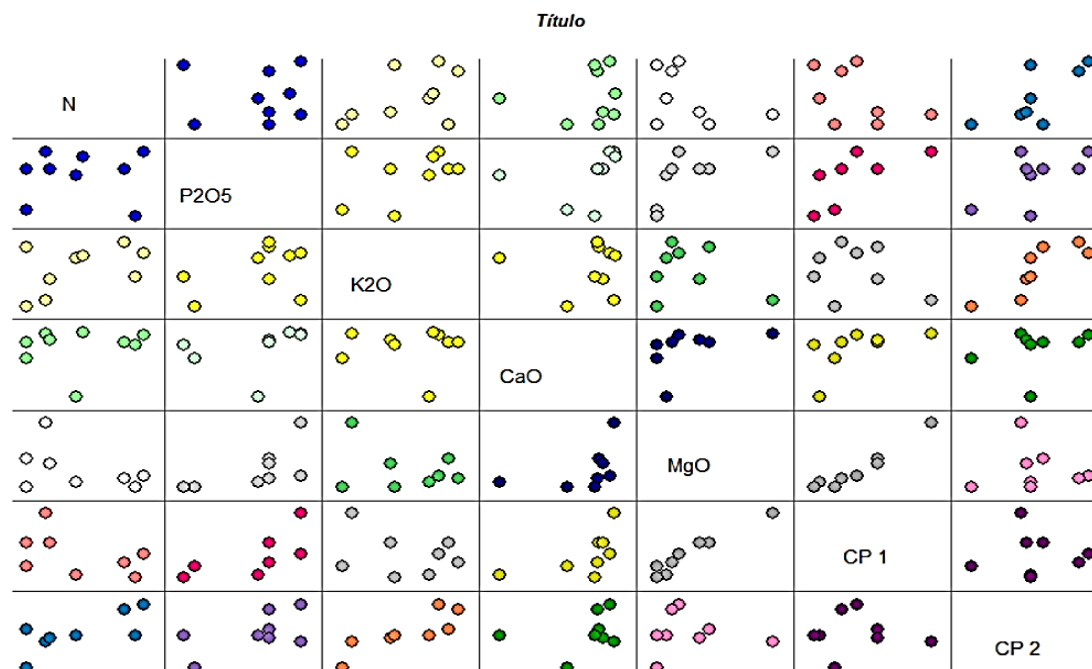
tratamiento Medias n E.E.

VIII	1.35	3	0.01	A	
VII	1.37	3	0.01	A	B
II	1.40	3	0.01	A	B
IX	1.41	3	0.01	A	B
VI	1.42	3	0.01	A	B
IV	1.44	3	0.01	B	C
V	1.51	3	0.01		C D
I	1.54	3	0.01		D
III	1.75	3	0.01		E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 20.Figura 41. Matriz de gráficos de dispersión para la relación de nutrientes e integración de componentes principales en los tratamientos de lombricompostaje (*Eisenia foetida* Sav), y compostaje (EM).



Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 21. Figura 42. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: pH fase de campo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	270.64	0.42	1.47	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.51	100.05	2.87	0.0292	
Bloques	0.02	20.01	0.62	0.5528	
Tratamiento	0.49	80.06	3.44	0.0170	
Error	0.29	160.02			
Total	0.80	260			

La tabla está mostrando los tratamientos según el resultado en orden descendente

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.38848

Error: 0.0179 gl: 16

Tratamiento	Medias	n	E.E.
-------------	--------	---	------

T3	9.32	30.08	A
T1	9.28	30.08	A B
T7	9.19	30.08	A B
T9	9.18	30.08	A B
T8	9.11	30.08	A B
T2	9.09	30.08	A B
T5	9.02	30.08	A B
T6	8.93	30.08	B
T4	8.92	30.08	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 22. Figura 43. Análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey para las variables fisicoquímicas y nutricionales del lombricompost y compost (EM).

Variable: conductividad eléctrica (CE) fase de campo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Conductividad Eléctrica	270.37	0.0018	62	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.0710	0.010	94	0.5227	
Bloques	0.01	22.7E-03	0.34	0.7180	
Tratamiento	0.07	8	0.011	0.09	0.4157
Error	0.1316	0.01			
Total	0.2026				

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.25842

Error: 0.0079 gl: 16

Tratamiento Medias n E.E.

T5	0.58	30.05A
T7	0.52	30.05A
T6	0.49	30.05A
T9	0.49	30.05A
T3	0.47	30.05A
T2	0.46	30.05A
T1	0.46	30.05A
T8	0.45	30.05A
T4	0.38	30.05A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 23 Figura 44. Análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey para las mermas del sustrato al cierre de la investigación.

Variable N R² R² Aj CV
Mermas 270.99 0.984 0.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	128137.5610	12813.7611	6.28	<0.0001	
Bloques	244.22	2	122.11	1.11	0.3542
Tratamiento	127893.33	8159	86.6714	5.08	<0.0001
Error	1763.1116	110.19			
Total	129900.6726				

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=30.49118

Error: 110.1944 gl: 16

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
T3	297.00	36.06	A
T9	291.67	36.06	A
T7	285.00	36.06	A
T5	282.33	36.06	A
T1	276.00	36.06	A
T8	158.00	36.06	B
T6	152.00	36.06	B
T4	149.00	36.06	B
T2	136.00	36.06	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 24 Figura 45. Análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey para la biomasa ganada de lombriz coqueta roja (*Eisenia foetida* Sav), durante la fase experimental.

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Biomasa Ganada	150.98	0.96	5.09		

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	658.93	61	109.82	52.30	<0.0001
Bloque	366.53	21	183.27	87.27	<0.0001
Tratamiento	292.40	4	73.10	34.81	<0.0001
Error	16.80	8	2.10		
Total	675.73	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.08772

Error: 2.1000 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T1	35.00	30.84	A
T5	31.67	30.84	A B
T7	28.00	30.84	B C
T3	24.67	30.84	C D
T9	23.00	30.84	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, 2026. Basado en salidas del Software estadístico (InfoStat)

Anexo 25. Matriz de cálculo de la propuesta ambiental sostenible para la granja de la carrera de Zootecnia del Centro Universitario del Norte (CUNOR), Alta Verapaz.

1. Datos de partida

Producción diaria de excreta bovina:

$$M_d = 94 \text{ kg/día}$$

Densidad de excreta bovina (obtenido en laboratorio):

$$\rho_{excretas} = 0.31 \text{ g/ml}$$

Conversión a unidades estándar (kg/m^3)

Se ha establecido que:

$$1 \text{ g/ml} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Entonces:

$$0.31 \times 1000 = 310 \text{ kg/m}^3$$

Por tanto:

$$\rho_{excretas} = 310 \text{ kg/m}^3$$

Comprobación:

$$0.31 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 310 \text{ kg/m}^3$$

Tiempos del proceso

Precompostaje: 30 días

Compostaje: 45 días

Tiempo total del proceso:

$$30 + 45 = 75 \text{ días}$$

Esto significa que cada proceso ocupa espacio durante 75 días completos.

Merma experimental observada

Durante el precompostaje se ha medido una pérdida de humedad equivalente al: 10%

Esto significa que el volumen que pasa a compostaje es:

90% del volumen inicial

1. Volumen de estiércol generado por día

Se usarán:

$$V_d = \frac{M_d}{\rho} = \frac{94 \text{ kg/día}}{310 \text{ kg/m}^3} = 0.3032 \text{ m}^3/\text{día}$$

Entonces diariamente se generan:

$$V_d = 0.303 \text{ m}^3$$

2. Volumen requerido en etapa de precompostaje (30 días)

En esta etapa aún no se ha producido la merma, por lo que el volumen acumulado es:

$$V_{precompostaje} = V_d \times 30$$

$$V_{precompostaje} = V_d \times 30$$

$$V_{pre} = 9.10 \text{ m}^3$$

3. Aplicación de merma del 10%

Al finalizar el precompostaje, el volumen se reduce por pérdida de humedad:

$$V_{post-merma} = V_{pre} \times (1 - 0.10)$$

$$V_{post-merma} = 9.10 \times 0.90$$

$$V_{post-merma} = 8.19 \text{ m}^3$$

Ese es el volumen efectivo que entra a la etapa de compostaje.

4. Volumen requerido en etapa de compostaje (45 días)

Primero se calculó el volumen diario ya reducido:

$$V_{d,ajustado} = 0.3032 \times 0.90$$

$$V_{d,ajustado} = 0.2729 \text{ m}^3/\text{día}$$

El periodo de evaluación se extenderá por 45 días:

$$V_{comp} = 0.2729 \times 45$$

$$V_{comp} = 12.28 \text{ m}^3$$

5. Volumen total simultáneo requerido

El sistema debe contener simultáneamente:

- Material en precompostaje

- Material en compostaje

Entonces:

$$V_{total} = V_{precompostaje} + V_{comp}$$

$$V_{total} = 9.10 + 12.28$$

$$V_{total} = 21.38 \text{ m}^3$$

Ese es el volumen total que debe poder almacenarse para mantener el flujo continuo.

6. Capacidad de las cajas propuestas

Caja estándar (14 unidades)

Dimensiones: $(1.00 \times 2.00 \times 1.00)m$

Altura efectiva de: 0.75 m

Para 14 cajas:

$$V_{caja\ est\acute{a}ndar} = (1.00 \times 2.00 \times 0.75) \times 14$$

$$V_{caja\ est\acute{a}ndar} = 1.5 \text{ m}^3 \times 14$$

$$V_{caja\ est\acute{a}ndar} = 21.00 \text{ m}^3$$

Caja especial (1 unidad)

Dimensiones: $(1.00 \times 1.85 \times 1.00)m$

Altura efectiva de: 0.75 m

Para 1 caja:

$$V_{caja\ especial} = (1.00 \times 1.85 \times 0.75)$$

$$V_{caja\ especial} = 1.3875 \text{ m}^3$$

Capacidad total disponible

$$V_{disponible} = 21.00 + 1.3875 = 22.3875 \text{ m}^3$$

Aproximadamente:

$$V_{disponible} = 22.39 \text{ m}^3$$

7. Número total de cajas requeridas

Tomando como referencia caja estándar de: $1.5 \text{ m}^3/caja$

Entonces el número requerido de cajas N:

$$N = \frac{21.38}{1.5} = 14.25 \text{ cajas}$$

Como no se pueden construir fracciones de caja, se redondea al entero superior.

$$N = 15 \text{ cajas}$$

8. Comparación capacidad vs necesidad

Necesidad: 21.38 m^3

Disponibile: 22.39 m^3

Superávit: $\text{Disponibile} - \text{Necesidad} = 22.39 - 21.38 = 1.01 \text{ m}^3$

Alcanza con las cajas propuestas, 14 estándar y 1 especial.

Insumos del proceso

A. Cantidad de lombrices coqueta roja adultas

Aplicación: $112 \text{ g por cada } 5 \text{ kg de estiércol precompostado}$

Paso 1. Relación por kilogramo

$$\frac{112}{5} = 22.4 \text{ g/kg}$$

Entonces:

$$22.4 \text{ g de lombriz por cada kg}$$

Paso 2. Cantidad diaria requerida

Producción diaria:

$$94 \text{ kg/día}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} 94 \times 22.4 &= 2105.6 \text{ g} \\ &= 2.11 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

Resultado diario:

$$2.11 \text{ kg de lombriz/día}$$

Paso 3. Por una caja completa

Cada caja estándar: 1.5 m^3

Con densidad: 310 kg/m^3

Capacidad en masa:

$$1.5 \times 310 = 465 \text{ kg}$$

Entonces:

$$465 \times 22.4 = 10416 \text{ g} = 10.42 \text{ kg}$$

Resultado por caja estándar:

$$10.42 \text{ kg de lombriz/caja estándar}$$

Paso 4. Requerimiento mensual

$$2.1056 \times 30 = 63.17 \text{ kg}$$

Resultado mensual

$$63.2 \text{ kg/mes}$$

Paso 5. Requerimiento anual

$$2.1056 \times 365 = 768.5 \text{ kg}$$

Resultado anual

$$768.5 \text{ kg/año}$$

B. Microorganismos eficientes activados (MEA)

Aplicación: 25 cc por cada 5 kg

Paso 1. Relación por kilogramo

$$\frac{25}{5} = 5 \text{ cc/kg}$$

Paso 2. Cantidad diaria

$$94 \times 5 = 470 \text{ cc} = 0.47 \text{ L}$$

Resultado diario

$$470 \text{ cc/día}$$

Paso 3. Por caja estándar

$$465 \times 5 = 2325 \text{ cc} = 2.33 \text{ L}$$

Resultado por caja estándar

$$2.33 \text{ L/caja}$$

Paso 4. Requerimiento mensual

$$470 \times 30 = 14100 \text{ cc} = 14.1 \text{ L}$$

Resultado mensual

$$14.1 \text{ L/mes}$$

Paso 5. Requerimiento anual

$$470 \times 365 = 171550 \text{ cc} = 171.6 \text{ L}$$

Resultado anual

$$171.6 \text{ L/año}$$

Cálculo de materiales para la fabricación de una caja estándar

Dimensiones constructivas de cada caja estándar

$$1.00 \times 2.00 \times 1.00 \text{ m}$$

Altura efectiva de llenado: 0.75 m

A. Madera estructural

Se recomienda la utilización de pino tratado a presión, adecuado ya que tendrá nylon de polietileno de protección en la parte interior.

Dimensiones sugeridas de madera

- Postes estructurales de 2"x2" o si se consiguen 3"x3"

Tablones laterales

- 1"x6"

B. Cálculo de pie tablar

1. Postes verticales

$$4 \text{ esquinas: } 4 \times 1.0 = 4.00 \text{ m}$$

Agregar refuerzos centrales (recomendado):

$$2 \text{ adicionales: } 2 \times 1.00 = 2.00 \text{ m}$$

$$\text{Total: } 6.00 \text{ m}$$

2. Marcos horizontales superiores e inferiores

$$\text{Perímetro: } 2 + 2 + 1 + 1 = 6 \text{ m}$$

$$\text{Dos niveles: } 6 \times 2 = 12 \text{ m}$$

3. Revestimiento lateral

$$\text{Área lateral total: } (2 \times 2 \times 1) + (2 \times 1 \times 1) = 4 + 2 = 6 \text{ m}^2$$

Con tablón de 6”:

Ancho útil: 0.1524 m

Metros lineales requeridos:

$$\frac{6}{0.1524} = 39.4 \text{ m}$$

4. Refuerzos adicionales

Cruces, diagonales, rigidización: *entre 5 – 8 m*

Se seleccionó una longitud de: 6 m

Total de madera lineal

$$6 + 12 + 39.4 + 6 = 63.4 \text{ m}$$

Conversión a pie tablar

Dependiendo de la sección real:

$$\frac{\text{Espesor(plg)} \times \text{Ancho(plg)} \times \text{Largo(pies)}}{12} = \text{Pie tablar (PT)}$$

Se asume una estimación práctica: 60 a 65 *pies tableres/caja estándar*

Se recomienda presupuestar el valor crítico: 65 *pie tablares/caja estándar*

C. Nylon polietileno negro calibre 600

Se impermeabilizará el fondo y las cuatro paredes internas.

Área interna

$$\text{Fondo: } 1.00 \times 2.00 = 2.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Laterales largos: } 2(2.00 \times 1.00) = 4.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Laterales cortos: } 2(1.00 \times 1.00) = 2.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Total: } 8.00 \text{ m}^2$$

Traslapes y dobleces (20%)

$$8.00 \text{ m}^2 \times 1.20 = 9.60 \text{ m}^2$$

$$\text{Requerimiento: } 10.00 \text{ m}^2$$

D. Bloques de concreto (0.14x0.19x0.39 m)

Mantener: 8 *bloques/caja estándar*

E. PVC drenaje lixiviado

Con pendiente interna del 2%.

Recomendación: PVC Ø 1"

Longitud: 0.15 *m/caja estándar*

Incluye salida exterior

F. Cedazo fino

Protección de salida en drenaje: 15 × 15 *cm* (unidad cuadrada)

G. Recipiente plástico para recolectar lixiviado

Recomendado: 20 – 25 *Litros* (1 *unidad/caja estándar*)

H. Clavos

Clavo 3" para estructura: 1.5 *lb/caja estándar*

Clavo 2" para tablones y nylon: 1 *lb/caja estándar*

Grapas para fijar nylon (recomendado) 1/2 *caja de grapas/caja estándar*

I. Herramientas necesarias

Proyecto completo:

- 1 pisón manual
- 2 martillos
- 1 taladro eléctrico
- 1 serrucho o sierra circular
- 1 cinta métrica
- 1 nivel
- 2 palas
- 2 carretillas
- 1 escalera pequeña

Mano de obra

Personal recomendado

- 1 carpintero (responsable de armado y cortes)
- 2 ayudantes de carpintería

Tiempo estimado de montaje

Para 15 cajas: 10 días laborales

Resumen ejecutivo

Tabla 39. Insumos biológicos

Concepto	Por caja estándar	Mensual	Anual
Lombriz coqueta roja	10.42 kg	63.2 kg	768.5 kg
Microorganismos eficientes activados	2.33 L	14.1 L	171.6 L

Tabla 40. Materiales por caja estándar

Material	Cantidad
Madera tratada	65 pies tablares
Nylon polietileno calibre 600	10 m ²
Bloques de concreto	8 unidades
Tubo PVC 1"	0.15 m
Cedazo fino	0.06 m ²
Recipiente plástico para lixiviados	1 unidad
Clavo 3"	1.5 lb
Clavo 2"	1 lb
Grapas para nylon	1/2 caja

Tabla 41. Materiales para 15 cajas estándar

Material	Cantidad
Madera tratada	975 pies tablares
Nylon polietileno calibre 600	150 m ²
Bloques de concreto	120 unidades
Tubo PVC 1"	1 tubo de 6 m
Cedazo fino	1 m ²
Recipiente plástico para lixiviados	15 unidades
Clavo 3"	22.5 lb
Clavo 2"	15 lb
Grapas para nylon	7 ½ cajas

Presupuesto cajas de compostaje

1. Materiales y herramientas

A. Madera tratada

Cantidad total: 975 *pies tablares*

Precio promedio en Guatemala 2026 (pino tratado)

Q. 16.00 – Q. 20.00/pie tablar

Se tomará un dato conservador: *Q. 18.00/pie tablar*

Costo:

$$975 \times 18 = Q. 17,550.00$$

B. Nylon polietileno negro calibre 600

Cantidad: 150 m^2

Precio promedio: Q. 9.00 – Q. 12.00/ m^2

Se adoptará un criterio conservador: Q. 10.00/*pie tablar*

Costo:

$$150 \times 10 = Q. 1,500.00$$

C. Bloques de concreto

Cantidad: 120 *bloques de concreto*

Precio promedio: Q. 5.25/*unidad*

Costo:

$$120 \times 5.25 = Q. 630.00$$

D. Tubo PVC 1"

Cantidad: 6.00 metros

Un tubo de 6m suele costar entre: Q. 55.00 – Q. 70.00

Se estableció un valor referencia: Q. 60.00/*tubo*

Costo:

$$1 \text{ tubo} \times Q. 60.00 = Q. 60.00$$

E. Cedazo fino

Cantidad: 1.00 m^2

Costo: Q. 50.00

F. Recipientes plásticos para lixiviado

Cantidad: 15

Recipiente de 5 – 10 L:

Precio promedio: Q. 20.00 – Q. 25.00/*unidad*

Se estableció el valor referencia: Q. 25.00/*unidad*

Costo:

$$Q. 25.00 \times 15 = Q. 375.00$$

G. Clavos de 3"

Cantidad: 22.5 *Libras*

Precio promedio: Q. 7.50/*Libra*

Costo:

$$22.5 \times Q. 7.50 = Q. 168.75$$

H. Clavos de 2"

Cantidad: 15 *Libras*

Precio promedio: Q. 7.50/*Libra*

Costo:

$$15 \times Q. 7.50 = Q. 112.50$$

I. Grapas para nylon

Cantidad: 7 1/2 *cajas*

Precio promedio: Q. 20.00/*Caja*

Costo:

$$7.5 \times Q. 20.00 = Q. 150.00$$

J. Herramientas menores (provisión)

Pisón, martillo, brocas, hojas de sierra:

Presupuesto:

$$Q. 500.00$$

Subtotal materiales

$$\sum = A + B + C + D + E + F + G + H + I + J$$

$$Q. (17,550 + 1,500 + 630 + 60 + 50 + 375 + 168.75 + 112.50 + 150 + 500)$$

$$\sum = Q. 21,096.25$$

2. Mano de obra

Considerando salario mínimo legal en Guatemala

A. Carpintero (1)

Mano de obra calificada, salario superior al mínimo.

$$Q. 200.00/\text{día}$$

Cantidad de días: 10

Costo:

$$Q.200.00 \times 10 = Q.2,000.00$$

B. Ayudantes de carpintería (2)

Salario mínimo de referencia para Circunscripción Económica 2 (fuera del departamento de Guatemala): $Q.125.59/\text{día} + \text{bonificación proporcional}$

Considerando un valor de: $Q.135.00/\text{día}$

Cada uno percibe: $Q.135.00 \times 10 = Q.1,350.00$

Costo total:

$$Q.1,350.00 \times 2 \text{ ayudantes} = Q.2,700.00$$

Subtotal mano de obra

$$\sum = A + B$$

$$\sum = Q.2,000.00 + Q.2,700.00$$

$$\sum = Q.4,700.00$$

3. Subtotal del proyecto

$$\sum = \text{MATERIALES Y HERRAMIENTAS} + \text{MANO DE OBRA}$$

$$\sum = Q.21,096.25 + Q.4,700.00$$

$$\sum = Q.25,796.25$$

4. Imprevistos recomendados (10%)

$$Q.25,796.25 \times 0.10 = Q.2,579.63$$

5. Presupuesto final recomendado

$$Q.25,796.25 + Q.2,579.63 = Q.28,375.88$$

Redondeando:

$$Q.28,050.00$$

Tabla 42 resumen

Descripción	Costo estimado
Madera tratada	Q.17,550.00
Nylon polietileno calibre 600	Q.1,500.00
Bloque de concreto 0.14x.019x0.39 m	Q.630.00
Tubo PVC 1"	Q.60.00
Cedazo	Q.50.00
Recipientes plásticos	Q.375.00
Clavos y grapas	Q.431.25
Herramientas menores	Q.500.00
Mano de obra	Q.4,700.00
Subtotal	Q.25,796.25
Imprevistos (10%)	Q.2,579.63
Total cajas de compostaje	Q.28,375.88

Presupuesto área techada anexa

Debido a que la infraestructura existente únicamente permite albergar 10 cajas de compostaje, se requiere construir una estructura techada complementaria para proteger las 5 cajas restantes del ingreso directo de lluvia y exceso de radiación solar, garantizando condiciones adecuadas para el proceso de precompostaje y compostaje.

1. Dimensiones del área techada

Dimensiones definidas: $5.55 \times 2.60 \text{ m}$

Área total:

$$A = 5.55 \times 2.60$$

$$A = 14.43 \text{ m}^2$$

Pendiente del techo: 15%

Altura de postes altos: 2.50 m

Altura de postes bajos: 2.10 m

Diferencia: 0.40 m

2. Cálculo de materiales

A. Costanera galvanizada 2"x3" (6m)

Se utilizarán costaneras dobles para cada poste.

a) Postes verticales

$$4 \text{ postes altos } 4 \times 2 \times 2.50 = 20.00 \text{ m}$$

$$4 \text{ postes bajos } 4 \times 2 \times 2.10 = 16.80 \text{ m}$$

Longitud total de los postes $20.00 + 16.80 = 36.80 \text{ m}$

b) Tendales

4 tendales $2.60 \times 4 = 10.40 \text{ m}$

c) Costanera para fijación de lámina

4 costaneras $5.55 \times 4 = 22.20 \text{ m}$

Longitud total requerida: $36.80 + 10.40 + 22.20 = 69.40 \text{ m}$

Número de costaneras de 6 m

$$\frac{69.40}{6} = 11.57 \text{ unidades}$$

Se redondea a: 12 *unidades*

Costo: $12 \times Q.155.00 = Q.1,860.00$

B. Lámina galvanizada calibre 28

Área base: 14.43 m^2

Con traslapes laterales y longitudinales: +15%

Cada lámina de 9 pies x ancho de 1.08 m.

Área útil: 2.74 m^2

Número de láminas requeridas

$$\frac{5.55}{1.00} = 6 \text{ láminas}$$

Costo: $6 \times Q.100.00 = Q.600.00$

C. Cemento UGC

Para 8 zapatas de $0.30 \times 0.30 \times 0.15 \text{ m}$

Volumen: $0.30 \times 0.30 \times 0.15 \times 8 = 0.108 \text{ m}^3$

8 pedestales de $0.15 \times 0.15 \times 0.45 \text{ m}$

Volumen: $0.15 \times 0.15 \times 0.45 \times 8 = 0.081 \text{ m}^3$

Volumen total $0.108 + 0.081 = 0.189 = 0.19 \text{ m}^3$

Rendimiento: 1 saco alcanza para 0.10 m^3

Cantidad: 2 sacos de cemento.

Costo: $2 \times Q.85.00 = Q.170.00$

D. Arena + piedrín

Para concreto simple.

Cantidad: 0.25 m³ de cada uno

Costo estimado combinado: Q.125.00

E. Tornillo Polser 2"

Fijación de lámina

Cantidad estimada: entre 50 y 70 unidades

Costo por bolsa Q. 75.00

F. Pintura anticorrosiva

Aplicación sobre soldaduras, cortes y uniones expuestas.

Cantidad: ½ galón

Costo: Q. 120.00

G. Electrodo 6013

Para soldadura de toda la estructura.

Cantidad 8 lb

Costo: Q. 120.00

H. Platinas y hierro de refuerzo

Para placas base, anclajes y rigidización.

Costo global: Q. 250.00

3. Subtotal materiales techado

Tabla No. 43 subtotal del techado

Material	Costo
Costanera galvanizada 2"x3"	Q.1,860.00
Lámina galvanizada 9 pies	Q.600.00
Cemento UGC	Q.170.00
Arena + piedrín	Q.125.00
Tornillo polser	Q.75.00
Pintura anticorrosiva	Q.120.00
Electrodos	Q.120.00
Platinas y refuerzos	Q.250.00
Subtotal materiales	Q.3,320.00

4. Mano de obra detallada

Fase 1. Albañilería (2 días)

Se necesitará realizar actividades de trazo, ubicación de 8 puntos de apoyo, excavación de zapatas, nivelación, fundición de concreto y colocación de anclajes metálicos.

Personal

1 Albañil

$$Q. 200.00/día$$

$$200 \times 2 = Q. 400.00$$

Ayudante

$$Q. 135.00/día$$

$$135 \times 2 = Q. 270.00$$

Subtotal albañilería

$$Q. 670.00$$

Fase 1. Herrería y techado (2 días)

Se realizarán actividades de corte de costaneras, armado de estructura, soldadura de postes y tendales, aplicación de pintura anticorrosiva, colocación de lámina y fijación de láminas con tornillos polser.

Personal

1 Herrero soldador

$$Q. 250.00/día$$

$$250 \times 2 = Q. 500.00$$

Ayudante

$$Q. 135.00/día$$

$$135 \times 2 = Q. 270.00$$

Subtotal herrería

$$Q. 770.00$$

5. Total mano de obra

$$Q. 670.00 + Q. 770.00 = Q. 1,440.00$$

6. Imprevistos

Se recomienda utilizar en este caso un 5% derivado a que es una actividad más controlada (pequeño techado).

$$(Q. 3,320.00 + Q. 1,440.00) \times 0.05 = Q. 238.00$$

7. Presupuesto final área Techada

Tabla No. 44 Presupuesto final área techada

Descripción	Total
Materiales	Q.3,320.00
Mano de obra	Q.1,440.00
Imprevisto	Q.238.00
Total área techada	Q.4,998.00

Tabla No.45 Presupuesto total del proyecto

Descripción	Total
Construcción de cajas de compostaje	Q.28,375.88
Área techada	Q.4,998.00
Subtotal	Q.33,373.88
Imprevistos generales adicionales (5%)	Q.1,668.69
Total del proyecto	Q.35,042.57
Presupuesto final recomendado	Q.35,100.00

Costo del proyecto por caja estándar

$$Q. 35,100.00 / 15 = Q. 2,340.00 / \text{caja estándar}$$

Anexo 26. Tabla 46. Resumen de diseño del sistema de compostaje de excretas bovinas

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Generación diaria de excretas bovinas	kg/día	94.0	Producción promedio diaria
Densidad de las excretas bovinas	kg/m ³	310	Equivalente a 0.31 g/mL
Volumen generado diariamente	m ³ /día	0.303	Calculado a partir de masa y densidad
Tiempo de precompostaje	días	30	Primera fase del proceso
Tiempo de compostaje	días	45	Segunda fase del proceso
Tiempo total del proceso	días	75	Tiempo total
Merma por pérdida de humedad	%	10	Observada experimentalmente en precompostaje
Volumen simultáneo en precompostaje	m ³	9.10	Material acumulado durante 30 días
Volumen simultáneo en compostaje	m ³	12.28	Considerando la merma del 10%
Volumen total requerido del sistema	m ³	21.38	Capacidad mínima requerida
Capacidad útil por caja estándar	m ³	1.50	Altura efectiva de 0.75m
Número de cajas requeridas	Caja estándar	15	Redondeado al entero superior
Número de cajas en infraestructura actual	Caja estándar	10	Infraestructura actual (área de compostaje)
Número de cajas adicionales requeridas	Caja estándar	5	Requieren nueva infraestructura (Anexo área techada)
Capacidad total instalada	m ³	22.39	14 cajas estándar + 1 caja especial
Holgura operativa del sistema	m ³	1.01	Capacidad instalada - requerida

Fuente: elaboración propia, 2026.

Tabla 47. Resumen de cajas estándar de compostaje

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Dimensiones constructivas por caja	m	1.00 x 2.00 x 1.00	Dimensiones interiores
Altura efectiva de operación	m	0.75	Altura máxima de llenado
Volumen geométrico total	m ³	2.00	Volumen constructivo
Volumen útil de operación	m ³	1.50	Considerando 0.75 m de llenado
Material estructural	-	Madera tratada	Preferiblemente ciprés o pino tratado
Impermeabilización	-	Polietileno negro cal. 600	Protección interna
Soporte estructural	unidades	8 bloques/pila	Evita contacto con el suelo
Drenaje	-	PVC de 1"	Con salida de lixiviados
Pendiente interna	%	2	Favorece el drenaje
Protección del drenaje	-	Cedazo fino	Retención de sólidos
Recolección de lixiviados	unidades	1 recipiente/pila	Captación individual

Fuente: elaboración propia, 2026.

Tabla 48. Resumen de insumos biológicos

Parámetro	Unidad	Por caja	Mensual	Anual
Lombriz coqueta roja	kg	10.42	63.2	768.5
Microorganismos eficientes activados (MEA)	L	2.33	14.1	171.6

Fuente: elaboración propia, 2026.

Tabla 49. Resumen de infraestructura complementaria

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Pilas bajo infraestructura existente	pilas	10	Capacidad actual
Pilas bajo nueva cubierta	pilas	5	Infraestructura propuesta
Dimensiones del área techada	m	5.55 × 2.60	Dimensiones reales
Área techada	m ²	14.43	Cobertura para 5 pilas
Postes altos	unidades	4	Altura de 2.50 m
Postes bajos	unidades	4	Altura de 2.10 m
Tipo de poste	—	Costanera doble 2"×3"	Estructura metálica
Tipo de cubierta	—	Lámina galvanizada cal. 28	Longitud de 10 pies
Ancho útil de lámina	m	1.00	Cobertura efectiva
Pendiente estructural real	%	15.4	Derivada de alturas de postes
Número de zapatas	unidades	8	Anclaje estructural

Fuente: elaboración propia, 2026.

Tabla 50. Resumen ejecutivo del sistema propuesto

Concepto	Valor
Producción de estiércol tratada	94 kg/día
Tiempo total de tratamiento	75 días
Capacidad requerida	21.38 m ³
Capacidad instalada propuesta	22.39 m ³
Número total de cajas requeridas	15
Cajas necesarias en infraestructura existente	10
Cajas necesarias en infraestructura nueva	5
Factor de seguridad volumétrico	4.51 %

Fuente: elaboración propia, 2026.

El sistema propuesto presenta una capacidad instalada de 22.39 m³, superior al volumen requerido de 21.38 m³, lo cual proporciona un margen operativo aproximado del 4.51 %, lo cual permite absorber pequeñas variaciones en la generación de excretas o en la eficiencia del proceso de compostaje.

Rosa Amelia González Domínguez
Licenciada en Letras
Correos electrónicos:
rosgon06@yahoo.es
rosamelia4669@gmail.com
Teléfono: 56961166



Guatemala, 6 de octubre de 2026

Arquitecto
Sergio Francisco Castillo Bonini
Decano de la Facultad de Arquitectura
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Decano:

Atentamente, hago de su conocimiento que he realizado la revisión de estilo del proyecto de graduación: **Evaluación de la eficiencia biotransformadora de la lombriz coqueta roja (Eisenia foetida Sav) y microorganismos eficientes (EM), para el manejo sostenible de excretas de ganado bovino lechero (Bos taurus L), en la granja de Zootecnia del CUNOR, en el municipio de Cobán, Alta Verapaz** de la estudiante de la Maestría en Ciencias en Diseño, Planificación y Manejo Ambiental: **Vilma Elizabeth Quezada Méndez** de la Facultad de Arquitectura, carné universitario **100013775** previamente a conferírsele el título de **Maestra en Ciencias en Diseño, Planificación y Manejo Ambiental**.

Luego de las adecuaciones y correcciones que se consideraron pertinentes en el campo lingüístico, considero que el proyecto de graduación que se presenta cumple con la calidad técnica y científica requerida.

Al agradecer la atención que se sirva brindar a la presente, me suscribo respetuosamente.

Rosa Amelia González Domínguez
Licenciada en Letras
Colegiado número 5284

Rosa Amelia González Domínguez
Número de colegiado: 5284

**"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA BIOTRANSFORMADORA DE LA LOMBRIZ
COQUETA ROJA (*Eisenia foetida* Sav) Y MICROORGANISMOS EFICIENTES (EM),
PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE EXCRETAS DE GANADO BOVINO LECHERO
(*Bos taurus* L), EN LA GRANJA DE ZOOTECNIA DEL CUNOR, EN EL MUNICIPIO DE
COBÁN, ALTA VERAPAZ"**

Proyecto de Graduación desarrollado por:



Vilma Elizabeth Quezada Méndez

Asesorado por:



M.Sc. Ing. Agr. Edin Alejandro Gil Esturban



M. Sc. Dafne Adriana Acevedo Quintanilla

Imprímase:

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini
Decano

Ciudad Universitaria, Zona 12, Facultad de Arquitectura, Edificio T2