

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE BIOLIXIVIADOS DEL PROCESO DE
VERMICOMPOSTAJE EN SISTEMA VERTICAL DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS Y ESTIÉRCOL DE BOVINO, EN EL CENTRO
EXPERIMENTAL DE KALLUTACA**

Por:

Cleto Condori Apaza

EL ALTO – BOLIVIA

Agosto, 2016

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN DE BIOLIXIVIADOS DEL PROCESO DE VERMICOMPOSTAJE EN
SISTEMA VERTICAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y ESTIÉRCOL DE BOVINO,
EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE KALLUTACA**

*Tesis de Grado presentado como requisito
para optar el Título de Ingeniero en
Ingeniería Agronómica*

Cleto Condori Apaza

Asesores:

Dr. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza

Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez

Tribunal Revisor:

Dr. Ing. Francisco Mamani Pati

Ing. Laoreano Coronel Quispe

Ing. M.Sc. Cristóbal Riquelme Molina

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador



DEDICATORIA:

A mis amados padres: Teodocio Condori Mamani y Martina Apaza Aruquipa, por el incondicional e inquebrantable apoyo y comprensión, por haberme inculcado buenos valores, ética y moral, por haberme enseñado a luchar por mis ideales y ser una persona de bien.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero y profundo agradecimiento a nuestro padre celestial “Jesucristo” por haberme concedido la vida y guiado siempre por el camino correcto.

Agradecer a la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto, por haberme abierto sus puertas, y permitido formarme como profesional en esta casa superior de estudios.

Un sincero reconocimiento y agradecimiento a la Cooperación Holandesa SNV BOLIVIA – NODO, por haberme financiado y cooperado en la presente tesis de grado.

Mis más sinceros agradecimientos a mis estimados asesores: Dr. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza y al Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez, por el apoyo en la planificación, ejecución, observación, recomendaciones durante la trayectoria de realización de la presente tesis de grado.

Un gran agradecimiento a mis estimados tribunales revisores: Dr. Ing. Francisco Mamani Pati, Ing. Laoreano Coronel Quispe, y al Ing. M.Sc. Cristóbal Riquelme Molina, por sus observaciones, recomendaciones y sugerencias profesionales para la ejecución y redacción de la presente tesis de grado.

A mis compañeras y compañeros del 1er y 2do semestre (gestión I y II-2014) de la carrera de Ingeniería Agronómica, por haberme brindado su apoyo durante la ejecución de la presente tesis de grado; en especial a Yesica Giovana Cari Nina por su colaboración y comprensión.

CONTENIDO

| | |
|------------------------|------|
| ÍNDICE | i |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vii |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | ix |
| ABREVIATURAS | xi |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | xiv |

ÍNDICE

| | |
|---|---|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1.3. Justificación..... | 3 |
| 1.4. Objetivos | 4 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 4 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.5. Hipótesis | 4 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 2.1. Generalidades de los residuos sólidos..... | 5 |
| 2.1.1. Definición | 5 |
| 2.1.2. Clasificación de los residuos sólidos..... | 5 |
| 2.1.3. Residuos sólidos urbanos (RSU) | 6 |
| 2.1.3.1. Residuos sólidos domiciliarios..... | 7 |
| 2.1.3.2. Residuos sólidos orgánicos..... | 7 |
| 2.1.3.3. Producción y composición física de los RSU en Bolivia..... | 8 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.1.3.4. | RSU en la ciudad de El Alto | 10 |
| 2.2. | El estiércol de bovino..... | 10 |
| 2.3. | Generalidades del proceso de vermicompostaje..... | 12 |
| 2.3.1. | La lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>) | 12 |
| 2.3.1.1. | Clasificación taxonómica de la lombriz roja californiana | 12 |
| 2.3.1.2. | Características generales | 13 |
| 2.3.1.3. | Características internas | 13 |
| 2.3.1.4. | Acoplamiento y reproducción | 15 |
| 2.3.1.5. | Ciclo biológico de la lombriz (<i>Eisenia foetida</i>)..... | 15 |
| 2.3.1.6. | Factores que afectan en la reproducción | 16 |
| 2.3.1.7. | Determinación de edades en la población de lombrices | 16 |
| 2.3.2. | El vermicompostaje | 17 |
| 2.3.2.1. | Características del sustrato para el proceso de vermicompostaje..... | 18 |
| 2.3.2.2. | Microorganismos implicados en los procesos de vermicompostaje..... | 21 |
| 2.3.2.3. | Tipo de sistemas de vermicompostaje | 22 |
| 2.3.2.3.1. | Sistemas de vermicompostaje tradicionales o de alimentación discontinua | 22 |
| 2.3.2.3.2. | Sistemas de vermicompostaje de alimentación continua o vertical...23 | |
| 2.3.3. | El vermicompost | 23 |
| 2.3.3.1. | Propiedades químicas del vermicompost | 24 |
| 2.3.4. | El lixiviado del vermicompost | 25 |
| 2.3.4.1. | Propiedades químicas del lixiviado | 26 |
| 3. | MATERIALES Y METODOS | 28 |
| 3.1. | Localización | 28 |
| 3.1.1. | Ubicación geográfica | 28 |
| 3.1.2. | Características edafoclimáticas..... | 28 |
| 3.1.2.1. | Clima | 28 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1.2.2. | Suelo | 29 |
| 3.1.2.3. | Flora | 29 |
| 3.2. | Materiales..... | 29 |
| 3.2.1. | Material de estudio | 29 |
| 3.2.1.1. | Insumos..... | 29 |
| 3.2.1.2. | Material biológico | 29 |
| 3.2.2. | Materiales y equipos de laboratorio | 29 |
| 3.2.3. | Material de escritorio | 30 |
| 3.2.4. | Material de campo | 30 |
| 3.3. | Metodología | 31 |
| 3.3.1. | Procedimiento experimental | 31 |
| 3.3.1.1. | Etapa de pre-compostaje | 31 |
| 3.3.1.2. | Etapa de vermicompostaje | 32 |
| 3.3.1.3. | Toma de muestras para análisis químico | 35 |
| 3.3.2. | Diseño experimental | 35 |
| 3.3.2.1. | Diseño completamente al azar | 35 |
| 3.3.2.2. | Diseño completamente al azar con sub-muestreo..... | 36 |
| 3.3.3. | Interpretación para los resultados | 37 |
| 3.3.4. | Croquis del Experimento | 37 |
| 3.3.5. | Tratamientos en estudio | 38 |
| 3.3.6. | Variables de respuesta | 38 |
| 3.3.6.1. | Variables físicas y químicas | 38 |
| 3.3.6.2. | Variables biológicas | 39 |
| 3.3.6.3. | Biomasa final de las lombrices | 40 |
| 3.3.6.4. | Volumen final de los biolixiviados..... | 40 |
| 3.3.6.5. | Características químicas del biolixiviado | 41 |

| | |
|---|----|
| 3.3.6.6. Análisis económico | 41 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 43 |
| 4.1. Etapa de pre-compostaje..... | 43 |
| 4.1.1. Temperatura | 43 |
| 4.2. Etapa de vermicompostaje | 44 |
| 4.2.1. Evaluación de variables físicas y químicas..... | 44 |
| 4.2.1.1. Temperatura | 44 |
| 4.2.1.2. pH..... | 47 |
| 4.2.1.3. Conductividad eléctrica..... | 50 |
| 4.2.2. Evaluación de variables biológicas | 52 |
| 4.2.2.1. Número de lombrices cliteladas | 52 |
| 4.2.2.2. Número de lombrices sub-cliteladas | 55 |
| 4.2.2.3. Número de lombrices juveniles | 57 |
| 4.2.2.4. Número de cápsulas..... | 60 |
| 4.2.2.5. Número total de lombrices..... | 63 |
| 4.2.2.6. Biomasa de lombrices | 66 |
| 4.2.3. Biomasa final de lombrices..... | 69 |
| 4.2.4. Determinación del volumen final de biolixiviados | 70 |
| 4.2.5. Evaluación de las características químicas del biolixiviado..... | 71 |
| 4.2.5.1. Macroelementos | 72 |
| 4.2.5.1.1. Nitrógeno total | 72 |
| 4.2.5.1.2. Fósforo total..... | 73 |
| 4.2.5.1.3. Potasio..... | 74 |
| 4.2.5.1.4. Calcio..... | 75 |
| 4.2.5.1.5. Magnesio | 76 |
| 4.2.5.2. Microelementos..... | 77 |

| | |
|--|----|
| 4.2.5.2.1. Hierro | 77 |
| 4.2.5.2.2. Cinc..... | 78 |
| 4.2.5.2.3. Cobre..... | 79 |
| 4.2.5.2.4. Manganeso..... | 80 |
| 4.2.5.2.5. Sodio..... | 81 |
| 4.2.5.2.6. Cloro | 82 |
| 4.2.5.2.7. Boro | 83 |
| 4.2.5.3. pH del producto final..... | 84 |
| 4.2.5.4. Conductividad eléctrica del producto final..... | 85 |
| 4.2.5.5. Metales pesados..... | 86 |
| 4.2.6. Análisis económico de los biolixiviados | 87 |
| 4.2.6.1. Beneficio neto | 87 |
| 4.2.6.2. Relación Beneficio/Costo | 88 |
| 5. CONCLUSIONES | 89 |
| 6. RECOMENDACIONES..... | 91 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 92 |
| 8. ANEXOS | 99 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Clasificación de los residuos sólidos por su procedencia y naturaleza..... | 5 |
| Cuadro 2. Composición química de los RSU..... | 7 |
| Cuadro 3. Producción de residuos sólidos por ciudad capital..... | 9 |
| Cuadro 4. Composición física de residuos sólidos por ciudad capital..... | 10 |
| Cuadro 5. Análisis químico del estiércol de bovino..... | 11 |
| Cuadro 6. Nutrientes que contiene el bio bovino..... | 11 |
| Cuadro 7. Análisis de vermicompost, obtenido a partir de estiércol de vacuno..... | 24 |
| Cuadro 8. Composición química del vermicompost de EV y RC..... | 25 |
| Cuadro 9. Características químicas del lixiviado de estiércol de vaca y residuos vegetales..... | 27 |
| Cuadro 10. Características químicas del vermicompost de desechos orgánicos y sus lixiviados..... | 27 |
| Cuadro 11. Análisis de varianza para la temperatura..... | 45 |
| Cuadro 12. Análisis de varianza para el pH..... | 48 |
| Cuadro 13. Análisis de varianza para la conductividad eléctrica..... | 51 |
| Cuadro 14. Análisis de varianza para el número de lombrices cliteladas..... | 53 |
| Cuadro 15. Análisis de varianza para el número de lombrices sub-cliteladas..... | 56 |
| Cuadro 16. Análisis de varianza para el número de lombrices juveniles..... | 58 |
| Cuadro 17. Análisis de varianza para el número de cápsulas..... | 61 |
| Cuadro 18. Análisis de varianza para el número total de lombrices..... | 64 |
| Cuadro 19. Análisis de varianza para la biomasa de lombrices..... | 67 |
| Cuadro 20. Características químicas de los biolixiviados..... | 71 |
| Cuadro 21. Contenido de metales pesados en los biolixiviados..... | 86 |
| Cuadro 22. Ingresos netos y Relación B/C de los tratamientos..... | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Composición de residuos sólidos en Bolivia (MMA y A, 2011) | 9 |
| Figura 2. | Anatomía interna de la lombriz, <i>Eisenia foetida</i> (Kingston, 2011)..... | 14 |
| Figura 3. | Ciclo biológico de la <i>Eisenia foetida</i> (Saavedra, 2007) | 15 |
| Figura 4. | Ubicación del sitio experimental (Google Earth, 2016)..... | 28 |
| Figura 5. | Determinación del volumen de la caja plástica (Elaboración propia)..... | 33 |
| Figura 6. | Croquis de la columna y número de muestras (Elaboración propia)..... | 36 |
| Figura 7. | Croquis del experimento (Elaboración propia)..... | 37 |
| Figura 8. | Comportamiento de la temperatura durante el pre-compostaje | 43 |
| Figura 9. | Comportamiento de la temperatura durante el vermicompostaje..... | 44 |
| Figura 10. | Prueba de Duncan para la temperatura | 46 |
| Figura 11. | Comportamiento del pH..... | 47 |
| Figura 12. | Prueba de Duncan para el pH | 48 |
| Figura 13. | Comportamiento de la conductividad eléctrica | 50 |
| Figura 14. | Prueba de Duncan para la conductividad eléctrica..... | 51 |
| Figura 15. | Evolución del número de lombrices cliteladas | 52 |
| Figura 16. | Prueba de Duncan para el número de lombrices cliteladas | 54 |
| Figura 17. | Evolución del número de lombrices sub-cliteladas | 55 |
| Figura 18. | Prueba de Duncan para el número de lombrices sub-cliteladas | 56 |
| Figura 19. | Evolución del número de lombrices juveniles | 57 |
| Figura 20. | Prueba de Duncan para el número de lombrices juveniles | 59 |
| Figura 21. | Evolución del número de cápsulas..... | 60 |
| Figura 22. | Prueba de Duncan para el número de cápsulas..... | 62 |
| Figura 23. | Evolución del número total de lombrices | 63 |
| Figura 24. | Prueba de Duncan para el número total de lombrices | 65 |
| Figura 25. | Evolución de la biomasa de lombrices | 66 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 26. | Prueba de Duncan para la biomasa de lombrices | 68 |
| Figura 27. | Comparación del peso inicial con el peso final de lombrices | 69 |
| Figura 28. | Promedio del volumen de los biolixiviados (L) | 70 |
| Figura 29. | Contenido de nitrógeno total (mg/L)..... | 72 |
| Figura 30. | Contenido de fósforo total (mg/L)..... | 73 |
| Figura 31. | Contenido de potasio (mg/L) | 74 |
| Figura 32. | Contenido de calcio (mg/L)..... | 75 |
| Figura 33. | Contenido de magnesio (mg/L) | 76 |
| Figura 34. | Contenido de hierro (mg/L)..... | 77 |
| Figura 35. | Contenido de cinc (mg/L)..... | 78 |
| Figura 36. | Contenido de cobre (mg/L)..... | 79 |
| Figura 37. | Contenido de manganeso (mg/L)..... | 80 |
| Figura 38. | Contenido de sodio (mg/L) | 81 |
| Figura 39. | Contenido de cloro (mg/L)..... | 82 |
| Figura 40. | Contenido de boro (mg/L)..... | 83 |
| Figura 41. | pH del producto final..... | 84 |
| Figura 42. | Conductividad eléctrica del producto final..... | 85 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | | |
|-----------|--|-----|
| Anexo 1. | Acopio de RSU | 100 |
| Anexo 2. | Acopio del EB..... | 100 |
| Anexo 3. | Pre-compostaje de los RSU | 100 |
| Anexo 4. | Limpieza de literas del lombricario | 101 |
| Anexo 5. | Impermeabilización de las cajas..... | 101 |
| Anexo 6. | Colocado de mallas milimétricas en las cajas..... | 101 |
| Anexo 7. | Llenado de las cajas con el sustrato | 102 |
| Anexo 8. | Incorporación de bandas de aclimatación..... | 102 |
| Anexo 9. | Inoculación | 102 |
| Anexo 10. | Aireación del sustrato | 103 |
| Anexo 11. | Cosecha de lombrices | 103 |
| Anexo 12. | Cosecha de biolixiviados | 103 |
| Anexo 13. | Toma de muestras para análisis químico | 104 |
| Anexo 14. | Control de la temperatura..... | 104 |
| Anexo 15. | Control del pH y CE | 104 |
| Anexo 16. | Muestreo | 105 |
| Anexo 17. | Clasificación y cuantificación de variables biológicos..... | 105 |
| Anexo 18. | Cápsulas o cocones | 105 |
| Anexo 19. | Lombrices juveniles | 106 |
| Anexo 20. | Biomasa final de lombrices..... | 106 |
| Anexo 21. | Variación de la temperatura en las muestras..... | 106 |
| Anexo 22. | Esquema de la disponibilidad de nutrientes según a la reacción del pH .. | 107 |
| Anexo 23. | Límites máximos de metales pesados permitidos, en abonos sólidos y líquidos (mg/kg)..... | 108 |
| Anexo 24. | Contenido de nutrientes en biolixiviados de RSU y EB | 108 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Anexo 25. | Costos de producción del biolixiviado | 109 |
| Anexo 26. | Análisis químico de biolixiviados de los RSU y EB..... | 111 |
| Anexo 27. | Análisis químico del vermicompost de RSU y EB..... | 115 |

ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| CE | Conductividad Eléctrica |
| cm ³ | Centímetro cubico |
| cmol | Centimol |
| CM | Cuadrados Medios |
| C/N | Relación Carbono Nitrógeno |
| CO | Carbono Orgánico |
| DCA | Diseño Completo al Azar |
| dS | Decisiemens |
| EB | Estiércol de Bovino |
| <i>et al.</i> | Locución latina que significa “y otros” |
| EV | Estiércol de Vacuno |
| FV | Fuentes de Variación |
| GL | Grados Libertad |
| hab | Habitante |
| H _a | Hipótesis alterna |
| HCR | Hoja de Coca Residual |
| H _o | Hipótesis nula |
| L | Litro |
| LCA | Laboratorio de Calidad Ambiental |

| | |
|----------------|---------------------------------|
| m ³ | Metro cúbico |
| mg | Miligramo |
| mL | Mililitro |
| mm | Milímetro |
| MO | Materia Orgánica |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| PPC | Producción per cápita |
| ppm | Partes por millón |
| Pr>F | Probabilidad |
| pH | Potencial de Hidrogeno |
| RC | Restos de Cocina |
| RSU | Residuos Sólidos Urbanos |
| SC | Suma de Cuadrados |
| Trat. ; T | Tratamiento |
| UMSA | Universidad Mayor de San Andrés |
| UTO | Universidad Técnica de Oruro |
| µm | Microsiemens |

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar los biolixiviados del proceso de vermicompostaje en sistema vertical de residuos sólidos urbanos y estiércol de bovino, en el Centro Experimental de Kallutaca de la Universidad Pública de El Alto, Municipio de Laja, La Paz. Las variables químicas se analizaron mediante el Diseño Completamente al Azar compuesta por 5 tratamientos y 3 repeticiones. Las variables físicas y biológicas se analizaron mediante el Diseño Completamente al Azar con Sub-muestreo compuesta por 5 tratamientos, 3 repeticiones y 5 muestras: Los tratamientos evaluados fueron: T1 (RSU 100% : EB 0%), T2 (RSU 75% : EB 25%), T3 (RSU 50% : EB 50%), T4 (RSU 25% : EB 75%) y T5 (RSU 0% : EB 100%). En el T4 y T5 se obtuvo un promedio adecuado de 17.2 °C de temperatura, el pH más apropiado fue el T5 con un promedio de 8.7. En cuanto a las variables biológicas, se observó una mayor evolución de la población de lombrices en el T5 con un promedio de 18 lombrices cliteladas, 1 lombriz sub-clitelada, 66 cápsulas, 12 lombrices juveniles, con un total de 32 lombrices que registraron una biomasa de 14.3 g. También, se comparó la biomasa inicial con la biomasa final y se comprobó que en el T5 se obtuvo una ganancia de 48.3 g de biomasa. Con respecto a las características químicas de los biolixiviados se confirmó que el más alto contenido de macroelementos está en el T2 con 91.12 mg P/L y 8301 mg K/L, T4 con 490 mg N/L y T5 con 343.43 mg Ca/L y 232.40 mg Mg/L, de la misma manera la más alta concentración de microelementos está en el T4 con 0.24 mg Cu/L, 1.14 mg Zn/L y 4301 mg Cl/L y T5 con 4.23 mg Fe/L, 3.80 mg Mn/L, 1080 mg Na/L y 91.22 mg B/L. La concentración de metales pesados en los biolixiviados está por debajo de los umbrales de toxicidad. Finalmente, el análisis económico confirmó que el T1 fue el más rentable por presentar un alto rendimiento en la producción de biolixiviado con un total de 32.13 litros y una relación B/C de 1.83, esto significa que en este tratamiento (T1), se logró recuperar lo invertido y a la vez se obtuvo una ganancia de 0.83 Bs adicionalmente.

ABSTRACT

The objective of the present research work was to evaluate the bioleaching of vermicomposting process in vertical system of municipal solid waste and cattle manure, in the Kallutaca Experimental Center of El Alto Public University, Municipality of Laja, La Paz. The chemical variables were analyzed using the design completely random with five treatments and three repetitions. The physics and biological variables were analyzed using the design completely random sub-sampling with five treatments, three repetitions and five samples. The treatments used in the study were: T1 (RSU 100% : EB 0%), T2 (RSU 75% : EB 25%), T3 (RSU 50% : EB 50%), T4 (RSU 25% : EB 75%) and T5 (RSU 0% : EB 100%). The average temperature obtained in the T4 and T5 was optimum (17.2 °C). The pH value obtained was 8.7 in the T5. As to the biological variables observed in the T5 were larger population change of worms with an average of 18 clitellated worms, 1 sub-clitellated worm, 66 capsules, 12 juvenile worms and 32 total worms with a biomass of 14.3 g. Also, the initial biomass compared with the final biomass and it was verified that in the T5 was obtained a profit of 48.3 g biomass. Regarding the chemical characteristics of the bioleaching was confirmed the larger content of macroelements in the T2 with 91.12 mg P/L and 8301 mg K/L, T4 showed 490 mg N/L and T5 with 343.43 mg Ca/L and 232.40 mg Mg/L. In the same way, the larger content of microelements was in the T4 with 0.24 mg Cu/L, 1.14 mg Zn/L and 4301 mg Cl/L and T5 showed 4.23 mg Fe/L, 3.80 mg Mn/L, 1080 mg Na/L, and 91.22 mg B/L. The concentration of heavy metals in the bioleaching was considered non-toxic. Finally, the economic analysis in the T1 showed the most profitable with a value of 32.13 liters of bioleaching and a relation B/C of 1.83, that means in the (T1), was recovered the invested and at the same time, it got a gain of 0.83 Bs, additionally.

1. INTRODUCCIÓN

En Bolivia, así como también en todo el mundo, el consumo de los recursos naturales está relacionado con el desarrollo económico y el crecimiento poblacional, que conllevan directamente a la generación excesiva de residuos sólidos o “desechos”. Las personas buscan desprenderse de estos desechos rápidamente, debido a que no tienen ningún valor, ocupan espacio, causan malos olores y producen un riesgo de contaminación que amenaza a la salud pública de todo ser vivo.

Es evidente entonces que nuestra sociedad genera residuos sólidos a una velocidad superior a la capacidad de gestionarlos adecuadamente, lo cual obliga al hombre a buscar nuevas alternativas amigables con el medioambiente para su tratamiento.

En tal sentido, se puede observar que en las áreas urbanas, periurbanas y sectores rurales de nuestro país, se generan residuos sólidos que contaminan el hábitat. La mayoría de los municipios no cuentan con un relleno sanitario y depositan su basura en fosas a cielo abierto o vierten directamente a los cuerpos de agua, sin considerar la severa contaminación edáfica, hídrica y atmosférica que pueden causar estos residuos.

Según Zeballos (2013) citado por Carita (2014), indica que de acuerdo al diagnóstico nacional de residuos sólidos en Bolivia, se genera aproximadamente 4780 tn/día de residuos municipales, de los cuales más del 50% son residuos sólidos orgánicos, que pueden ser estabilizados mediante procesos de compostaje y vermicompostaje.

Cabe mencionar que la evolución de Residuo a Recurso, induce a la biotransformación de residuo sólido orgánico en abono orgánico sólido y líquido, que es una alternativa esencial para promover la producción de alimentos agrícolas sanos, apoyar la soberanía alimentaria de nuestro país, preservar el medioambiente y la salud humana.

Con referencia a esta situación Serrano (2004), menciona que la técnica del vermicompostaje, presenta un especial interés desde el punto de vista agrícola y ambiental, pues se puede aprovechar la capacidad de algunas especies de lombrices para reducir el volumen de los residuos sólidos urbanos, asimismo resulta eficiente en la reducción de patógenos y sustancias tóxicas.

Por su parte Moreno y Moral (2008), indican que el proceso de vermicompostaje es utilizado para la biodegradación de residuos orgánicos y se considera como una

ecotecnología limpia, sin impacto ambiental y que a la vez los costos de inversión energéticos y de mantenimiento son moderadamente bajos.

En función a lo mencionado, la fracción fermentable de los RSU puede biodegradarse mediante procesos de vermicompostaje mediados por la acción de las lombrices rojas californianas y paralelamente producir un líquido con potencial fertilizante denominado biolixiviado.

1.1. Antecedentes

Thompson y Troeh (1988), indican que el estiércol contiene valiosos nutrientes (0.5 %N, 0.11 %P y 0.41 % K). Los residuos vegetales; también, contiene micronutrientes como el boro, cloro, cobre, hierro, manganeso y cinc.

Según, Pimentel (2004) citado por Pérez (2015), el líquido de lombriz, es el escurrimiento que se genera al regar las literas de siembra de lombrices; condicionadamente el sustrato debe tener una humedad aproximada del 85% y cuando se aplican los riegos se produce un lixiviado que contiene sólidos y nutrientes.

Sainz (1999), menciona que el lixiviado producido durante el proceso de vermicompostaje del estiércol de ovino, ha demostrado ser una excelente fuente de nutrientes. La concentración de nitrógeno es de 61 ppm y de potasio 2.4 g/L; además, contiene otros elementos como el manganeso, cobre, hierro y zinc; que son micronutrientes esenciales para las plantas.

En ese mismo sentido Bollo (1999), señala que lo que se obtiene durante el vermicompostaje es un lixiviado que contiene altas cantidades de nitrógeno 150 ppm, es un abono líquido completamente orgánico.

En relación con estos últimos Chavez y Fuentes (2013), demuestran por medio de un análisis físico-químico, que el lixiviado de lombriz del proceso de vermicompostaje del estiércol de bovino contienen cantidades considerables de macroelementos, nitrógeno 0.120 %, fósforo 478.5 mg/L, potasio 4850.0 mg/L, calcio 950.0 mg/L y magnesio 300.0 mg/L. Estos lixiviados incrementan el contenido de nutrientes según que va madurando en el transcurso del tiempo.

1.2. Planteamiento del problema

Los residuos sólidos urbanos que se generan en la ciudad de El Alto producen uno de los mayores problemas ambientales, contaminando la atmósfera, suelos, recursos hídricos y en general causan una contaminación dentro de las urbes y en sectores periurbanos.

Según EMALT (2015), afirma que de todos los residuos sólidos urbanos que se generan diariamente en la ciudad de El Alto, el 65.8% son residuos orgánicos.

Por otro lado un problema referente a este tipo de contaminación orgánica, es la masiva producción de estiércol de bovino, que puede provocar impactos negativos al medio ambiente si no existe un manejo en el almacenamiento, debido a la emisión de gases y la proliferación de patógenos que producen estas excretas. Es así que en los municipios rurales como Pucarani y Achacachi, los ganaderos lecheros almacenan las excretas del bovino en los alrededores de su casa; en la época de lluvia estos estiércoles tienden a lixiviar y percolar en los cuerpos de agua subterráneos, lagunas, bofedales y afluentes que existe en el lugar, donde los mismos productores aprovechan estas aguas por medio de pozos, para dar de beber a los animales e inclusive se valen de estas aguas para el consumo humano.

1.3. Justificación

Frente a esta realidad, se desarrolló la técnica del vermicompostaje como una tecnología de bajo costo, para el tratamiento ecológico de los residuos sólidos orgánicos que contaminan el medioambiente, utilizando como principal agente descomponedor a las lombrices rojas californianas (*Eisenia foétida*). Durante la biotransformación, se produjo un biolixiviado que se puede utilizar como enmienda orgánica para los suelos y bioabono para las plantas.

Adicionalmente, se aportará con información técnica en los procesos de producción de abonos orgánicos, que existe en el sector agrícola.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar los biolixiviados del proceso de vermicompostaje en sistema vertical de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Estiércol de Bovino (EB), en el Centro Experimental de Kallutaca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar las variables físicas y químicas (temperatura, pH y conductividad eléctrica), durante la lixiviación de biolixiviados del proceso de vermicompostaje.
- Clasificar y cuantificar la población de lombrices cliteladas, sub-cliteladas, juveniles, número de cápsulas, número total y biomasa de las lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*).
- Determinar y comparar la biomasa final de lombrices con la biomasa inicial de lombrices.
- Determinar el volumen final de los biolixiviados, generados en los diferentes tratamientos de RSU y EB.
- Interpretar las características químicas de los biolixiviados (macroelementos, microelementos, pH final, conductividad eléctrica final y metales pesados), analizados por el laboratorio Spectrolab-UTO.
- Analizar el Beneficio/Costo de los biolixiviados.

1.5. Hipótesis

- H_0 : No existe diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, durante la biolixiviación del proceso de vermicompostaje de los residuos sólidos urbanos combinados con estiércol de bovino.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades de los residuos sólidos

2.1.1. Definición

La Ley del Medio Ambiente N° 1333 del 27 de Abril de 1992, define los residuos sólidos o basura como materiales generados en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, control, reparación o tratamiento, cuya calidad no permite usarlos nuevamente en el proceso que los generó, sin embargo pueden ser objeto de tratamiento y/o reciclaje (Título I, Capítulo II, Art. 9, (b), 1992).

Según Castells (2000), el **Residuo**, es aquella sustancia u objeto generado por una actividad productiva o de consumo, de la que hay que desprenderse por no ser objeto de interés directo de la actividad principal. Cualquier tipo de actividad genera una gran cantidad de desechos al cual se suma dos importantes factores: El consumo y el precio bajo de los vertederos.

2.1.2. Clasificación de los residuos sólidos

En el marco del Reglamento en Gestión de Residuos Sólidos de la Ley del Medio Ambiente N° 1333, la clasificación de los residuos sólidos se ilustra en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Clasificación de los residuos sólidos por su procedencia y naturaleza

| | |
|--|--|
| A. Residuos Domiciliarios | |
| B. Residuos Voluminosos | |
| C. Residuos Comerciales | |
| D. Residuos Procedentes de la Limpieza de Áreas Públicas | |
| E. Residuos Especiales | E.1 Vehículos y electrodomésticos desechados |
| | E.2 Neumáticos desechados |
| | E.3 Residuos Sanitarios No Peligrosos |
| | E.4 Animales muertos |
| | E.5 Escombros |
| | E.6 Jardinería |
| F. Residuos Industriales Asimilables a Domiciliarios | |
| G. Restos de Mataderos | |
| H. Lodos | |
| I. Residuos Agrícolas, Ganaderos y Forestales | |
| J. Residuos Mineros y Metalúrgicos | |
| K. Residuos Peligrosos | |

Fuente: Ley del Medio Ambiente N° 1333 (1992)

Sánchez *et al.* (2014), indican que la composición de los residuos sólidos urbanos es muy heterogénea, se puede encontrar materiales de diversa naturaleza y se plantea la necesidad de agruparlos en distintos componentes y categorías de cierta homogeneidad las cuales se clasifican de la siguiente manera:

- **Inertes:** Metales, vidrios, restos de reparaciones domésticas, tierra, escoria y cenizas.
- **Fermentables:** Es la fracción orgánica compuesta por restos de cocina, restos de jardinería y otros materiales orgánicos.
- **Combustibles:** Papel, cartón, plástico, gomas, cueros, textiles y otros.

Los mencionados autores; también, señalan que cuando más desarrollado es un país mayor es la tendencia a consumir los bienes elaborados, reduciendo la fracción orgánica e incrementando residuos como vidrio, papel, cartón y plásticos.

2.1.3. Residuos sólidos urbanos (RSU)

Según Sánchez *et al.* (2014), mencionan que los residuos sólidos urbanos van en constante aumento en función de los modelos de producción, consumo, condiciones climáticas, los movimientos de la población, la eficiencia en el ciclo de materiales (desde su extracción hasta su desecho como residuo), crecimiento demográfico y desarrollo del país; toda actividad humana es susceptible de producir residuos, generando un potencial impacto negativo sobre el medioambiente y amenaza sobre la salud pública. Causan una pérdida de materiales y energía, su gestión implica costos económicos cada vez mayores para la sociedad, no obstante el almacenamiento de estos residuos no es una solución viable y su destrucción no resulta satisfactoria debido a las emisiones resultantes y a la alta concentración de elementos contaminantes.

También, señalan que los residuos son fuentes de materiales que todavía poseen valor económico, lo que supone un ahorro de materia prima y energía; recíprocamente es factible evitar su producción y en todo caso reintroducirlos en el ciclo del producto mediante el reciclaje de sus componentes, donde haya un manejo ecológico y económico.

Carita (2014), indica que los residuos sólidos urbanos colectados en los mercados, ferias, restaurantes, quioscos, snacks y de diferentes espacios públicos, contienen cantidades considerables de nutrientes:

Cuadro 2. Composición química de los RSU

| Parámetro | Unidad | Cantidad |
|------------------|---------------|-----------------|
| Nitrógeno total | % | 1.6 |
| Fósforo total | mg/kg | 2823 |
| Potasio total | mg/kg | 23890 |
| Calcio total | mg/kg | 7850 |
| Magnesio total | mg/kg | 1667 |
| Sodio total | mg/kg | 1170 |
| Proteína cruda | % | 9.9 |
| Cenizas | % | 8 |
| Materia orgánica | % | 92 |
| pH | | 7.1 |
| CE | μS/cm | 6100 |

Fuente: UMSA-LCA (2013)

Para Moreno (2015), los residuos generados por núcleos poblacionales en su mayor proporción son residuos orgánicos, que pueden ser aplicados como materia prima en la elaboración de abonos y enmiendas orgánicas, sin embargo los productos finales requieren un análisis de laboratorio y registro previo para ser comercializados, ya que el principal inconveniente que presenta en su composición química, es la concentración de metales pesados, por ello su aplicación suele ser limitada. El empleo de estos residuos en la transformación de abonos, evita la pérdida de la materia orgánica que contienen, así como la contaminación atmosférica (por gases de combustión) y de las aguas subterráneas (por la lixiviación de vertederos).

2.1.3.1. Residuos sólidos domiciliarios

Según Cacciamani (1999), estos desechos están compuestos generalmente por un 30% de materiales inorgánicos (plásticos, vidrios, metales, etc.) y un 70% de residuos orgánicos de muy diversos tipos y orígenes.

Barradas (2009), menciona que los residuos domiciliarios son procedentes de la actividad doméstica, como los residuos de la cocina, restos de comida, papeles, vidrios, material de embalaje y otros residuos de consumo.

2.1.3.2. Residuos sólidos orgánicos

Bollo (2001) citado por Cano (2006), señala que el proceso de descomposición de la materia orgánica depende en gran parte de su composición química, relación carbono : nitrógeno, temperatura, humedad, aireación, pH y contenido de minerales como nitrógeno,

azufre, fósforo, calcio, magnesio y potasio; los cuales influyen sobre la velocidad de descomposición.

García *et al.* (2005) citados por Sánchez *et al.* (2014), indican que la salinidad de los residuos de cocina es elevada en comparación con otros residuos, esto es debido a que el contenido de calcio, magnesio, sodio, potasio y fósforo, es más alto en los residuos de carne y pescado que pueden estar mezclados con los residuos vegetales. La sal común utilizada en los procesos de cocinado de los alimentos, también contribuye a incrementar la salinidad de estos residuos; el alto contenido de humedad debido a la propia naturaleza del residuo, es de gran interés en los procesos de producción de lixiviados.

Yang *et al.* (2006) citados por Sánchez *et al.* (2014), mencionan que los bioresiduos de alimentos son típicamente húmedos y contiene altos niveles de hidratos de carbono fermentables, por lo que este material es fácilmente degradable por los microorganismos, la humedad en estos bioresiduos puede llegar hasta un 80%.

Según Tenecela (2012), los diferentes residuos orgánicos generados en los domicilios, jardines y huertos, son susceptibles de sufrir una putrefacción y se pueden transformar en pocos meses en un abono orgánico homogéneo, rico en nutrientes y oligoelementos para las plantas.

Los residuos orgánicos contiene metales pesados tóxicos (Hg, Pb, Cd) y otros metales (Fe, Mn, Cu, Cr, Zn, Ni) que, en pequeñas cantidades son considerados como micronutrientes esenciales para los vegetales, pero el exceso puede constituir un problema por su potencial como contaminante y tóxico (Nogales *et al.*, 2014).

2.1.3.3. Producción y composición física de los RSU en Bolivia

De acuerdo al diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia del MMA y A (2011), diariamente se genera un aproximado de 4782 tn/día de residuos municipales, de los cuales más del 50% son residuos sólidos orgánicos y biodegradables; la composición física de estos residuos depende básicamente del nivel de vida, actividad que realiza la población y la región. Los residuos son considerados en tres grupos: Residuos orgánicos o biodegradables, inorgánicos o reciclables (plásticos, vidrios, metales, papel y cartón) y Otros residuos considerados como residuos no aprovechables (restos de sanitarios, infecciosos, pilas, baterías, escombros, áridos, etc.).

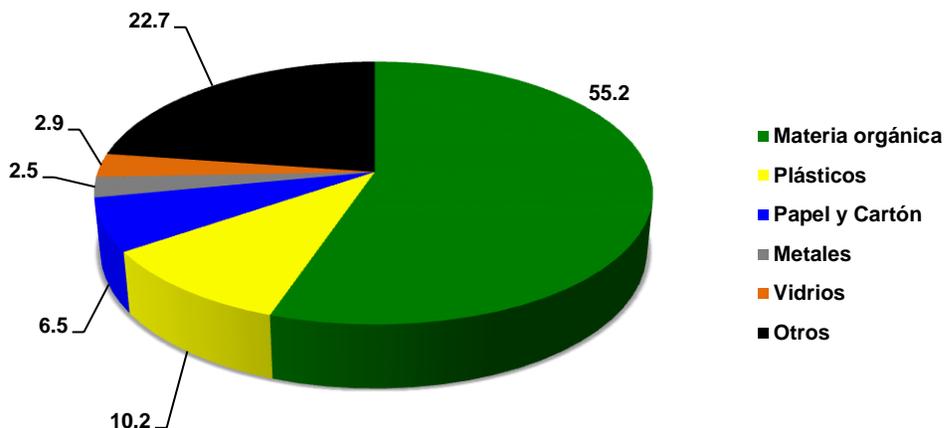


Figura 1. Composición de residuos sólidos en Bolivia (MMA y A, 2011)

Cuadro 3. Producción de residuos sólidos por ciudad capital

| Ciudad | Población Urbana | PPC (kg/Hab-día) | Generación Domiciliaria (tn/día) | Generación Municipal (tn/día) |
|------------|------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Santa Cruz | 1624885 | 0.57 | 850 | 1044 |
| La Paz | 833104 | 0.58 | 461 | 553 |
| El Alto | 956912 | 0.38 | 381 | 496 |
| Cochabamba | 617976 | 0.60 | 318 | 370 |
| Sucre | 276079 | 0.46 | 126 | 151 |
| Oruro | 231949 | 0.50 | 86 | 130 |
| Tarija | 186714 | 0.52 | 97 | 120 |
| Potosí | 153484 | 0.50 | 85 | 120 |
| Trinidad | 95278 | 0.44 | 41 | 66 |
| Cobija | 38722 | 0.43 | 16 | 20 |

Fuente: MMA y A (2011)

En las ciudades del eje troncal: Santa Cruz, La Paz Cochabamba y El Alto, se registran una mayor generación de residuos, esto se debe a la migración poblacional de sectores rurales a ciudades capitales y al desarrollo productivo y económico; en consecuencia, la cantidad de residuos incrementa, sobre todo en los días de feria.

Cuadro 4. Composición física de residuos sólidos por ciudad capital

| Ciudad | Materia Orgánica (%) | Plásticos (%) | Papel y Cartón (%) | Metales (%) | Vidrios (%) | Otros (%) |
|------------|----------------------|---------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
| Santa Cruz | 53.2 | 9.4 | 7.0 | 1.0 | 4.1 | 25.3 |
| La Paz | 47.3 | 15.2 | 12.8 | 1.4 | 2.6 | 20.7 |
| El Alto | 65.8 | 9.8 | 5.5 | 1.8 | 1.9 | 15.2 |
| Cochabamba | 60.6 | 5.5 | 3.5 | 1.1 | 3.3 | 26.0 |
| Sucre | 48.5 | 5.0 | 4.5 | 1.6 | 1.6 | 38.8 |
| Oruro | 37.0 | 11.0 | 11.0 | 4.0 | 4.0 | 33.0 |
| Tarija | 61.0 | 18.5 | 6.0 | 2.0 | 2.0 | 10.5 |
| Potosí | 55.0 | 7.0 | 9.0 | 2.0 | 2.0 | 25.0 |
| Trinidad | 54.0 | 5.9 | 9.9 | 1.5 | 3.0 | 25.7 |
| Cobija | 55.7 | 15.9 | 7.4 | 2.4 | 1.9 | 16.7 |

Fuente: MMA y A (2011)

En siete de nueve departamentos del país se puede observar que la fracción orgánica representa más del 50% del total de los residuos generados (MMA y A, 2011).

La generación de residuos sólidos o “basura” en las principales ciudades de Bolivia, varían entre 0.3 a 0.7 kg/habitante día, de los cuales el 70% pertenecen a la fracción orgánica o fermentable, cuyo destino son los botaderos o rellenos sanitarios (Mamani *et al.*, 2012).

2.1.3.4. RSU en la ciudad de El Alto

En la ciudad de El Alto se genera un aproximado de 526.49 tn/día de residuos sólidos urbanos, con una producción per cápita de 0.54 kg/hab/día, debido a las actividades domésticas, comerciales, agropecuarias e industriales, de las cuales el 65.8% de los desechos producidos en esta urbe, son residuos sólidos orgánicos, 9.8% plásticos, 5.5% papel y cartón, 1.8% metales, 1.9% vidrios y el 15.2% otros residuos provenientes de sanitarios, obras de construcción y centros hospitalarios. La producción de residuos varía en función a las estaciones del año, fechas cívicas y fiestas de fin de año (EMALT, 2015).

2.2. El estiércol de bovino

Según Mota (1997), el estiércol de bovino presenta un pH de reacción alcalina (9.6), la concentración de elementos químicos como el fósforo está en un nivel adecuado, el nitrógeno, potasio, cobre, hierro y zinc presentan niveles altos; por último, el calcio y el magnesio muestran niveles bajos (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis químico del estiércol de bovino

| Elemento | Resultados | Unidades |
|------------------|------------|----------|
| Nitrógeno | 1.7 | % |
| Fósforo | 0.22 | % |
| Potasio | 2.13 | % |
| Calcio | 0.75 | % |
| Magnesio | 0.40 | % |
| Carbono orgánico | 20.27 | % |
| Materia orgánica | 34.96 | % |
| Cobre | 15 | ppm |
| Hierro | 14500 | ppm |
| Zinc | 80 | ppm |
| Manganeso | 365 | ppm |
| Relación C/N | 12:01 | |
| pH | 9.6 | |

Fuente: Laboratorio de suelo, planta y agua-FAUSAC (1997)

El estiércol es una fuente excelente de materia orgánica, pero es relativamente bajo en nutrientes, el valor del abono depende de la alimentación y la manera en que el abono es almacenado. El contenido de elementos químicos en el estiércol de vaca es de: 1.5% Nitrógeno, 0.7% Fósforo y 1.7% Potasio, si el animal es alimentado solo con la vegetación local tiene menos contenido de nutrientes (Sánchez, 2003).

Según Ulloa (2003) citado por Cano y Goff (2006), menciona que el estiércol de bovino se puede encontrar en tres diferentes formas; estiércol fresco, maduro y viejo.

La Fundación Hivos (2015), confirmó por medio de un análisis de laboratorio el contenido de nutrientes en el estiércol de bovino, el cual se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Nutrientes que contiene el bio bovino

| Elemento | Resultados | Unidades |
|-------------------------|------------|----------|
| Nitrógeno | 0.080 | % |
| Fósforo | 0.010 | % |
| Potasio | 0.520 | % |
| Carbono orgánico | 0.250 | % |
| Calcio | 0.033 | % |
| Magnesio | 0.012 | % |
| Manganeso | 0.990 | mg/kg |
| Cobre | 0.350 | mg/kg |
| Zinc | 7.680 | mg/kg |
| Hierro | 6.110 | mg/kg |
| Materia seca | 2.300 | % |
| Humedad | 9.700 | % |
| pH | 7.750 | |
| Conductividad Eléctrica | 18.570 | μS/cm |

Fuente: IIDEPROQ-UMSA (2014)

Moreno (2015), señala que el bio bovino es el estiércol de mayor importancia en el campo agrícola y es producido en grandes cantidades por las explotaciones ganaderas. La calidad de estos estiércoles depende de la buena alimentación suministrada al ganado bovino. Por el contrario, los animales mal alimentados principalmente a base de paja, producen un estiércol pobre y de poco valor nutricional para las plantas.

2.3. Generalidades del proceso de vermicompostaje

2.3.1. La lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)

Sánchez (2003), menciona que la lombriz roja californiana tiene su origen en Eurasia, a partir de los años 50 fueron criadas intensivamente en California Estados Unidos. La especie (*Eisenia foetida*), es una variedad obtenida por selección natural mediante cruces genéticos y es la lombriz más conocida y empleada en más del 80% de los criaderos del mundo. Dada su rusticidad, tolerancia a los factores ambientales (pH, temperatura y humedad) y potencial reproductor. Es una hermafrodita incompleta (posee ambos sexos) pero no tiene la capacidad de auto fecundarse.

Schuldt (2004) citado por Cano y Goff (2006), indica que estas lombrices carecen de ojos, pero las células de su piel poseen receptores que le permiten percibir la luz, la presencia de diferentes sustancias tóxicas y funcionan como olfato, orientándolas a una búsqueda de humedad y alimento. Conjuntamente otras células presentes en la cutícula producen una secreción mucosa que la mantiene húmeda y cuando esta suele secarse, bloquea el intercambio gaseoso (intercambio de oxígeno y eliminación de CO₂); es importante destacar que las lombrices respiran únicamente por la piel, por lo que en presencia de un exceso de humedad el sistema respiratorio se vuelve inoperable.

Ruiz (2011), señala que la *Eisenia foetida* es la especie de mayor popularidad en la técnica de lombricomposteo, debido a su habilidad para digerir residuos orgánicos en condiciones de cautiverio, resistencia al manejo y adaptación a medios inestables. La lombriz roja californiana puede consumir el 50% hasta 100% de su peso diario y duplicar su población en 90 días.

2.3.1.1. Clasificación taxonómica de la lombriz roja californiana

Bollo (2001), clasifica a la lombriz roja californiana de la siguiente manera:

Phylum: Anélidos

Clase: Cliteladas

Orden: Oligoquetas

Familia: Lumbricidae

Género: *Eisenia*

Especie: *Eisenia foetida*

2.3.1.2. Características generales

La lombriz roja californiana presenta las siguientes características: Es de color rojo oscuro, respira por medio de la piel, mide de 6 a 8 cm de largo y 3 a 5 mm de diámetro, llegan a pesar hasta 1.4 g/individuo, son fotofobicas (no toleran la luz solar), viven aproximadamente 4.5 años, pueden llegar a producir unas 1300 lombrices al año, y son detritívoras (en base a lo que va avanzando también va succionando con su boca el alimento). Los excrementos de la lombriz roja californiana contienen: 5 veces más nitrógeno, 7 veces más fósforo, 5 veces más potasio y 2 veces más calcio; que el material que ingirieron (Sánchez, 2003).

2.3.1.3. Características internas

Sánchez (2003), caracteriza las partes internas de la lombriz roja de la siguiente manera:

- **Cutícula:** Es una lámina delgada de color marrón brillante, quitinosa, fina y transparente.
- **Epidermis:** Es un epitelio simple con células glandulares que producen una secreción mucosa que está encargado de la formación de la cutícula y de darle la humedad y flexibilidad de la lombriz.
- **Capas musculares:** Son dos, una capa muscular circular externa y otra capa muscular longitudinal interna.
- **Peritoneo:** Es una capa más interna que limita exteriormente con el celoma.
- **Celoma:** Cavidad que contiene líquido celómico y se extiende a lo largo del cuerpo y está dividida por los septos, actúan como esqueleto hidrostático.
- **Aparato circulatorio:** Está formado por 2 vasos sanguíneos, un vaso dorsal y el otro ventral. Posee también otros vasos capilares que llevan la sangre a todo el

cuerpo. La sangre circula por un sistema cerrado constituido por cinco pares de corazones.

- **Aparato respiratorio:** Primitivo, el intercambio del oxígeno se produce a través de la pared del cuerpo.
- **Sistema digestivo:** Prostomio, con forma de labio. Las células del paladar son las encargadas de seleccionar el alimento que pasa al esófago donde se localizan las glándulas calcíferas. Estas glándulas segregan iones de calcio, de esta manera contribuyen a la regulación del equilibrio ácido básico, tendiendo a neutralizar los valores de pH. Posteriormente el alimento pasa al buche donde es retenido para dirigirse al intestino.
- **Aparato excretor:** Formado por nefridios, dos para cada anillo. Las células internas son ciliadas y sus movimientos permiten retirar los desechos del celoma.
- **Sistema nervioso:** Es ganglionar, posee un par de ganglios supraesofágicos de los que parte una cadena ganglionar.

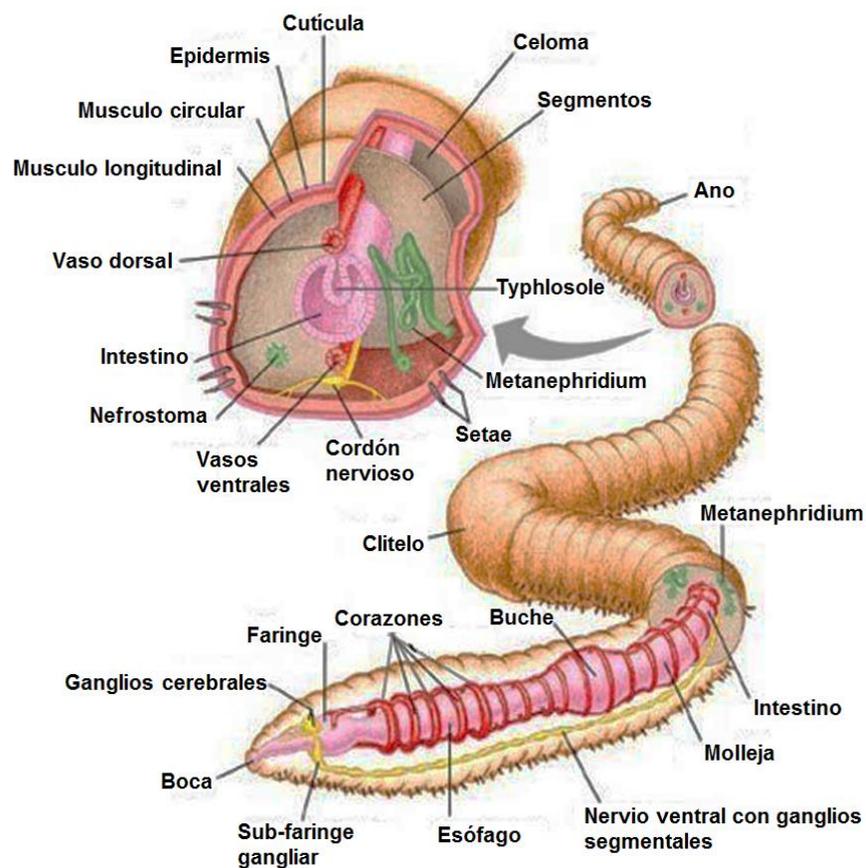


Figura 2. Anatomía interna de la lombriz, *Eisenia foetida* (Kingston, 2011)

2.3.1.4. Acoplamiento y reproducción

En la fase de acoplamiento dos lombrices giran en sentido opuesto, la una de la otra así los dos unen sus clitelos, permitiendo que el aparato genital de la primera se una con el aparato genital de la otra y viceversa. Es decir que ambas ofrecen óvulos y ambas reciben espermatozoides al mismo tiempo (Sánchez, 2003).

2.3.1.5. Ciclo biológico de la lombriz (*Eisenia foetida*)

Sánchez (2003), señala que la lombriz se aparea cada 7 días y deposita una cápsula cada 3 a 7 días, de cada cápsula nace de 1 a 20 crías, la incubación es de 14 a 21 días, alcanzan la maduración sexual a los 90 días y aproximadamente tienen un peso promedio desde 0.5 a 1.0 gramo.

Según Schuldt (2004) citado por Cano y Goff (2006), indica que la copula de dos lombrices genera de 2 a 9 cápsulas, de cada cápsula nacen 2 a 4 lombrices. La frecuencia de apareamiento es de 2 a 3 veces por semana; las crías eclosionan después de una incubación de 23 días y a los 50 a 65 días alcanzan su madures sexual.

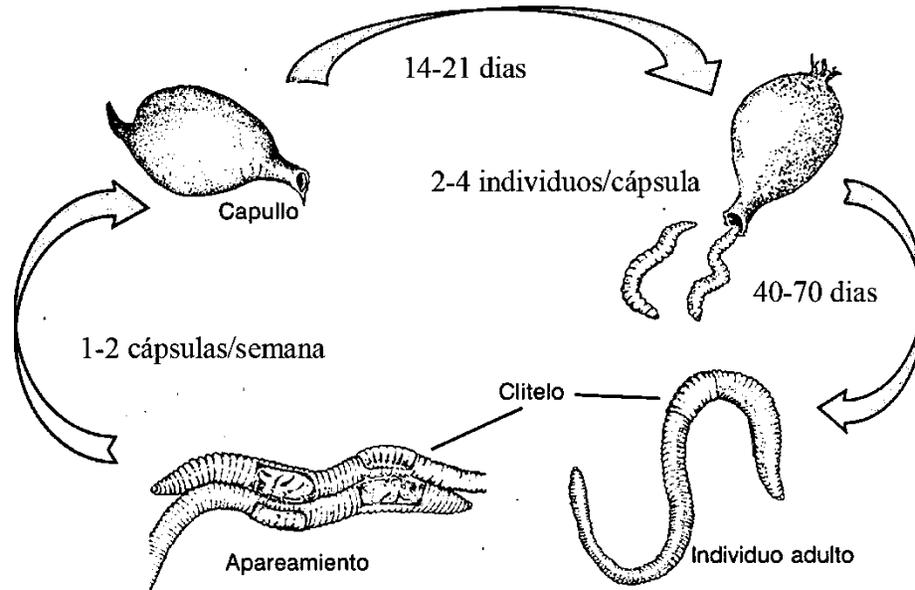


Figura 3. Ciclo biológico de la *Eisenia foetida* (Saavedra, 2007)

2.3.1.6. Factores que afectan en la reproducción

Según Tineo (1994) citado por Cano y Goff (2006), menciona que cuando los alimentos son vermicompostados sin presencia de oxígeno, causa un efecto negativo en la población de las lombrices, ya que hay producción de gases nocivos y aumento de la temperatura del sustrato, lo que afecta la fecundidad de las lombrices. El rango idóneo de temperatura para la reproducción se encuentra entre los 15°C hasta los 25°C, una humedad de 75% hasta 90% y generalmente las lombrices requieren un pH neutro en el sustrato.

Bollo (2001) citado por Cano y Goff (2006), señala que la calidad del alimento influye en gran medida en la reproducción de las lombrices, puesto que si se suministra alimentos maduros con mayor tiempo de descomposición y buena calidad, aumenta la producción y fecundidad de las cápsulas.

Sánchez (2003), indica que la lombriz entra en actividad reproductiva siempre que las condiciones del medio sean favorables, la temperatura se debe de encontrar entre los 19 y 20°C y la humedad del lecho donde habita debe de estar entre el 65 y 75%.

2.3.1.7. Determinación de edades en la población de lombrices

Para Venter y Reinecke (1990) citados por Schuldt (2006), en la *Eisenia foetida*, la aparición del clitelo indica la madures efectiva del animal, si su peso es de 0.25g y mide de 2.5 a 3cm de longitud, orilla a que todas las lombrices de ese rango de tallas o mayores exilan el clitelo, pero esto puede variar debido a la dieta, manejo y condiciones del sustrato donde habita la lombriz.

También, señalan que las lombrices post-cliteladas no son diferenciables de las pre-cliteladas, en si las lombrices de gran talla y sin clitelo pertenecen al grupo de las post-cliteladas a pesar que presentan el peso y la talla de adquisición del clitelo.

Schuldt (2006), indica que las pre-cliteladas comprende a lombrices desde la eclosión hasta la aparición del clitelo, por ello se clasifica lo siguiente:

- **Juveniles:** Son lombrices recién eclosionados, el tubo digestivo transluce 1.5cm son individuos de apariencia transparente.

- **Subadultos:** son lombrices que pierden la transparencia, cuyo intestino no se ve a simple vista, son carentes de clitelo y miden de 1.5cm hasta 3cm de longitud.
- **Adultos:** Son aquellas lombrices que tienen clitelo; aquí se implica a las **post-cliteladas** que perdieron el clitelo, dificultad que puede estar relacionado con las condiciones del sustrato (temperatura, humedad, pH, etc.); en la *Eisenia foetida* la categoría de las post-cliteladas se sustenta, por lo que se entiende que no existe lombrices post-reproductivas permanentes. La condición de post-cliteladas o post-reproductivas es reversible.

2.3.2. El vermicompostaje

Edwards (1988) citado por Nogales *et al.* (2014), menciona que es un proceso biotecnológico de bajo costo que permite biodegradar y estabilizar residuos orgánicos bajo condiciones aeróbicas y mesófitas, mediante la acción de ciertas especies de lombrices, capaces de alimentarse del residuo y a la vez que aceleran su degradación microbiana. Por lo cual en este proceso se aprovecha la capacidad detritívora de las lombrices, que ingieren, trituran y digieren el residuo orgánico, biodegradando el material mediante la acción de sus enzimas digestivas y de la microflora aeróbica presente en el interior de su intestino.

Según Larco (2004), el vermicompostaje es un proceso de descomposición de los residuos orgánicos mediante la actividad de las lombrices. Las especies más empleadas son *Eisenia andrei* o lombriz tigre, *Eisenia foetida* o lombriz roja californiana y *Eudrilus eugeniae* o lombriz roja africana.

Domínguez (2010) citado por Nogales *et al.* (2014), señala que el movimiento de las lombrices a través del residuo del que se alimenta, promueven su aireación estimulando su biooxidación microbiana. De esta manera gracias a la acción conjunta de lombrices y microorganismos, el material es degradado y parcialmente mineralizado haciéndose más estable e enriqueciéndose en sustancias similares a ácidos húmicos y nutrientes para las plantas.

Ruiz (2011), indica que el vermicompostaje es el proceso de biooxidación y estabilización del material orgánico bajo condiciones controladas, a través de la acción conjunta de especies específicas de lombriz y microorganismos bajo temperaturas mesofílicas.

2.3.2.1. Características del sustrato para el proceso de vermicompostaje

- Pre-compostaje

Para la elaboración del vermicompost los residuos orgánicos deben ser sometidos a un previo compostaje antes de ser colocados a las camas o literas, hasta que el alimento se estabilice en un pH de 7.5 a 8, una humedad de 80% y a una temperatura de 20 a 25°C. Para la preparación del sustrato se debe realizar una fermentación aeróbica del residuo, el tiempo que dure la fermentación dependerá del tipo de residuo y las condiciones medioambientales (Legall *et al.*, 2004).

- Ausencia de luz

Ferruzzi (1994), menciona que las lombrices rojas son muy sensibles a la luz y los rayos ultravioleta la matan. Por esta razón, la iluminación natural o artificial no tiene que incidir directamente sobre su hábitat.

- Temperatura

Las lombrices tienen una mayor actividad reproductiva en una temperatura óptima de 20 °C, un nivel adecuado oscila entre 15 °C a 24 °C; en una temperatura menor a 5 °C y mayor a 37 °C existe un peligro de muerte (Bollo, 2001).

Domínguez (2004), citado por Saavedra (2007), indica que los sistemas de vermicompostaje deben llevarse a cabo a temperaturas entre 40 °C y 35 °C. La *Eisenia foetida* se desarrolla óptimamente a 25 °C, a un que su carácter epigeo le permite sobrevivir entre los 0 °C y 35 °C.

Según Schuldt (2006), el éxito de una buena producción depende del manejo óptimo de los principales factores limitantes para la biotransformación del material orgánico, es así que en una temperatura de 14 °C a 27 °C hay una buena actividad biológica de las lombrices.

- Humedad

Edwards y Bohlen (1996) citados por Nogales *et al.* (2014), indican que la exigencia de una humedad en el residuo superior al 50% (óptima entre 70-90%), se debe a que las

lombrices poseen un mecanismo de intercambio gaseoso que se realiza a través de su epidermis.

Según Schuldt (2006), menciona que se debe manejar una humedad óptima que oscile entre el 85 a 95% y esto se comprueba, cogiendo un puñado del material (sustrato) y apretando con la mano fuertemente, se debe observar la cantidad de gotas que cae lo recomendable es de 8 a 10 gotas, pero si escurre un chorro de agua es señal de que hay exceso de humedad y si las gotas caen ejerciendo bastante presión significa que el sustrato necesita riego.

- **Estructura física y aireación**

Edwards y Bohlen (1996) citados por Nogales *et al.* (2014), señalan que el residuo debe tener una estructura física lo suficiente porosa que permita no solo el desplazamiento de las lombrices, sino también el paso del aire y el drenaje de un posible exceso de agua en el proceso. Un óptimo grado de aireación en el residuo es fundamental, ya que las lombrices requieren una concentración de oxígeno comprendidas entre 55 a 65%.

- **pH**

Según Edwards y Bohlen (1996) citados por Nogales *et al.* (2014), indican que el valor pH del residuo puede afectar al proceso de vermicompostaje ya que las lombrices presentan un rango de tolerancia a este factor, la *E. foetida* y la *E. andrei* son lombrices capaces de tolerar valores de pH en el residuo orgánico en el que se desarrollan, comprendidos entre 5 a 9, a un que prefieren valores cercanos a la neutralidad.

Para Schuldt (2006), las lombrices soportan un pH de 6.0 a 8.0 siendo estos lo más recomendable para el desarrollo y actividad de las lombrices.

- **Contenido de carbono y nitrógeno**

Nogales *et al.* (2008) citado por Nogales *et al.* (2014), mencionan que de manera general, se acepta que los residuos orgánicos tengan una relación C/N entre 20 a 30, permiten el desarrollo de la mayoría de las especies de lombrices; si la relación C/N de los residuos se encuentra excesivamente fuera de este margen, el crecimiento y/o la reproducción de las lombrices, pueden verse afectados negativamente. Los residuos orgánicos con relaciones C/N bajos y elevados contenidos de proteína favorecen la degradación rápida y

el calentamiento del material, lo cual es letal para las lombrices. En estos casos lo más factible es mezclar dos residuos con relaciones C/N complementarias lo que permitirá que el sustrato orgánico resultante, sea más óptimo para el desarrollo de las lombrices, en comparación con los residuos por separado.

- **Concentración de sales**

Edwards (1988) citado por Nogales *et al.* (2014), indica que el contenido de sales en los residuos orgánicos en donde se desarrollan las lombrices durante el vermicompostaje, pueden desequilibrar la composición iónica de los fluidos internos de estos oligoquetos, ya que las lombrices tienen una baja capacidad de osmoregular las sales que absorben con el agua a través de su piel. Por esta razón una elevada concentración de sales en el residuo orgánico puede impedir a que este sea procesado por las lombrices. En caso de la *E. foetida* y la *E. andrei*, un residuo orgánico con valores de conductividad eléctrica superiores a 8 dS/m, tendría un contenido de sales letal.

Según Moreno y Moral (2008), señalan que se ha comprobado que el sustrato de residuos tiene una salinidad y a la vez en la segregación de los fluidos de las lombrices también existen sales. Por ello concentraciones elevadas de sales en los residuos, pueden tener efectos inhibitorios en la reproducción y desarrollo de la población de lombrices, e incluso puede llevar a la muerte de los individuos.

- **Concentración de amoníaco y amonio**

Para Edwards (1988) citado por Nogales *et al.* (2014), los altos niveles de amoníaco o de su forma protonada el ión amonio, contenidos en el residuo resultan extremadamente tóxicos para la mayoría de las especies de lombrices; específicamente si el sustrato contiene niveles de 0.5 a 1 mg/g, se consideran tóxicos. En esta situación lo adecuado es acondicionar los residuos, saturándolos con agua y dejándolos airear durante varios días para facilitar la volatilización del amoníaco.

- **Concentración de sustancias o elementos tóxicos**

Según Fleming y Richards (1982), Elvira *et al.* (1995) citados por Nogales *et al.* (2014), mencionan que los residuos orgánicos pueden contener elementos y sustancias tóxicas como los metales pesados, fenoles, plaguicidas, etc., que aun en pequeñas cantidades, son nocivas para el desarrollo de las lombrices. Estas sustancias pueden provocar

alteraciones en el metabolismo de las lombrices, afectando el desarrollo sexual, crecimiento y la producción de cápsulas. Una pequeña cantidad de los metales pesados ingeridos por las lombrices puede incorporarse a los tejidos a través de la absorción intestinal, lo cual puede afectar a la supervivencia de la lombriz y limitar la biotransformación óptima del proceso de vermicompostaje.

- **Actividad biológica**

Domínguez (2004) citado por Nogales *et al.* (2014), indica que el agrupamiento inicial de ciertos residuos y su humectación para conseguir un contenido óptimo en agua para las lombrices puede generar una intensa proliferación microbiana, debido principalmente al alto contenido en nutrientes y en microorganismos en el residuo orgánico, lo que conlleva a una intensa actividad biológica en el residuo, que inicia su degradación de forma incontrolada liberando sustancias perjudiciales para las lombrices e incluso el originado de un autocalentamiento excesivo del residuo. En este caso lo recomendable es realizar un pre-compostaje del residuo, inicialmente de forma que la inoculación de las lombrices debe realizarse una vez que esta fase inicial de activación e intensa degradación biológica del residuo haya concluido.

- **Riego**

Bollo (2001), indica que el riego se puede aplicar utilizando baldes, regaderas y hasta micro-aspersores o sistemas de riego por goteo; el objetivo es mantener los niveles de humedad de la materia orgánica en proceso de vermicompostaje en los lechos.

Según Loher *et al.* (1985) citado por Serrano (2004), un buen manejo del lombricario requiere de riegos controlados para mantener la humedad lo más cercano posible a los valores óptimos, que para el caso de la *E. foetida* se situá entre el 80 – 90 % de humedad.

2.3.2.2. Microorganismos implicados en los procesos de vermicompostaje

Edwards y Fletcher (1988) citados por Nogales *et al.* (2014), señalan que el desarrollo y la actividad de las lombrices y microorganismos se encuentran estrechamente ligados, ya que los microorganismos constituyen una parte fundamental en la dieta de las lombrices; entre estos están, las bacterias, algas, hongos y protozoos; por otra parte, las lombrices modifican la estructura física de los residuos, fragmentando la materia orgánica y aumentando su superficie, lo cual incrementa la actividad de los microorganismos. Drake

et al., 2006, indican que el aparato digestivo de la lombriz es un sistema complejo similar al rumen, en el cual existen y cohabitan diversos microorganismos, que junto a las diversas actividades enzimáticas propias del sistema digestivo de las lombrices, modifican sustancialmente la composición química y microbiológica del material orgánico ingerido ().

Cano y Goff (2006), mencionan que los microorganismos presentes en el alimento cumplen un papel fundamental en la nutrición de la lombriz, ya que son la principal fuente de proteína, las lombrices se alimentan más de estos microorganismos que de la materia orgánica; por otro lado los microorganismos facilitan la digestión del sustrato al fragmentarlo en partículas más fáciles de digerir.

Domínguez *et al.* (2010) citados por Nogales *et al.* (2014), indican que las excreciones y el mucus segregado por la lombriz, estimula la proliferación de microorganismos degradadores de materia orgánica durante el proceso de descomposición, pues estas sustancias son una fuente de compuestos de fácil asimilación para los microorganismos.

2.3.2.3. Tipo de sistemas de vermicompostaje

2.3.2.3.1. Sistemas de vermicompostaje tradicionales o de alimentación discontinua

- Vermicompostaje en literas, hileras y camas

Para Nogales *et al.* (2014), es un sistema de vermicompostaje más utilizado debido a su menor costo de mantenimiento. Los residuos se disponen en espacios rectangulares denominados literas o camas, están delimitados por madera, ladrillos, bloques de cemento; en otros casos, no se utiliza ninguno de estos materiales y solo se dispone el material orgánico a vermicompostar en hileras, por lo cual es necesario colocar una cubierta para el sombreado y evitar en lo posible el ingreso del agua de lluvia y la presencia de aves. Para el vermicompostaje, se debe disponer el residuo entre dos cordones de material orgánico descompuesto y con una alta densidad de lombrices, para que se vayan desplazando así el material fresco desde ambos lados.

- Vermicompostaje en contenedores, cajas y receptáculos

Este sistema es utilizado en lugares domésticos, los materiales residuales a vermicompostar es tan dispuestos en un contenedor, donde las lombrices están más protegidas frente a las condiciones ambientales, en comparación del sistema en hileras.

Una vez que el material ya fue procesado por las lombrices, se debe retirar las lombrices, colocando un contenedor con perforaciones en la base o piso que contenga material fresco, encima del material vermicompostado, para que las lombrices vayan migrando al residuo orgánico fresco, es aconsejable repetir 2 hasta 3 veces (Nogales *et al.*, 2014).

2.3.2.3.2. Sistemas de vermicompostaje de alimentación continua o vertical

Sánchez (2003), menciona que la cría domestica más sencilla es empleando cajones de madera o de polietileno (con orificios en el fondo) y colocados uno encima del otro. Las lombrices se colocan en un extremo del cajón y se empieza a suministrar diariamente el alimento.

Nogales *et al.* (2014), indican que están conformados por varias unidades cilíndricas o rectangulares denominados cajas o módulos desmontables, cada uno presenta perforaciones en la parte inferior para el paso de las lombrices entre los distintos módulos; son ensamblados verticalmente uno sobre/debajo de otros, partiendo de una unidad inicial donde se encuentran la población de lombrices. De esta manera, durante el proceso de vermicompostaje se va añadiendo cajas con residuo fresco al sistema, conforme las lombrices van agotando el residuo contenido en cada unidad, esto permite que las lombrices vayan degradando sucesivamente el residuo fresco. A la vez las lombrices se desplazan en todo el sistema degradando el material desde el inicio hasta el último modulo.

2.3.3. El vermicompost

El vermicompost es el único abono orgánico con fibra bacteriana de 40 a 60 millones de microorganismos por cm^3 , capas de regenerar los suelos degradados; su elevada solubilización debido a la composición enzimática y bacteriana, proporciona una rápida asimilación de nutrientes a las plantas. El humus es de color negruzco, homogéneo y con un olor agradable a mantillo de bosque; contiene 4 veces más nitrógeno, 25 veces más fósforo y 2.5 veces más potasio que el estiércol de bovino (Sánchez, 2003).

Moreno y Moral (2008), mencionan que el vermicompost es el producto final resultante de los procesos de vermicompostaje; presenta óptimas condiciones físicas con materia orgánica parcialmente humificada, con contenido de nutrientes y sustancias fitorreguladoras de crecimiento vegetal.

Tenecela (2012), señala que el vermicompost protege al suelo de la erosión, mejora sus características físico-químicas, aumenta la retención hídrica, regula el incremento y la actividad de los nitritos en el suelo. Es capaz de almacenar y liberar los nutrientes requeridos por las plantas de forma equilibrada (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y boro).

2.3.3.1. Propiedades químicas del vermicompost

Moreno y Moral (2008), señalan que el vermicompost de estiércol de vacuno, tiene abundante riqueza en nutrientes, el cual se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 7. Análisis de vermicompost, obtenido a partir de estiércol de vacuno

| Parámetros | Unidades | Estiércol de Vacuno |
|------------|----------|---------------------|
| pH | | 8.1 |
| CE | μS/cm | 66000 |
| CO | g/kg | 250 |
| C/N | | 17 |
| N | g/kg | 15 |
| P | g/kg | 2.2 |
| K | g/kg | 5.7 |
| Fe | g/kg | 1.9 |
| Mn | mg/kg | 7.5 |
| Cu | mg/kg | 4 |
| Zn | mg/kg | 16 |

Fuente: Benítez *et al.* (2002, 2005 y 2006)

Mamani *et al.* (2012), mencionan que el vermicompost de estiércol de vacuno (EV) y restos de cocina (RC), contiene valores medios de nitrógeno, altas concentraciones de potasio en los RC debido a la abundancia de este elemento en los restos vegetales, bajas concentraciones, de calcio, magnesio, fósforo, cinc y cobre, lo que puede ser debido a la naturaleza de la materia prima y a las pérdidas por lixiviación o lavado, debido al riego suministrado al sustrato durante el proceso de vermicompostaje. Los valores de pH se encuentran en el rango neutro y alcalino, lo que puede ser debido a la presencia de elementos alcalinizantes que poseen los restos de cocina, tales como sales y el amonio que se libera durante la fermentación de residuos ricos en nitrógeno. Con respecto a la conductividad eléctrica el EV no presenta problemas de sales, pero los RC presentan rangos altos de presencia de sales (Cuadro 8).

Cuadro 8. Composición química del vermicompost de EV y RC

| Parámetro | EV | Clasificación | RC | Clasificación |
|---|-------|---------------|-------|---------------|
| Materia orgánica (%) | 45.50 | Bajo | 29.70 | Bajo |
| Nitrógeno total (%) | 2.31 | Medio | 2.45 | Medio |
| Fósforo P (ppm) | 220 | Bajo | 500 | Bajo |
| Potasio K (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹) | 2.76 | Bajo | 27.43 | Alto |
| Calcio (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹) | 4.14 | Bajo | 6.50 | Bajo |
| Magnesio (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹) | 4.96 | Bajo | 5.00 | Bajo |
| Zinc (ppm) | 32.00 | Bajo | 11.40 | Bajo |
| Cobre (ppm) | 6.35 | Bajo | 1.30 | Bajo |
| pH | 7.10 | Neutro | 8.40 | Básico |
| Conductividad eléctrica (1:1 dS m ⁻¹) | 2.30 | Normal* | 8.00 | Alto |

Fuente: Mamani *et al.* (2012)

2.3.4. El lixiviado del vermicompost

El fertilizante líquido de vermicompost aporta ácidos húmicos y fúlvicos, microorganismos vivos propios para la nitrificación y solubilización de minerales del suelo (Casco e Iglesias, 2005).

Schuldt (2006), señala que los lixiviados son obtenidos por extracción con agua del sólido; estos lixiviados contienen nutrientes, fitoestimulantes (hormonas vegetales) producido por la actividad biológica; este líquido se pueden utilizar como abono foliar para las plantas.

Para Ortega y Fernández (2007) citado por González (2013), el lixiviado del proceso de vermicompostaje, es una suspensión alcalina que contiene ácidos húmicos y fúlvicos, lo que puede facilitar la adhesión de C al suelo; este líquido se puede aplicar a través del riego para aumentar la materia orgánica y los niveles de fertilidad en el suelo.

Moreno y Moral (2008), mencionan que el exceso de agua adicionada a los sustratos orgánicos para mantener las condiciones óptimas de humedad durante los procesos de vermicompostaje, produce una lixiviación que percola de las literas los cuales pueden ser recogidos en contenedores. Estos lixiviados contienen variables concentraciones de materia orgánica disuelta, macro y micronutrientes. Benítez *et al.*, (1995), observaron que los lixiviados obtenidos durante el proceso de vermicompostaje de estiércol vacuno, suministraron adecuadamente el N, P y sobre todo el K, aumentando los rendimientos de cosecha, en el cultivo de espinaca. Sin embargo el uso de los lixiviados de los procesos de vermicompostaje todavía es muy escaso, por lo que habría que tener precaución, debido a que pueden contener compuestos orgánicos tóxicos. Sobre todo si se utilizan residuos orgánicos procedentes del sector urbano o industrial.

Montes y Ruiz (2010), señalan que la cosecha del lixiviado se realiza de manera continua desde el establecimiento de las vermicomposteras hasta la cosecha del vermicompost, puesto que con la aplicación de los riegos se produce un lavado del alimento de las lombrices. Es adecuado almacenar este lixiviado en recipientes para volver a utilizar como agua de riego a las vermicomposteras una o dos veces más, para que siga aumentando el contenido de nutrientes en el lixiviado, finalmente envasarlo en contenedores plásticos para almacenarlos en un lugar oscuro.

Urquiaga (2011), menciona que el líquido recogido durante el proceso de vermicompostaje, es un abono muy concentrado, debe diluirse en tres partes de agua por una del lixiviado, puede emplearse en plantas regándolo sobre la tierra. Ruiz (2011), indica que los lixiviados son líquidos producidos durante la descomposición de la materia orgánica usualmente de olor desagradable.

Para Chavez y Fuentes (2013), el lixiviado de lombriz es uno de los productos que se obtiene al cambiar el proceso tecnológico en la cría de las lombrices rojas californianas; es producido al regar el sustrato donde habitan las lombrices. Este lixiviado inicialmente presenta un ligero color café ámbar, posterior que va pasando los días, va aumentando la intensidad de su color. Su composición está basada en el contenido de ácidos húmicos, fúlvicos, urónicos, melánico e himatomelánicos, producto de la descomposición de material orgánico; también contiene aminoácidos y fitohormonas, los cuales están presentes en la misma composición de los desechos orgánicos.

Quaik y Hakimi (2013), mencionan que la constante aplicación de agua en el proceso de vermicompostaje para asegurar la humedad en la vermicompostera, implica a la salida de un lixiviado de vermicompost, que contiene macro y micronutrientes que fueron asimilados y estabilizados por las lombrices y microorganismos que también salen en el lixiviado.

2.3.4.1. Propiedades químicas del lixiviado

Según Quaik *et al.* (2012), señalan que los lixiviados se producen debido a la saturación del agua aplicado como riego durante el proceso de vermicompostaje, este lixiviado drena por medio del vermicompost junto con la descomposición del material orgánico que suelta un líquido que contiene microorganismos, nutrientes, ácidos húmicos y fúlvicos (ayudan a la planta en la absorción de nutrientes), las características químicas de los lixiviados se pueden observar en el siguiente cuadro:

Cuadro 9. Características químicas del lixiviado de estiércol de vaca y residuos vegetales

| Características | Estiércol de Vaca | Residuos Vegetales | Estiércol de Vaca y Residuos Vegetales (Relación 1:2) |
|------------------------------|-------------------|--------------------|---|
| pH | 6.7 | 7.5 | 7.1 |
| C total (g/L ⁻¹) | 8.2 | 9.4 | 8.9 |
| N total (g/L ⁻¹) | 0.8 | 0.7 | 0.7 |
| P total (g/L ⁻¹) | 0.6 | 0.4 | 0.5 |
| K total (g/L ⁻¹) | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| Calcio (mg/L ⁻¹) | 71 | 94 | 85 |
| Boro (mg/L ⁻¹) | 151 | 182 | 191 |

Fuente: Quaik *et al.* (2012)

Ávila *et al.* (2015), indican que las características físico-químicas del vermicompost sólido y el lixiviado del proceso de vermicompostaje de estiércol de vaca y desperdicios vegetales con hongos, son diferentes; el N total, P, Ca y Mg son bajos en los lixiviados en comparación con el vermicompost sólido, esto probablemente es debido a la volatilización (Cuadro 10).

Cuadro 10. Características químicas del vermicompost de desechos orgánicos y sus lixiviados

| Elementos | Restos Vegetales con Hongos (MSHW) | | Estiércol de Vacuno (CC) | |
|--------------|------------------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | Vermicompost | Lixiviado | Vermicompost | Lixiviado |
| pH | 6.98 | 9.06 | 7.26 | 7.27 |
| CE (dS/m) | 7.9 | 4.6 | 3.5 | 6.60 |
| N total (%) | 1.8 | 0.04 | 1.49 | 0.04 |
| P (%) | 0.57 | 0.01 | 0.63 | 0.01 |
| K (%) | 1.93 | 1.08 | 0.89 | 0.94 |
| Ca (%) | 2.03 | 0.04 | 0.96 | 0.04 |
| Mg (%) | 0.3 | 0.02 | 0.30 | 0.02 |
| Na (%) | 0.77 | 0.43 | 0.62 | 0.44 |
| S (%) | 1.32 | 0.03 | 0.34 | 0.05 |
| Fe (%) | 0.72 | 0.001 | 0.85 | 0.001 |
| Cu (ppm) | 39.2 | 4.48 | 41.3 | 6.27 |
| Mn (ppm) | 592 | 3.05 | 855 | 1.71 |
| Zn (ppm) | 277 | 10.5 | 334 | 3.99 |
| B (ppm) | 23.3 | 0.01 | 18.8 | 0.01 |
| Humedad (%) | 59.8 | 99.3 | 59.4 | 99.4 |
| MO (%) | 47.7 | 44.9 | 51.3 | 37.1 |
| CO (%) | 27.7 | 26 | 29.8 | 21.5 |
| Relación C/N | 15.3 | 650 | 20 | 537.5 |

Fuente: Ávila *et al.* (2015)

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en el Centro Experimental de Kallutaca, a 26 km de la Sede Gobierno, situada en la comunidad de Kallutaca, del municipio de Laja, Provincia Los Andes, Departamento La Paz. Geográficamente está ubicado en las siguientes coordenadas: 8173026 Norte, 573756 Este, 16°31'24" latitud Sur y 68°18'31" longitud Oeste a una altitud de 3902 m.s.n.m. (Datos obtenidos en campo).



Figura 4. Ubicación del sitio experimental (Google Earth, 2016)

3.1.2. Características edafoclimáticas

3.1.2.1. Clima

El Centro Experimental de Kallutaca tiene las siguientes características climáticas: En los meses de enero a marzo, presentó temperaturas máximas desde 8.7 °C a 9.2 °C y temperaturas extremas mínimas de 5.9 °C a 6.4 °C en los meses de junio a agosto. La humedad relativa fue de 80.96 % a 79.89 % en los meses de enero a marzo y 57 % a 53.96 % en los meses de junio a agosto, con una precipitación anual de 671.2 mm (SENAMHI, 2015).

3.1.2.2. Suelo

Yapu (2015), menciona que los suelos del Centro Experimental de Kallutaca, está conformado por una textura franco-arcilloso, de formación aluvial con problemas de drenaje y poco contenido de materia orgánica inferior al 4%, un pH moderadamente básico próximos a 7.8 y la conductividad eléctrica varía entre 0.8 a 8.76 dS/m. Asimismo, Krüger (1992), indica que estos suelos presenta afloramientos de sales; este fenómeno se produce cuando la capa freática se encuentra menor a 1.5 m de la superficie.

3.1.2.3. Flora

Mayta (2012), indica que el Centro Experimental de Kallutaca presenta una vegetación natural, conformada por una diversidad de especies vegetales perennes, arbustivas y herbáceas; entre las especies de estrato bajo están el c'hiji (*Disttichlis humilies Phil*), cebadilla (*Bromus unioloides Balh*), diente de león (*Taraxacum officinalis Weber*), bolsa de pastor (*Capsella bursa-pasrori L.*), mostaza (*Brassica rapa L.*), paja brava (*Achnaterum ichu*), chilligua (*Festuca dolichophylla*), t'hola (*Parastephia sp*), sillu sillu (*Lachemilla pinnata*), etc. Entre las especies cultivables está la papa (*Solanum tuberosum*), quinua (*Chenopodium quinua*) y la cebada (*Hordium sativum*).

3.2. Materiales

3.2.1. Material de estudio

3.2.1.1. Insumos

- ✓ Residuos sólidos urbanos (RSU)
- ✓ Estiércol de bovino (EB)

3.2.1.2. Material biológico

- ✓ Lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*), que se cosechó de las literas del lombricario del Centro Experimental de Kallutaca de la carrera Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto.

3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio

- ✓ pH metro

- ✓ Conductivimetro
- ✓ Vaso precipitado de 50 ml
- ✓ Varillas
- ✓ Perillas
- ✓ Pipeta de 10 ml
- ✓ Probetas de 100 ml
- ✓ Picetas y agua destilada
- ✓ Balanza de precisión
- ✓ Cajas petri
- ✓ Horno (Equipo de laboratorio)
- ✓ Guardapolvo

3.2.3. Material de escritorio

- ✓ Computadora
- ✓ Impresora
- ✓ Lápiz
- ✓ Goma de borrar
- ✓ Bolígrafos
- ✓ Marcadores
- ✓ Papel bond de 75 g
- ✓ Cuaderno de apuntes
- ✓ Flash memory (USB)
- ✓ Calculadora
- ✓ Planillas de campo

3.2.4. Material de campo

- ✓ Cajas de plástico
- ✓ Agrofilm
- ✓ Regadera
- ✓ Palas
- ✓ Picotas
- ✓ Baldes
- ✓ Geotermómetro
- ✓ Balanza de precisión

- ✓ Probetas de plástico de 1000 ml
- ✓ Vaso precipitado de 1000 ml
- ✓ Malla milimétrica de plástico
- ✓ Tela tul
- ✓ Aerosol negro y blanco
- ✓ Plancha metálica
- ✓ Carretilla
- ✓ Cilindro de PVC
- ✓ Nailon
- ✓ Guantes de goma
- ✓ Overol
- ✓ Bidones de plástico de 20 L
- ✓ Yutes tipo malla color rojo
- ✓ Cámara fotográfica digital

3.3. Metodología

3.3.1. Procedimiento experimental

3.3.1.1. Etapa de pre-compostaje

Se pre-compostó los RSU y el EB, para proporcionar como alimento a las lombrices rojas californianas, puesto que estos anélidos se alimentan de material previamente descompuesto que contengan abundantes microorganismos como bacterias, hongos y otros.

a) Recolección y acopio de los RSU y el EB

La cantidad de RSU que se utilizó fue de 1001 kg; el cual se acopio en 2 semanas, en el Módulo de Bioabonos del Centro Experimental de Kallutaca (Anexo 1).

Se utilizó 1325 kg de EB, que se recolectó de la carrera de Medicina Veterinaria y Zootecnia del Centro Experimental de Kallutaca (Anexo 2).

b) Pre-compostaje de los RSU y el EB

Se realizó un pre-compostaje de los RSU en cajas de plástico de 56.3 cm de largo, 36.6 cm de ancho y 23.5 cm de alto; se colocó una sobre otras (columnas), los cuales se mantuvo dentro del lombricario durante 55 días. EL EB también, se pre-compostó en cajas de plástico dentro del lombricario durante el mismo tiempo. Esta actividad se llevó a cabo con el objetivo de estabilizar la temperatura, pH y humedad de los RSU y EB, para que estén disponibles como alimento de las lombrices.

Durante el pre-compostaje de los RSU se realizó volteos cada dos semanas, la actividad consistió en vaciar los RSU de la caja, encima de un plástico tendido en el suelo y luego se volvió a recoger los RSU a las mismas cajas; en total se realizó 3 volteos (Anexo 3). En el transcurso de este proceso, se midió la temperatura con un geotermómetro, cada 2 a 3 días, hasta concluir el pre-compostaje.

3.3.1.2. Etapa de vermicompostaje

a) Limpieza de literas del lombricario

La refacción del lombricario consistió en revocar la pared de las literas con cemento; antes de la instalación del experimento, se hizo una limpieza general del área experimental, eliminando todo material inservible o que no sea de utilidad para el trabajo de investigación (Anexo 4).

b) Impermeabilización de las cajas para colecta del biolixiviado

Se impermeabilizó 15 cajas plásticas para las 15 unidades experimentales; esta actividad consistió en forrar las cajas por dentro con agofilm, los cuales se colocaron en la base de las columnas, con la finalidad de recepcionar los biolixiviados (Anexo 5).

c) Colocado de mallas milimétricas en las cajas

Se colocó mallas milimétricas de plástico en la parte superior de la caja impermeabilizada y en la base de la caja con sustrato (M1), con la finalidad de impedir que las lombrices caigan en los biolixiviados y evitar la mortalidad de la lombriz por ahogamiento (Anexo 6).

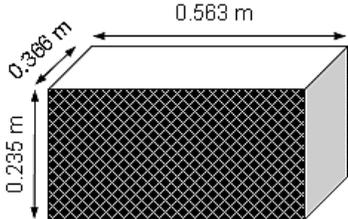
d) Preparado de las proporciones de RSU y EB

Para realizar esta actividad, se tendió agrofílm en el suelo para pesar y homogenizar los residuos sólidos urbanos y el estiércol de bovino en diferentes proporciones: T1 (100% de RSU con 0% de EB), T2 (75% de RSU con 25% de EB), T3 (50% de RSU con 50% de EB), T4 (25% de RSU con 75% de EB) y T5 (0% de RSU con 100% de EB).

e) Llenado de las cajas con sustrato

Una vez preparado las proporciones del sustrato, se procedió a pesar y llenar las cajas plásticas con el sustrato, dependiendo a la densidad del material (sustrato) y volumen de las cajas:

Volumen de la caja plástica



$$V = 0.366 \text{ m} * 0.235 \text{ m} * 0.563 \text{ m} = 0.048 \text{ m}^3$$

Figura 5. Determinación del volumen de la caja plástica (Elaboración propia)

Densidad del sustrato en base al origen del residuo

- ✓ **T1** (100% RSU con 0% EB) = 26.7 kg/0.048 m³
- ✓ **T2** (75% RSU con 25% EB) = 28.8 kg/0.048 m³
- ✓ **T3** (50% RSU con 50% EB) = 31.0 kg/0.048 m³
- ✓ **T4** (25% RSU con 75% EB) = 33.2 kg/0.048 m³
- ✓ **T5** (0% RSU con 100% EB) = 35.3 kg/0.048 m³

La cantidad y peso de los sustratos varían en cada uno de los tratamientos, esto debido a que la densidad del RSU es diferente a la densidad del EB, en relación al volumen de la caja que es 0.048 m³. Posteriormente, se procedió a la instalación de las unidades experimentales (Anexo 7).

f) Incorporación de la banda de aclimatación

Se incorporó bandas de aclimatación en cada una de las cajas, colocando 3 kg de vermicompost en yutes tipo mallas color rojo, que se ubicó en el extremo derecho de la caja. Esta actividad se realizó para que las lombrices puedan adaptarse al nuevo sustrato o alimento (Anexo 8).

g) Inoculación de lombrices

La cantidad de lombrices a inocular se calculó en base a la densidad de los RSU y EB que tiene cada tratamiento, se consideró como referencia a Nogales (1998) citado por Paco (2007) y Carita (2014), donde indica que por cada 60 kg de sustrato se recomienda inocular 300 g de lombrices. En base a esta referencia, en el presente experimento se inoculo las siguientes cantidades:

- ✓ **T1** = 133.4 g de biomasa para 26.7 kg de sustrato
- ✓ **T2** = 144.2 g de biomasa para 28.8 kg de sustrato
- ✓ **T3** = 155.0 g de biomasa para 31.0 kg de sustrato
- ✓ **T4** = 165.8 g de biomasa para 33.2 kg de sustrato
- ✓ **T5** = 176.6 g de biomasa para 35.3 kg de sustrato

Cabe mencionar que la inoculación se realizó en cada una de las cajas, haciendo un total de 75 cajas, para lo cual se utilizó un total de 11.6 kg de biomasa de lombrices (Anexo 9).

h) Actividades de manejo durante el proceso de vermicompostaje

- Riego

Se suministró 5 L de agua por columna de manera uniforme, cada 7 días constantemente desde el inicio hasta la conclusión del experimento. Esta actividad consistió en aplicar los 5 L de agua con una regadera desde la última caja (M5), con la finalidad de que el agua lixivie por toda la columna de cajas y percole en la caja impermeabilizada con agrofílm, donde se acumuló el biolixiviado de cada unidad experimental.

- Aireación

Esta actividad consistió en remover y oxigenar el sustrato con las manos durante todo el proceso de vermicompostaje, la actividad se repitió cada 15 días con la finalidad de

oxigenar y evitar la compactación del sustrato, para que las lombrices puedan respirar y moverse libremente en su hábitat (Anexo 10).

i) Cosecha de lombrices

Se extrajo todas las lombrices de las cajas manualmente tanto del sustrato como de la banda de aclimatación que permaneció hasta la conclusión del experimento, esta actividad se realizó para determinar la diferencia de la biomasa inicial con la biomasa final (Anexo 11).

j) Cosecha del biolixiviado

Una vez concluido el experimento, se recolectó de las cajas impermeabilizadas el biolixiviado y se juntó las 3 repeticiones en una sola por tratamientos, los cuales se almacenaron en lugar oscuro en bidones de plástico de 20 litros (Anexo 12).

3.3.1.3. Toma de muestras para análisis químico

Se tomó una muestra compuesta del biolixiviado (500 ml) de cada tratamiento, para mandar al laboratorio, donde analizaron los diferentes parámetros químicos: macroelementos, microelementos, pH, CE y metales pesados (Anexo 13).

3.3.2. Diseño experimental

Las variables del experimento se analizaron en base a 2 diseños: Diseño Completamente al Azar (DCA) y Diseño Completamente al Azar con sub-muestreo (DCA con sub-muestreo).

3.3.2.1. Diseño completamente al azar

En el Diseño Completamente al Azar (DCA), se consideró 5 tratamientos con 3 repeticiones con un total de 15 unidades experimentales, con el siguiente modelo lineal aditivo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \xi_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Una observación cualquiera.

μ = Media poblacional.

T_i = Es el efecto del i-ésimo tratamiento.

ξ_{ij} = Error experimental.

Este diseño se aplicó para evaluar las variables químicas del biolixiviado (pH y Conductividad eléctrica), durante el proceso de vermicompostaje.

3.3.2.2. Diseño completamente al azar con sub-muestreo

En el Diseño Completamente al Azar con Sub-muestreo (DCA con Sub-muestreo), se tomó en cuenta 5 tratamientos, con 3 repeticiones y 5 muestras con un total de 15 unidades experimentales, con el siguiente modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \xi_{ij} + \xi_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ij} = Una observación cualquiera.

μ = Media poblacional.

T_i = Es el efecto del i-ésimo tratamiento.

ξ_{ij} = Error experimental.

ξ_{ijk} = Error de la muestra (sub unidad experimental).

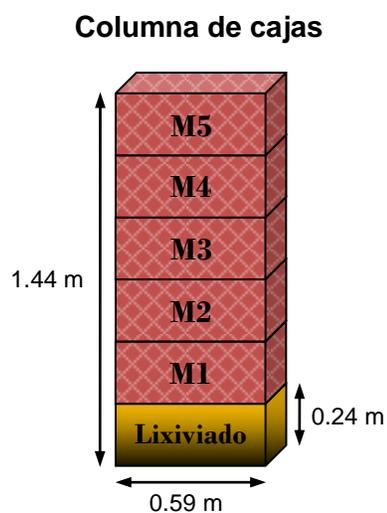


Figura 6. Croquis de la columna y número de muestras (Elaboración propia)

Este diseño se utilizó para evaluar la variable física (Temperatura) y las variables biológicas (Nº de lombrices Cliteladas, Sub-cliteladas, Juveniles, Nº de Cápsulas, Nº Total de lombrices y Biomasa de lombrices).

3.3.3. Interpretación para los resultados

Si el valor de la probabilidad (Pr) es:

- ✓ $Pr > 0.05$ ns (No significativo)
- ✓ $Pr \leq 0.05$ * (Significativo al 5 %)
- ✓ $Pr \leq 0.01$ ** (Altamente significativo al 1%)

3.3.4. Croquis del Experimento

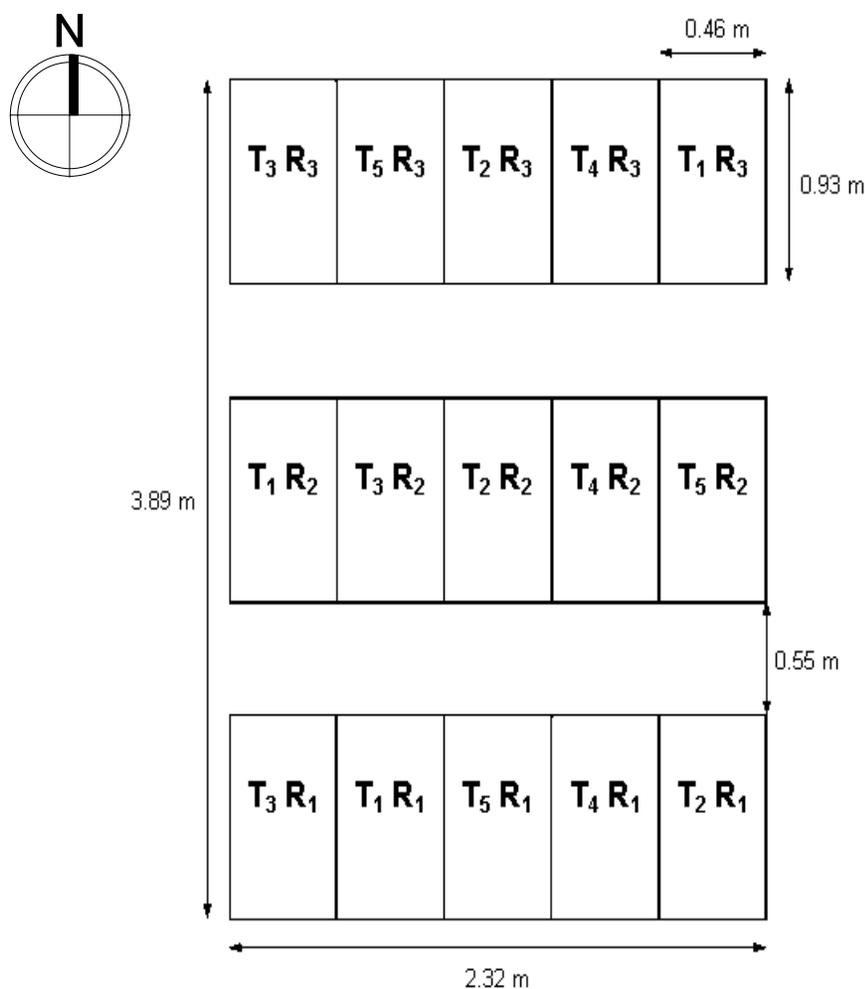


Figura 7. Croquis del experimento (Elaboración propia)

3.3.5. Tratamientos en estudio

Características de las unidades experimentales:

- T1-R1 (100 % residuos sólidos urbanos + 0 % estiércol de bovino)
 - T2-R1 (75 % residuos sólidos urbanos + 25 % estiércol de bovino)
 - T3-R1 (50 % residuos sólidos urbanos + 50 % estiércol de bovino)
 - T4-R1 (25 % residuos sólidos urbanos + 75 % estiércol de bovino)
 - T5-R1 (0 % residuos sólidos urbanos + 100 % estiércol de bovino)
-
- T1-R2 (100 % residuos sólidos urbanos + 0 % estiércol de bovino)
 - T2-R2 (75 % residuos sólidos urbanos + 25 % estiércol de bovino)
 - T3-R2 (50 % residuos sólidos urbanos + 50 % estiércol de bovino)
 - T4-R2 (25 % residuos sólidos urbanos + 75 % estiércol de bovino)
 - T5-R2 (0 % residuos sólidos urbanos + 100 % estiércol de bovino)
-
- T1-R3 (100 % residuos sólidos urbanos + 0 % estiércol de bovino)
 - T2-R3 (75 % residuos sólidos urbanos + 25 % estiércol de bovino)
 - T3-R3 (50 % residuos sólidos urbanos + 50 % estiércol de bovino)
 - T4-R3 (25 % residuos sólidos urbanos + 75 % estiércol de bovino)
 - T5-R3 (0 % residuos sólidos urbanos + 100 % estiércol de bovino)

3.3.6. Variables de respuesta

3.3.6.1. Variables físicas y químicas

- Temperatura

Se midió la temperatura del sustrato de cada sub-muestra con un geotermómetro; esta actividad se repitió cada 14 días y consistió en introducir el punzón del geotermómetro en el centro de la sub-muestra, y pasado los 5 min se obtuvo la temperatura del sustrato, el cual se registró en las planillas (Anexo 14).

- pH

Este dato se midió con un pH metro cada 14 días; se introdujo el electrodo del pH metro en el biolixiviado durante 5 min en cada muestra. Es importante resaltar que antes de introducir el electrodo del pH metro, se removió el biolixiviado con una varilla para homogenizar la disolución (Anexo 15).

- Conductividad eléctrica

Para la evaluación de esta variable se tomó muestras del biolixiviado (50 mL), cada 14 días los cuales fueron almacenados en un refrigerador a 0 °C; una vez finalizado el experimento se mandó todas las muestras al laboratorio de calidad ambiental (LCA-UMSA), para el análisis de conductividad eléctrica de los biolixiviados.

3.3.6.2. Variables biológicas

Se clasificó a las lombrices según a la edad y actividad reproductiva; luego se cuantificó por categorías (Anexo 17).

Las lombrices **Cliteladas**, son lombrices adultas en actividad reproductiva, las **Sub-cliteladas**, agrupa a las pre y post-cliteladas o lombrices que no están en actividad reproductiva y **Juveniles**, son lombrices jóvenes aproximadamente de 1.5 cm de medida y presentan una transparencia en las partes terminales del tubo digestivo (Schuldt, 2006).

En estas variables también se incluye el número de cápsulas, número total de lombrices y biomasa de lombrices de cada muestreo, el cual se determinó tomando una muestra al azar de cada una de las cajas (sub-muestras). El muestreo se realizó con un cilindro PVC de 10 cm de altura por 10 cm de diámetro; el peso promedio de la masa (sustrato) muestreada en el cilindro fue de 727 g (Anexo 16).

- Número de lombrices cliteladas

Esta variable se determinó tomando una muestra con el cilindro de la sub-muestra (caja), el cual se colocó sobre una mesa impermeabilizada y para poder cuantificarlas se separó las lombrices cliteladas del resto de la población.

- **Número de lombrices sub-cliteladas**

Una vez hecho el muestreo también se clasificó a las lombrices sub-cliteladas y se cuantificó la población de lombrices pertenecientes a esta categoría.

- **Número de lombrices juveniles**

Junto con el muestreo para las anteriores variables, también se clasificó y se cuantificó a las lombrices pertenecientes a esta categoría, para determinar la cantidad de lombrices juveniles existentes entre la población de lombrices (Anexo 19).

- **Número de cápsulas**

En cada muestra tomada de las sub-muestras existió una variable cantidad de cápsulas o cocones de lombrices, el cual se separó, cuantificó y se registró el número total de cápsulas, para poder evaluar la actividad reproductiva que existió en la población de lombrices (Anexo 18).

- **Número total de lombrices**

Luego de haber clasificado por categorías a las lombrices se sumó el número total de las lombrices (lombrices cliteladas, sub-cliteladas y juveniles), existentes en la muestra sacada con el cilindro de las sub-muestras.

- **Biomasa de las lombrices**

Después de haber cuantificado la población total de lombrices en una muestra, se procedió a pesar las lombrices en una balanza de precisión, para determinar la biomasa de lombrices muestreadas con el cilindro PVC.

3.3.6.3. Biomasa final de las lombrices

Al finalizar el experimento durante la cosecha de lombrices, se pesó en una balanza de precisión la biomasa las sub-muestras de todas las unidades experimentales y se determinó la biomasa final de cada tratamiento, el cual se comparó con la biomasa inoculada inicialmente (Anexo 20).

3.3.6.4. Volumen final de los biolixiviados

Esta variable se determinó una vez concluida la investigación; donde se procedió a medir con probetas de 1000 mL, el volumen total de los biolixiviados de cada tratamiento, que había percolado en las cajas impermeabilizadas de cada unidad experimental.

3.3.6.5. Características químicas del biolixiviado

Las muestras compuestas del biolixiviado se mandó al laboratorio Spectrolab de la Universidad Técnica de Oruro, donde analizaron los siguientes parámetros:

- **Macroelementos:** Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).
- **Microelementos:** Hierro (Fe), Cinc (Zn), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Sodio (Na), Cloro (Cl) y Boro (B).
- **pH final y Conductividad eléctrica final**
- **Metales pesados:** Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd).

3.3.6.6. Análisis económico

El análisis económico se realizó para evaluar la rentabilidad de los tratamientos en base al rendimiento, precio, costos de producción de los biolixiviados y la relación B/C.

- **Costos de producción**

Es la suma de los costos fijos más los costos variables que nos dará como resultado los costos totales o costos de producción.

$$CP = CF + CV$$

Dónde:

CP = Costos de producción

CF = Costos fijos

CV = Costos variables

- **Beneficio bruto**

Es el rendimiento ajustado multiplicado por el precio del biolixiviado; siendo que el rendimiento ajustado es igual al rendimiento menos el factor de corrección (10%).

$$B \text{ bruto} = R \text{ Aj} * P$$

$$R \text{ Aj} = R - Fc$$

Dónde:

B bruto = Beneficio bruto

R Aj = Rendimiento Ajustado

P = Precio

R = Rendimiento

Fc = Factor de corrección 10 %

El precio de los biolixiviados es de 20 Bs/L, dato que fue recopilado de la empresa BIOVEL, que está ubicado en el departamento de Cochabamba, es una empresa dedicada a la producción y comercialización de fertilizantes orgánicos y es la única empresa que produce lixiviados de vermicompost, a la cabeza de Juan Carlos Quiroga.

- **Beneficio neto**

Es la diferencia entre el beneficio bruto y los costos de producción.

$$\mathbf{B \text{ neto} = B \text{ bruto} - CP}$$

Dónde:

B neto = Beneficio neto

- **Relación Beneficio/Costo**

Esta variable económica se determinó en base a la relación B/C propuesta por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 1988) citado por (Meléndez y Huerta, 2010).

Si $B/C < 1$ Hay una pérdida de la inversión realizada.

Si $B/C = 1$ Solo se recupera lo invertido (no hay ganancias ni pérdidas).

Si $B/C > 1$ Hay una ganancia aparte de los costos de producción.

$$\mathbf{B/C = B \text{ bruto} / CP}$$

Dónde:

B/C = Relación beneficio costo

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Etapa de pre-compostaje

4.1.1. Temperatura

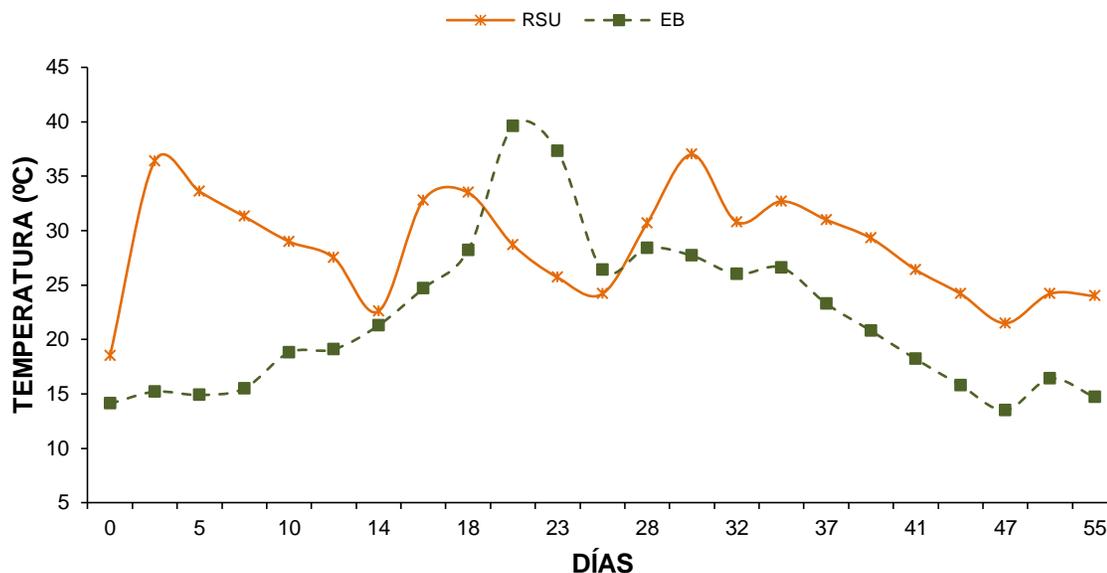


Figura 8. Comportamiento de la temperatura durante el pre-compostaje

El tiempo de pre-compostaje de los RSU y el EB fue de 55 días, durante este periodo se midió la temperatura cada 2 a 3 días.

En la Figura 8, se puede observar que el RSU presentó una temperatura variada, con una inicial de 19 °C que se elevó a 36 °C al tercer día y baja a 23 °C a los 14 días; finalmente a los 55 días registró 24 °C de temperatura. Al respecto, Velásquez (1997) citado por Paco (2007), indica que la influencia de la temperatura ambiental ocurre en una profundidad de 25 cm en pilas de compostaje; en el presente trabajo, la temperatura ambiente dentro del lombricario oscilaba entre 20 a 30 °C. Alcolea *et al.* (2000) citado por Paco (2007), mencionan que las variaciones de temperatura dependen del tipo de materia orgánica que se utiliza en el compostaje. Sin embargo, la variación de la temperatura en los RSU es debido al volteo y a la oxigenación que se realizó cada 2 semanas; en efecto de esta actividad, la temperatura se elevaba en un promedio de 33 °C y luego bajaba hasta los 24 °C de temperatura.

Durante el pre-compostaje del EB, no se hizo ningún volteo por lo cual en la Figura 8, se observa que la temperatura del EB presenta casi una curva normal, con una temperatura inicial de 14 °C, una máxima de 40 °C y 15 °C de temperatura al finalizar el pre-compostaje.

Con referencia al comportamiento de temperatura de los RSU y el EB durante el pre-compostaje, Paco (2007), indica que la etapa mesófila varía desde los 10 °C hasta los 45 °C de temperatura y es donde se destacan las fermentaciones facultativas de la flora mesofílica; también, menciona que la etapa termófila comienza desde los 40 °C hasta los 70 °C, en esta fase se sustituye la microflora mesófila por la termófila y es donde se elimina las enfermedades, pupas de insectos, semillas y otros.

4.2. Etapa de vermicompostaje

4.2.1. Evaluación de variables físicas y químicas

4.2.1.1. Temperatura

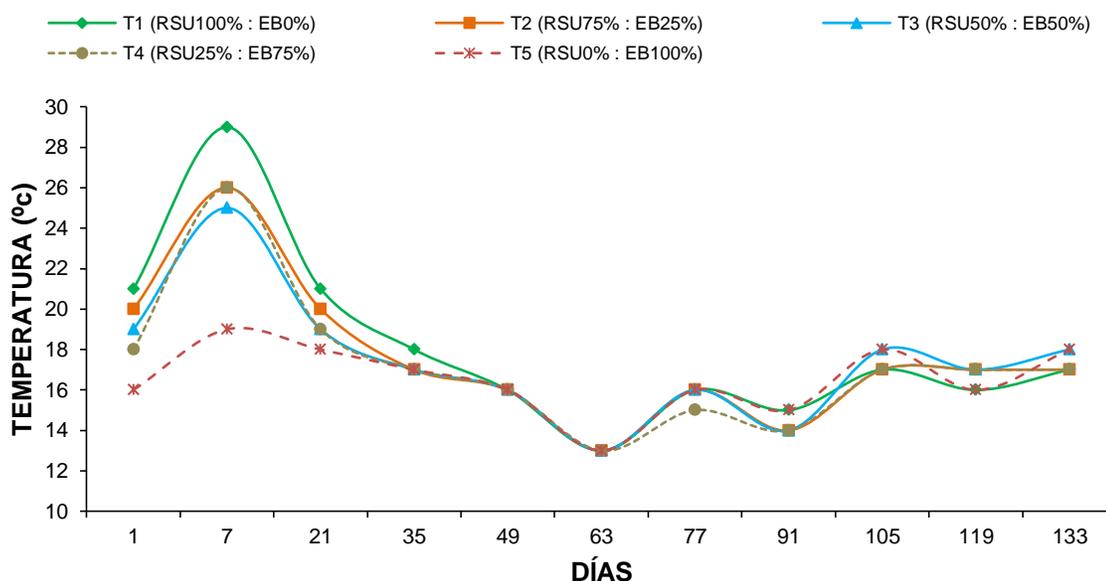


Figura 9. Comportamiento de la temperatura durante el vermicompostaje

En la Figura 9, se visualiza el comportamiento de la temperatura del sustrato durante el proceso de vermicompostaje que fue evaluado durante 133 días; al inicio del experimento, los tratamientos registraron los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 21 °C, T2

(75% RSU : 25% EB) 20 °C, T3 (50% RSU : 50% EB) 19 °C, T4 (25% RSU : 75% EB) 18 °C y T5 (0% RSU : 100% EB) 16 °C; a los 7 días, las temperaturas se elevaron presentando los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 29 °C, T2 (75% RSU : 25% EB) 26 °C, T3 (50% RSU : 50% EB) 25 °C, T4 (25% RSU : 75% EB) 26 °C y T5 (0% RSU : 100% EB) 19 °C y fueron las temperaturas más altas que registraron durante el proceso de vermicompostaje.

Con respecto al T1 (100% RSU : 0% EB), Paco (2007), obtuvo un promedio de 20.11 °C como temperatura inicial y en la 4^{ta} semana la temperatura se elevó a una máxima de 21.58 °C, durante el vermicompostaje de restos de cocina. En relación a la temperatura del T5 (0% RSU : 100% EB) a los 7 días, Sullcata (2014), observó una temperatura de 27.4 °C en el T1 (estiércol de ovino 100 %), durante el vermicompostaje de sustratos a base de estiércol y rastrojo de cebada.

Los tratamientos mostraron un comportamiento de temperatura casi uniforme, esto debido a que los sustratos estuvieron más expuestos a la temperatura ambiente, ya que se vermicompostó en cajas de plástico con orificios en la base y en los laterales (Anexo 6); a los 133 días, las temperaturas finales fueron: T1 (100% RSU : 0% EB) 17 °C, T2 (75% RSU : 25% EB) 17 °C, T3 (50% RSU : 50% EB) 18 °C, T4 (25% RSU : 75% EB) 17 °C y T5 (0% RSU : 100% EB) 18 °C.

En relación a la temperatura final del T1 (100% RSU : 0% EB), Paco (2007), obtuvo un promedio de 19.02 °C como temperatura final a las 14 semanas del vermicompostaje de restos de cocina. Por su parte, Carita (2014), obtuvo 19 °C en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) y T2 (HCR 50% : RSU 50%), como temperatura final en la biotransformación de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU).

Cuadro 11. Análisis de varianza para la temperatura

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Tratamiento | 4 | 20.59 | 5.15 | 6.77 | 0.0066 ** |
| Error Experimental | 10 | 7.60 | 0.76 | 0.70 | 0.7172 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 64.80 | 1.08 | | |
| Total | 74 | 92.99 | | | |
| Promedio (°C) | 17 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 % ; (ns) = No significativo

En el análisis de varianza (Cuadro 11), se puede observar que la probabilidad ($Pr > F$) es menor a 0.01 (0.0066), esto significa que estadísticamente la temperatura entre tratamientos fueron altamente diferentes. En el mismo cuadro, se visualiza que la diferencia de la temperatura entre sub-muestras en los tratamientos, no es significativo estadísticamente, ya que la probabilidad ($Pr > F$) fue mayor a 0.05 (0.7172).

El promedio general de la temperatura durante el proceso de vermicompostaje de RSU y EB fue de 17 °C. Comparativamente Paco (2007), obtuvo una media general de 19.65 °C durante el vermicompostaje de pulpa de café, restos de cocina y cartón.

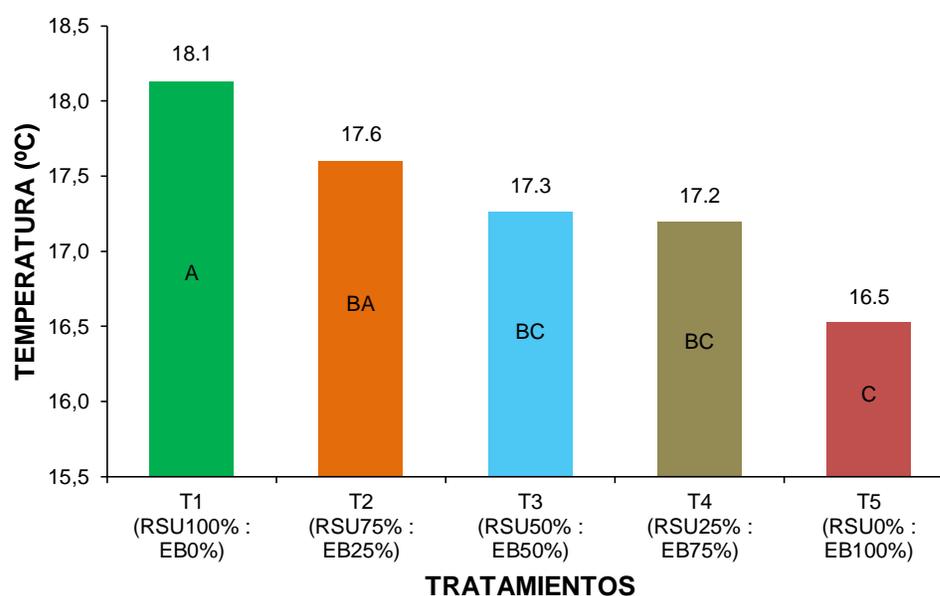


Figura 10. Prueba de Duncan para la temperatura

La prueba de medias de Duncan (Figura 10), demostró diferencias estadísticas entre los tratamientos. Se puede observar que en el T1 (100% RSU : 0% EB) se tuvo un promedio de 18.1 °C y es la temperatura más alta en comparación con el T2 (75% RSU : 25% EB), T3 (50% RSU : 50% EB), T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB); al respecto, Ferruzzi (1994), menciona que la lombriz roja californiana puede sobre vivir en temperaturas entre 4 °C a 30 °C, debido a su característica epigea, aunque ambos extremos no son aptos para la reproducción de estos anélidos. Por su parte, Schuldt (2006), indica que en una temperatura de 14 °C a 27 °C, hay una buena actividad reproductiva de las lombrices.

4.2.1.2. pH

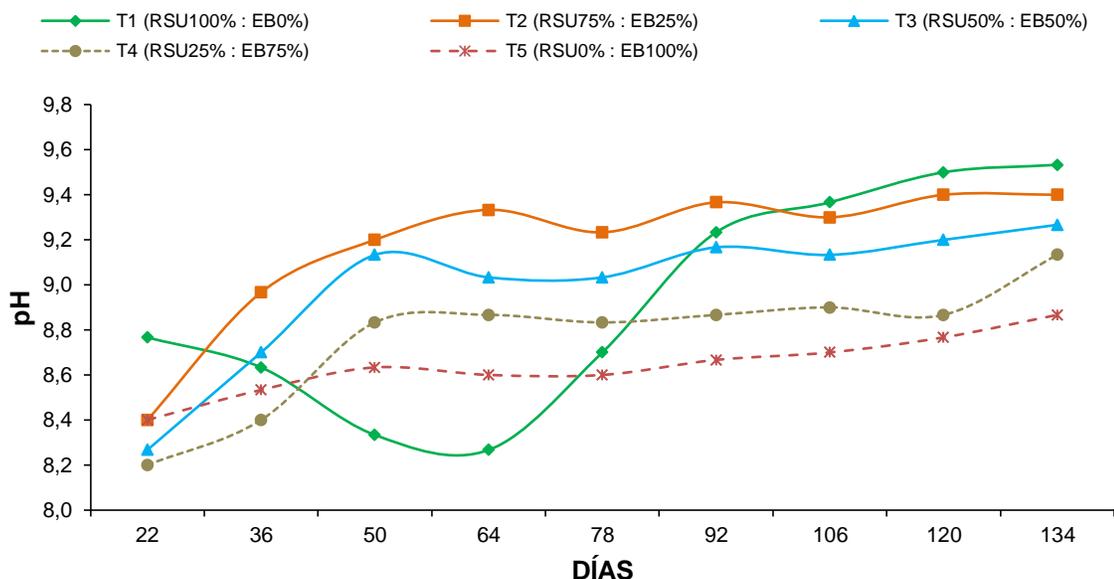


Figura 11. Comportamiento del pH

En la Figura 11, se muestra el comportamiento del pH en los biolixiviados durante el vermicompostaje de RSU combinados con EB; esta variable se midió cada 14 días, desde el día 22 hasta el día 134; al comienzo del experimento los tratamientos registraron los siguientes datos: T1 (100% RSU : 0% EB) 8.8, T2 (75% RSU : 25% EB) 8.4, T3 (50% RSU : 50% EB) 8.3, T4 (25% RSU : 75% EB) 8.2 y T5 (0% RSU : 100% EB) 8.4. En todo el proceso de biolixiviación se registró un comportamiento del pH, desde medianamente alcalino hasta fuertemente alcalino; esto se interpretó según el esquema de pH del suelo de Truog (1946) (Anexo 22).

Los valores finales de pH a los 134 días fueron los siguientes: T1 (100% RSU : 0% EB) 9.5, T2 (75% RSU : 25% EB) 9.4, T3 (50% RSU : 50% EB) 9.3, T4 (25% RSU : 75% EB) 9.1 y T5 (0% RSU : 100% EB) 8.9. Con respecto al comportamiento de pH del T1 (100% RSU : 0% EB) desde los 36 hasta los 92 días, Capistrán *et al.* (2004) citado por Acosta *et al.* (2012), indican que las posibles condiciones anaeróbicas en el sustrato, dan lugar a la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta, que originan el descenso del pH.

En relación al comportamiento de pH del T5 (0% RSU : 100% EB) a los 22 días, Chura (2010), indica que registró 8.97 como pH inicial en el TI (E. Bovino), durante el proceso de

vermicompostaje de estiércoles de 5 Sp. (especies) de ganado; asimismo Chaves y Fuentes (2013), obtuvieron un promedio pH de 9.4 en la primera semana y un pH de 9.3 en la quinta semana de evaluación de lixiviados del vermicompostaje de estiércol de bovino.

Cuadro 12. Análisis de varianza para el pH

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|--------------------|-----|------|-------|------|-----------|
| Tratamiento | 4 | 0.46 | 0.115 | 6.39 | 0.0081 ** |
| Error Experimental | 10 | 0.18 | 0.018 | | |
| Total | 14 | 0.64 | | | |
| Promedio | 8.9 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 %

En el Cuadro 12, se puede observar que la probabilidad (Pr>F) de que el pH de los biolixiviados entre los tratamientos hubiesen sido iguales, fue inferior a 0.01 (0.0081), esto significa que la diferencia del pH entre tratamientos fueron altamente significativos estadísticamente. La media general del pH fue de 8.9.

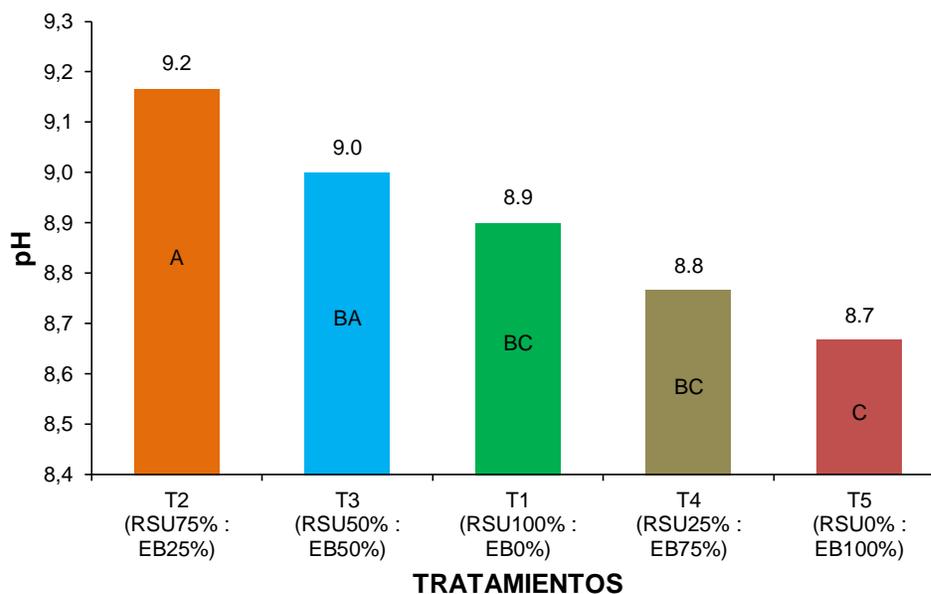


Figura 12. Prueba de Duncan para el pH

Tal como se observa en la Figura 12, en el T2 (75% RSU : 25% EB) se obtuvo una media de 9.2 y es el valor pH más alto seguido por el T3 (50% RSU : 50% EB), T1 (100% RSU :

0% EB), T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB); la reacción alcalina del pH, en el biolixiviado de los tratamientos combinados con mayores proporciones de RSU, se debe a que el sustrato de estos tratamientos estuvo mezclado con residuos domiciliarios, que contenían huesos, carnes y restos de sal de mesa altamente solubles al agua.

Por su parte, Bollo (2001) citado por Acosta *et al.* (2012), menciona que las lombrices secretan carbonato de calcio por las glándulas de Morren, que inducen a alcalinizar el material donde habita la lombriz. Además, Serrano (2004), menciona que la alcalinización puede atribuirse a la elevada concentración de sales disueltas en el agua de riego. De la misma manera, Mamani *et al.* (2012), señalan que la reacción alcalina se debe a la presencia de elementos alcalinizantes que poseen los residuos domésticos, tales como sales y el amonio liberado durante la fermentación de residuos ricos en nitrógeno.

En comparación con el T1 (100% RSU : 0% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB), Saavedra (2007), indica que el pH del alperujo biodegradado por la *E. foetida* tiende a aumentar hasta valores máximos de 8.6. Relacionado a esta situación, López *et al.* (2013), registraron un promedio pH de 9.7 en el vermicompost del T1 (Rastrojos de frijol combinado con estiércol bovino); también, mencionan que un pH superior a 9.5 afecta negativamente en el desarrollo, reproducción y actividad de las lombrices.

Con respecto al pH del T5 (0% RSU : 100% EB), Chura (2010), indica que el vermicompost de estiércol de bovino, tiene un pH de 7.52. Además, Carrillo (2013), obtuvo un promedio pH de 8.09 en el T1 (Estiércol de bovino, ovino + rastrojos agrícolas), durante el vermicompostaje de sustratos orgánicos procedentes de baños ecológicos y estiércol animal.

Es evidente entonces que la reacción alcalina del pH en los biolixiviados, se debe a un incremento de pH en el sustrato por efecto de los elementos alcalinizantes producidos por los diferentes factores, que pudieron ser percolados en los biolixiviados por el riego aplicado al sustrato, durante el proceso del vermicompostaje.

4.2.1.3. Conductividad eléctrica

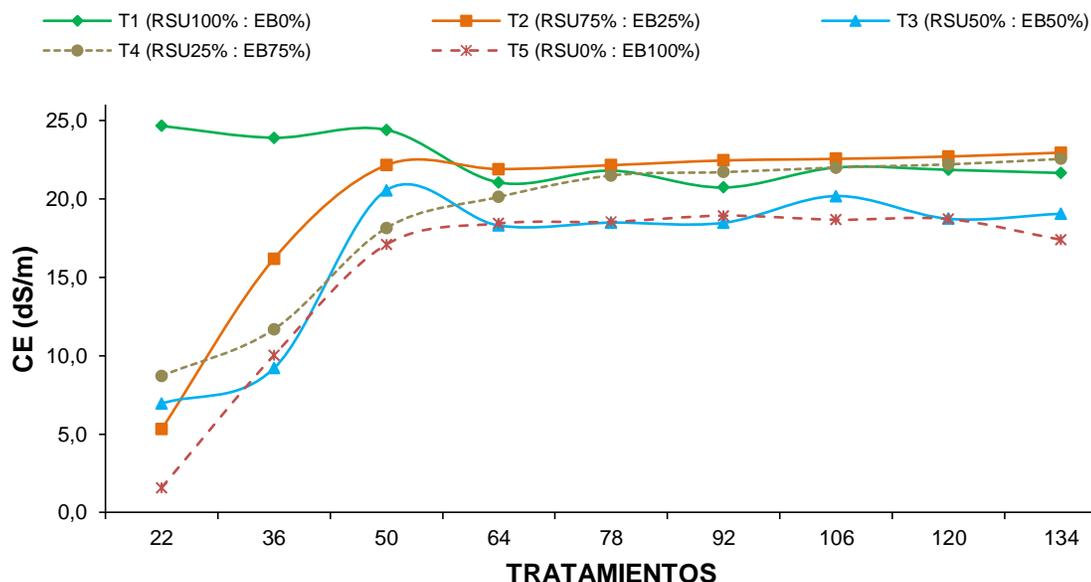


Figura 13. Comportamiento de la conductividad eléctrica

En la Figura 13, se observa el comportamiento de la conductividad eléctrica de los biolixiviados, esta variable se registró cada 14 días; al inicio del experimento los tratamientos mostraron los siguientes valores: T1 (100% RSU : 0% EB) 24.7 dS/m, T2 (75% RSU : 25% EB) 5.3 dS/m, T3 (50% RSU : 50% EB) 6.9 dS/m, T4 (25% RSU : 75% EB) 8.7 dS/m y T5 (0% RSU : 100% EB) 1.6 dS/m; a los 50 días se observa un incremento de la conductividad en la mayoría de los tratamientos con excepción del T1 (100% RSU : 0% EB), donde a los 64 días reduce a 21.1 dS/m; a partir de este día se observa un comportamiento uniforme; una vez concluida el experimento se obtuvo los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 21.7 dS/m, T2 (75% RSU : 25% EB) 23.0 dS/m, T3 (50% RSU : 50% EB) 19.1 dS/m, T4 (25% RSU : 75% EB) 22.6 dS/m y T5 (0% RSU : 100% EB) 17.4 dS/m.

Al respecto de esta situación, García *et al.* (2005) citados por Sánchez *et al.* (2014), indican que la salinidad de los residuos domiciliarios es elevada, debido a que el contenido de calcio, magnesio, sodio y potasio, es más alto en los residuos de carne y pescado, que pueden estar mezclados con los residuos vegetales. La sal común utilizada en los procesos de cocinado de los alimentos, también contribuye a incrementar la salinidad de estos residuos.

En relación al T1 (100% RSU : 0% EB), Mamani *et al.* (2012), obtuvieron 8 dS/m en el análisis químico del vermicompost de restos de cocina, el cual consideran fuertemente salino.

Cuadro 13. Análisis de varianza para la conductividad eléctrica

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-----------|
| Tratamiento | 4 | 88.47 | 22.12 | 53.00 | <.0001 ** |
| Error Experimental | 10 | 4.17 | 0.42 | | |
| Total | 14 | 92.64 | | | |
| Promedio (dS/m) | 18.6 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 %

El análisis de varianza (Cuadro 13), demostró que hubo diferencias altamente significativas de conductividad eléctrica entre los tratamientos, siendo que el valor de la probabilidad (Pr>F) fue inferior a 0.01. El promedio general para la conductividad eléctrica fue de 18.6 dS/m.

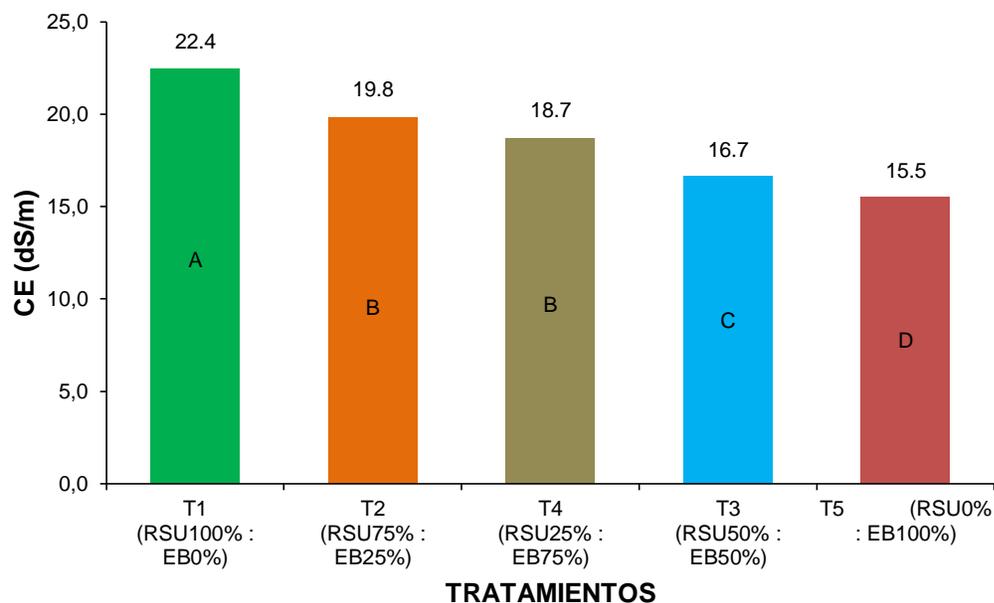


Figura 14. Prueba de Duncan para la conductividad eléctrica

Los niveles de concentración de sales en los biolixiviados, se pueden visualizar en la Figura 14, donde los promedios de Duncan, demostraron que existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos. El promedio más alto se obtuvo en el T1 (100% RSU :

0% EB) con 22.4dS/m, seguido por el T2 (75% RSU : 25% EB), T4 (25% RSU : 75% EB), T3 (50% RSU : 50% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB). La salinidad en el biolixiviado de los tratamientos con mayores proporciones de RSU, es más alto que en el T5 (0% RSU : 100% EB) que estuvo compuesto por EB al 100 %. Al respecto, Edwards (1988) citado por Nogales *et al.* (2014), menciona que un residuo orgánico con valores de conductividad eléctrica superiores a 8 dS/m, tendría un contenido de sales letal.

En relación al tratamiento T5 (0% RSU : 100% EB), Benítez *et al.* (1996), obtuvieron 7.7 dS/m en el análisis químico de lixiviados del proceso de vermicompostaje de estiércol de ovino. Por su parte, Carita (2014), obtuvo 12.7 dS/m de conductividad eléctrica en el T2 (HCR 50% : RSU 50%), en la biotransformación de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU).

Considerando el criterio de los anteriores autores, se interpreta que la conductividad eléctrica de los biolixiviados, es fuertemente salino, que puede ser a causa de las sales presentes en los RSU, en el agua que se utilizó como riego y el carbonato de calcio segregado por las lombrices durante el vermicompostaje.

4.2.2. Evaluación de variables biológicas

4.2.2.1. Número de lombrices cliteladas

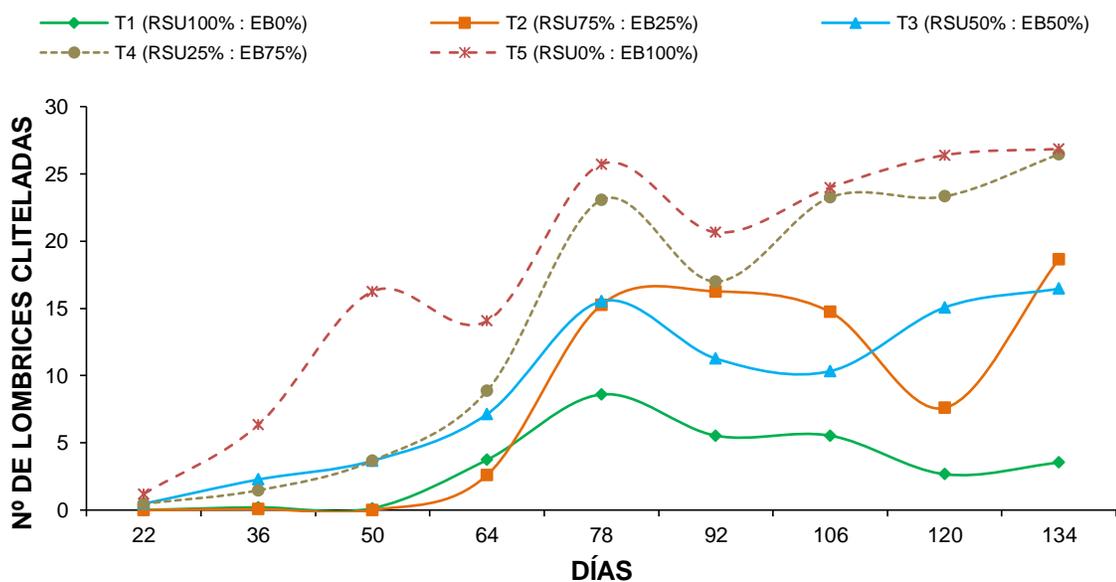


Figura 15. Evolución del número de lombrices cliteladas

La evolución de lombrices cliteladas durante el proceso de vermicompostaje de diferentes proporciones de RSU y EB se puede observar en la Figura 15, esta variable se evaluó cada 14 días, durante 134 días; al comienzo del experimento no se encontró ninguna lombriz en la mayoría de los tratamientos, con excepción del T5 (0% RSU : 100% EB) donde se obtuvo un promedio de 1 individuo; en el T1 (100% RSU : 0% EB) el mayor número de lombrices cliteladas se registró a los 78 días con un promedio de 9 individuos y al finalizar el experimento descendió a 4 lombrices. Con respecto a los demás tratamientos, el mayor número de lombrices se alcanzó a los 134 días con los siguientes promedios: T2 (75% RSU : 25% EB) 19 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 16 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 26 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) 27 individuos.

Al respecto, Serrano (2004), observó que las proporciones del T3 (R 50% : E 50%) y T4 (R 67% : E 33%), no favorecieron en el desarrollo de las lombrices adultas en los procesos de vermicompostaje de residuos orgánicos (R) combinados con estiércol de vacuno (E). Por su parte, Pardini *et al.* (2008), obtuvieron 15 lombrices cliteladas a los 28 días, la relación del sustrato fue 1/1 (Lodo 50% : Hojarasca 50%) y en la relación 5/1 (Lodo 83% : Hojarasca 17%) registraron 22 lombrices cliteladas a los 63 días; en el vermicompostaje de lodos de una industria papelera.

Con respecto al T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB) a los 106 días, Sullcata (2014), obtuvo 7 individuos adultos en el T1 (Estiércol de Ovino 100%) y 15 individuos adultos en el T2 (estiércol de ovino 75% + rastrojo de cebada 25%) a los 113 días, del vermicompostaje de estiércol de ovino mezclados con rastrojos de cebada.

Cuadro 14. Análisis de varianza para el número de lombrices cliteladas

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|-----------------------|----|----------|--------|------|-----------|
| Tratamiento | 4 | 1854.59 | 463.65 | 5.81 | 0.0111 * |
| Error Experimental | 10 | 798.00 | 79.80 | 0.46 | 0.9090 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 10410.00 | 173.50 | | |
| Total | 74 | 13062.59 | | | |
| Promedio (Individuos) | 11 | | | | |

(*) = Significativo al 5 % ; (ns) = No significativo

En el Cuadro 14, se observa que la F calculada (Fc) fue mayor a la probabilidad (Pr>F) y este fue menor a 0.05 (0.0111), lo cual nos indica que el número de lombrices cliteladas

entre los tratamientos fueron diferentes estadísticamente. La diferencia del número de lombrices cliteladas entre sub-muestras en los tratamientos, estadísticamente no tuvo significancia, ya que la probabilidad fue mayor a 0.05 (0.9090). La media general para esta variable fue de 11 individuos. Al respecto, Carita (2014), encontró un promedio general de 3 lombrices cliteladas, en el vermicompostaje de hojas de coca residual acondicionados con residuos sólidos urbanos.

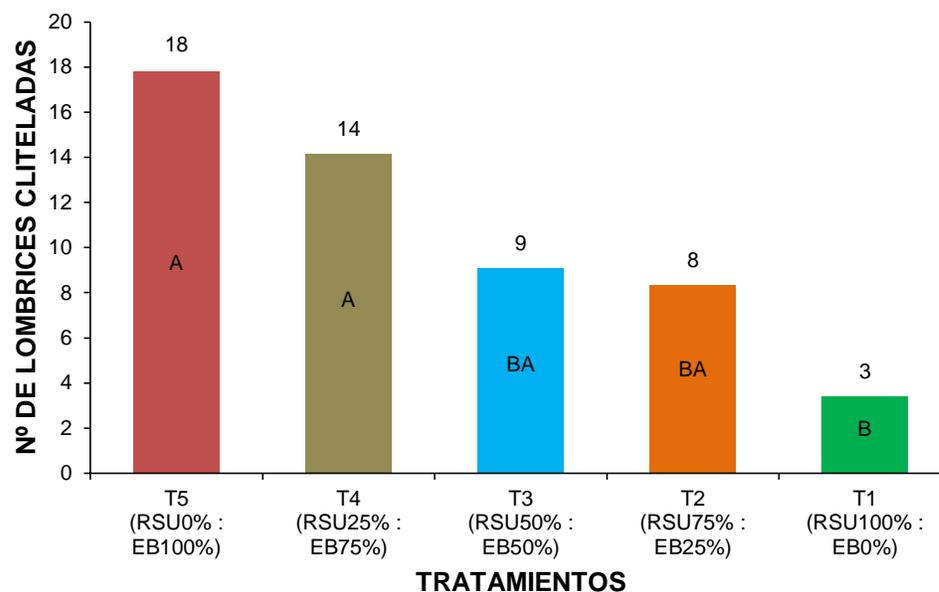


Figura 16. Prueba de Duncan para el número de lombrices cliteladas

En la Figura 16, se puede observar que la prueba de medias de Duncan demostró que, las proporciones de RSU y EB utilizados en el proceso de vermicompostaje, tuvieron efectos en la evolución del número de lombrices cliteladas; los tratamientos donde se obtuvo los mayores promedios fueron en el T5 (0% RSU : 100% EB) 18 individuos y T4 (25% RSU : 75% EB) con 14 individuos, en estos tratamientos la mayor proporción del alimento de las lombrices estuvo conformado por EB; sin embargo, en el T3 (50% RSU : 50% EB), T2 (75% RSU : 25% EB), y T1 (100% RSU : 0% EB) los promedios están por debajo de 9 individuos, debido a que en estos tratamientos la mayor parte del alimento estaba compuesto por residuos sólidos urbanos. Al respecto, Sánchez (2003), menciona que la lombriz entra en actividad reproductiva siempre que las condiciones del sustrato sean favorables, se requiere un pH neutro y una temperatura de 19 a 20 °C.

En relación al T1 (100% RSU : 0% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Mamani *et al.* (2012), obtuvieron promedios de 19 lombrices cliteladas en el vermicompostaje de restos de cocina (RC) y 14 lombrices cliteladas en el vermicompostaje de estiércol de vacuno (EV), en condiciones de carpa solar.

4.2.2.2. Número de lombrices sub-cliteladas

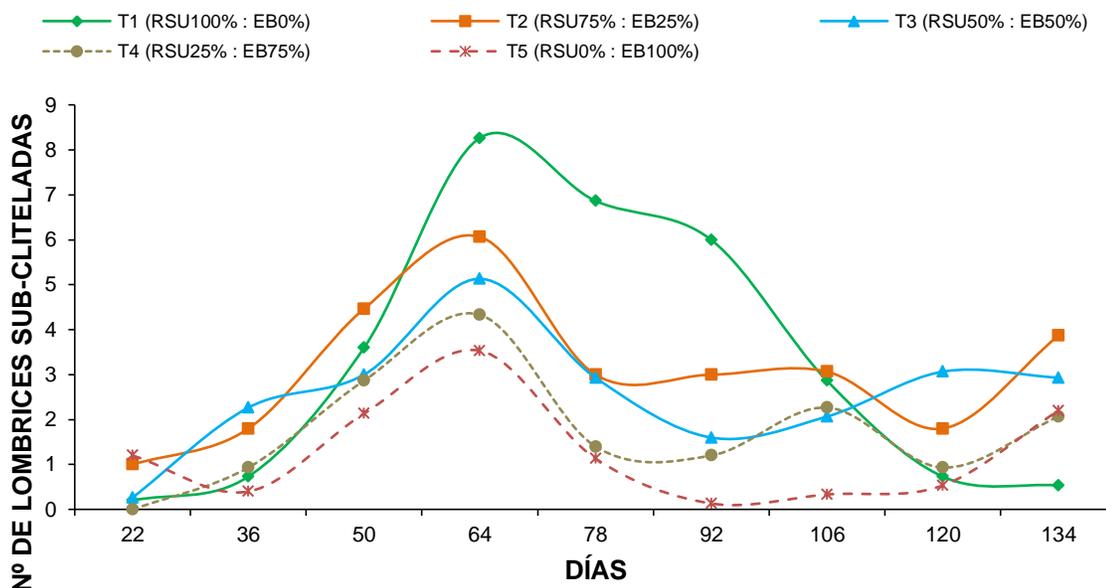


Figura 17. Evolución del número de lombrices sub-cliteladas

La Figura 17, muestra la evolución del número de lombrices sub-cliteladas en los tratamientos del proceso de vermicompostaje; al inicio del experimento no se encontró lombrices sub-cliteladas en la mayoría de los tratamientos, excepto en el T2 (75% RSU : 25% EB) donde se obtuvo 1 individuo y en el T5 (0% RSU : 100% EB), se obtuvo de la misma manera 1 individuo. El mayor número de lombrices sub-cliteladas se registró a los 64 días con los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 8 individuos, T2 (75% RSU : 25% EB) 6 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 5 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 4 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) 4 individuos; al concluir el experimento a los 134 días, hubo un descenso del número de lombrices sub-cliteladas donde solo se registró los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 1 individuo, T2 (75% RSU : 25% EB) 4 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 3 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 2 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) 2 individuos.

En comparación con el T2 (75% RSU : 25% EB) y T3 (50% RSU : 50% EB) a los 64 días, Carita (2014), obtuvo 6 lombrices sub-cliteladas en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) y 4 lombrices sub-cliteladas en el T2 (HCR 50% : RSU 50%), a los 60 días del vermicompostaje de hojas de coca residual (HCR) y residuos sólidos urbanos (RSU).

Cuadro 15. Análisis de varianza para el número de lombrices sub-cliteladas

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|-----------------------|----|--------|-------|------|-----------|
| Tratamiento | 4 | 45.47 | 11.37 | 3.67 | 0.0433 * |
| Error Experimental | 10 | 30.93 | 3.09 | 0.36 | 0.9605 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 521.60 | 8.69 | | |
| Total | 74 | 598.00 | | | |
| Promedio (Individuos) | 2 | | | | |

(*) = Significativo al 5 % ; (ns) = No significativo

En el análisis de varianza (Cuadro 15), se observa que la probabilidad ($Pr > F$) fue menor a 0.05 (0.0433), esto significa que hubo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, en la evolución de lombrices sub-cliteladas. En cuanto al número de lombrices sub-cliteladas entre las sub-muestras, la probabilidad fue mayor a 0.05 (0.9090); esto nos indica que, no existieron diferencias estadísticas. El promedio general del número de lombrices sub-cliteladas fue de 2 individuos.

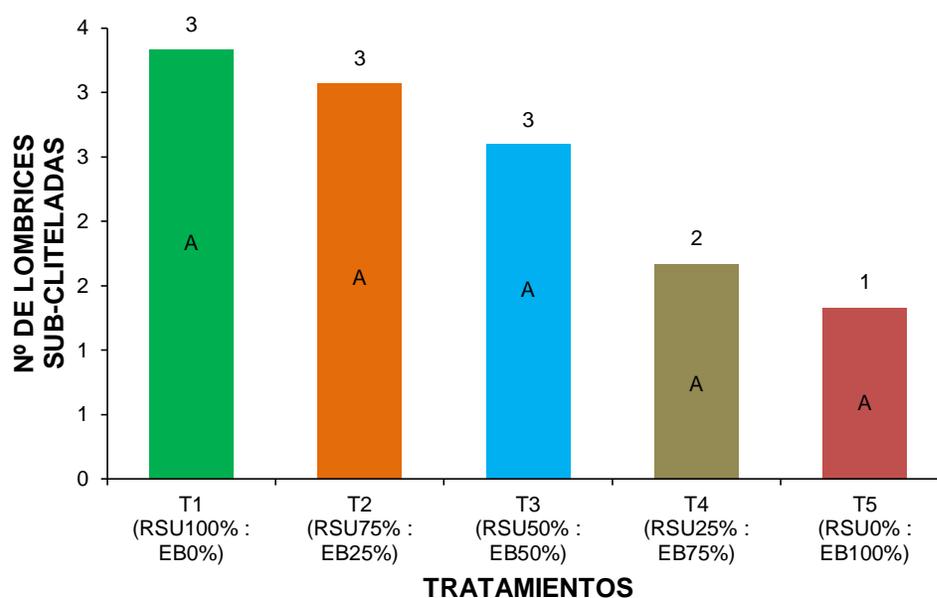


Figura 18. Prueba de Duncan para el número de lombrices sub-cliteladas

La prueba de medias de Duncan (Figura 18), mostró que solo hubo diferencias estadísticas entre algunos tratamientos; fue así que el T1 (100% RSU : 0% EB), T2 (75% RSU : 25% EB) y T3 (50% RSU : 50% EB), solo registraron un promedio de 3 individuos; seguidos por el T4 (25% RSU : 75% EB) con 2 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) con 1 individuo.

En esta categoría se consideró a las lombrices pre-cliteladas y post-cliteladas. Con respecto a esta situación, Reinecke (1990) citado por Schuldt (2006), indica que lombrices post-cliteladas no son diferenciables de los pre-cliteladas, en si las lombrices de gran talla y sin clitelo pertenecen al grupo de las pos-cliteladas a pesar que presentan el peso y la talla de adquisición del clitelo; en este mismo sentido Schuldt (2006), argumenta que la condición de post-cliteladas o post-reproductivos es reversible.

En relación al T1 (100% RSU : 0% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Mamani *et al.* (2012), obtuvieron promedios de 123 lombrices sub-cliteladas durante el vermicompostaje del estiércol de vacuno (EV) y 16 lombrices sub-cliteladas en el vermicompostaje de los restos de cocina (RC), en condiciones de carpa solar.

4.2.2.3. Número de lombrices juveniles

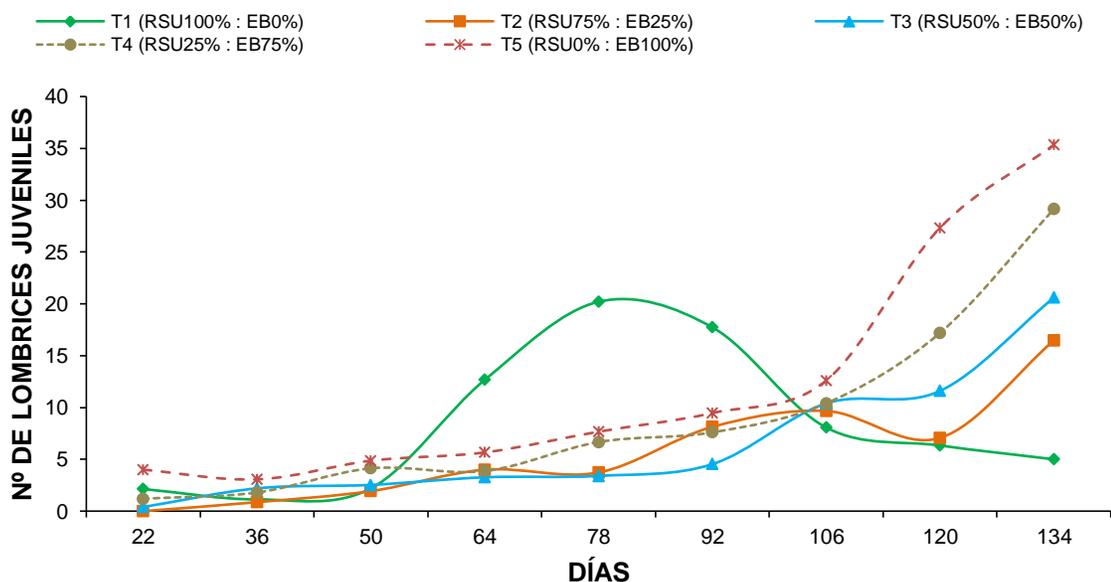


Figura 19. Evolución del número de lombrices juveniles

En la Figura 19, se observa la evolución del número de lombrices juveniles durante el proceso de vermicompostaje de RSU y EB; al comenzar el experimento se obtuvo los siguientes datos: T1 (100% RSU : 0% EB) 2 individuos, T2 (75% RSU : 25% EB) 0 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 0 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 1 individuo y T5 (0% RSU : 100% EB) 4 individuos; posteriormente se observó una evolución de lombrices juveniles casi uniforme hasta el día 78, donde el T1 (100% RSU : 0% EB) incrementó a un promedio de 20 individuos juveniles; los demás tratamientos mantuvieron una evolución ascendente hasta finalizar el experimento, con los siguientes promedios: T2 (75% RSU : 25% EB) 16 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 21 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 29 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) 35 individuos.

Todos los tratamientos finalizaron con una evolución ascendente con excepción del T1 (100% RSU : 0% EB) que presentó valores descendentes, esto debido a las condiciones inadecuadas que surgieron en el sustrato (reducción de volumen del sustrato en las cajas, pH alcalino y exceso de concentración de sales).

En relación comparativa con el T3 (50% RSU : 50% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB) a los 134 días, Serrano (2004), encontró 18 lombrices juveniles en el T2 (R 0% : E 100%) y 6 lombrices juveniles en el T3 (R 50% : E 50%), en la décima octava semana del vermicompostaje de residuos orgánicos (R) combinados con estiércol de vacuno (E). Por su parte, Sullcata (2014), registró un promedio de 3 lombrices juveniles en el T1 (estiércol de ovino 100%) y 6 lombrices juveniles en el T3 (estiércol de ovino 50% + rastrojo de cebada 50%), a los 113 días del vermicompostaje de estiércol de ovino mezclado con rastrojos de cebada.

Cuadro 16. Análisis de varianza para el número de lombrices juveniles

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Tratamiento | 4 | 392.35 | 98.09 | 6.06 | 0.0096 ** |
| Error Experimental | 10 | 161.73 | 16.17 | 0.28 | 0.9837 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 3487.20 | 58.12 | | |
| Total | 74 | 4041.28 | | | |
| Promedio (Individuos) | 8 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 % ; (ns) = No significativo

En el Cuadro 16, se puede observar el analisis de varianza, donde demostró que la probabilidad (Pr>F) fue menor a 0.01(0.0096), el cual nos indica que hubo diferencias

estadísticas altamente significativas entre los tratamientos, en la evolución de lombrices juveniles. En cuanto al número de lombrices juveniles entre las sub-muestras, la probabilidad ($Pr > F$) fue mayor a 0.05 (0.9837), esto significa que no existieron diferencias estadísticas. El promedio general para esta variable, fue de 8 lombrices juveniles.

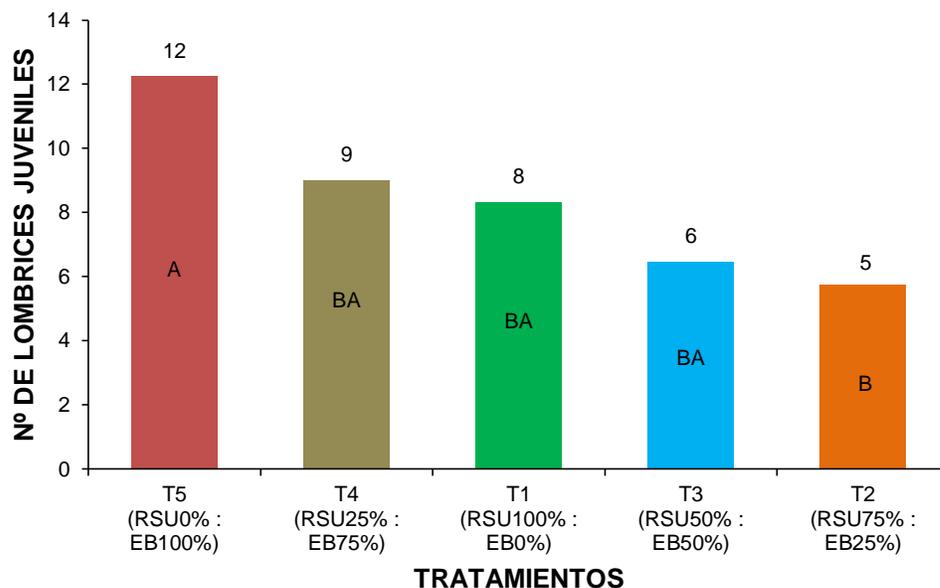


Figura 20. Prueba de Duncan para el número de lombrices juveniles

En la Figura 20, se visualiza que la prueba de medias de Duncan, demostró diferencias estadísticas en el número de lombrices juveniles entre los tratamientos; es así que en el T5 (0% RSU : 100% EB) se obtuvo una media de 12 individuos juveniles, T4 (25% RSU : 75% EB) 9 individuos juveniles, T1 (100% RSU : 0% EB) 8 individuos juveniles, T3 (50% RSU : 50% EB) 6 individuos juveniles, por último en el T2 (75% RSU : 25% EB) se encontró una media de 5 individuos juveniles. Al respecto, Acosta *et al.* (2012), obtuvieron un promedio de 8 lombrices juveniles, en el vermicompostaje de residuos organodomeísticos. Por su parte, Carita (2014), obtuvo 13 lombrices juveniles en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) y 12 lombrices juveniles en el T2 (HCR 50% : RSU 50%), en el vermicompostaje de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU).

4.2.2.4. Número de cápsulas

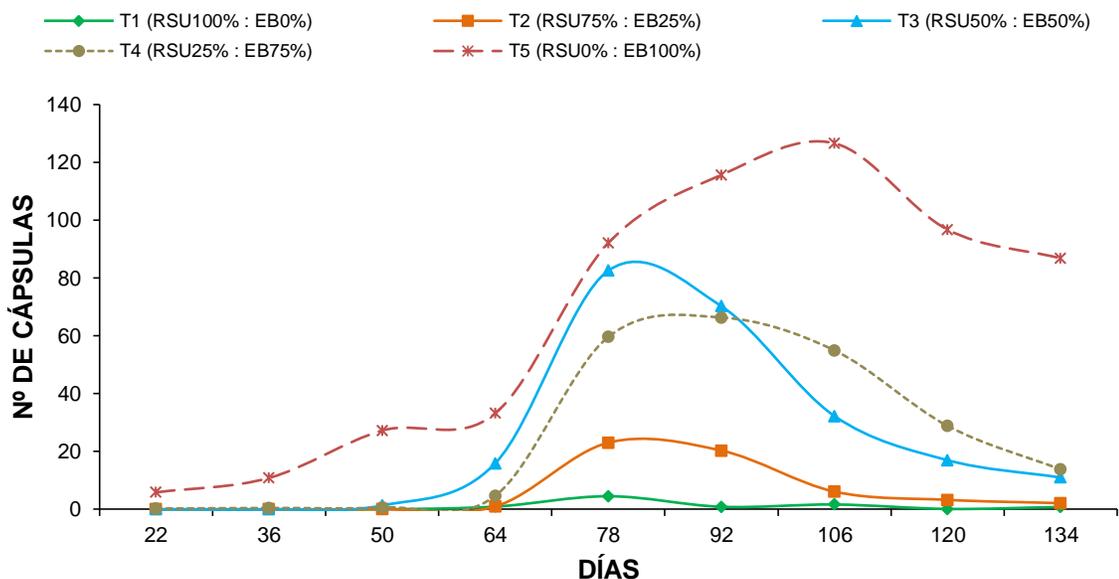


Figura 21. Evolución del número de cápsulas

La producción de cápsulas o cocones en los sustratos en proceso de vermicompostaje (Figura 21), al inicio del experimento no sufrió amplias variaciones hasta los 64 días, donde se obtuvo los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 1 cápsula, T2 (75% RSU : 25% EB) 1 cápsula, T3 (50% RSU : 50% EB) 16 cápsulas, T4 (25% RSU : 75% EB) 5 cápsulas y T5 (0% RSU : 100% EB) 33 cápsulas; el mayor número de cápsulas presentes en los tratamientos es variado, siendo así que en el T1 (100% RSU : 0% EB) con un promedio de 5 cápsulas, T2 (75% RSU : 25% EB) 23 cápsulas y T3 (50% RSU : 50% EB) 83 cápsulas, se obtuvo a los 78 días, en el T4 (25% RSU : 75% EB) se registró 66 cápsulas a los 92 días y en el T5 (0% RSU : 100% EB) se obtuvo 127 cápsulas a los 106 días.

La producción de cápsulas disminuyó paulatinamente hasta finalizar el experimento con promedios de: T1 (100% RSU : 0% EB) 1 cápsula, T2 (75% RSU : 25% EB) 2 cápsulas, T3 (50% RSU : 50% EB) 11 cápsulas, T4 (25% RSU : 75% EB) 14 cápsulas y T5 (0% RSU : 100% EB) 87 cápsulas.

En relación al T1 (100% RSU : 0% EB), T3 (50% RSU : 50% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Serrano (2004), obtuvo en el T3 (R 50% : E 50%) 48 cápsulas en la segunda semana

y en el T2 (R 0% : E 100%) 566 cápsulas en la cuarta semana del vermicompostaje de residuos orgánicos (R) combinados con estiércol de vacuno (E). Sin embargo, Choque (2010), encontró 8 cápsulas a los 7 días y 37 cápsulas a los 49 días durante el vermicompostaje de estiércol de bobino (TB). En este mismo sentido, Mamani *et al.* (2012), obtuvieron un promedio de 45 cápsulas en la novena semana del vermicompostaje de restos de cocina (RC) y 67 cápsulas en la sexta semana del vermicompostaje de estiércol de vacuno (EV), en condiciones de carpa solar.

En comparación con el número de cápsulas en el T3 (R 50% : E 50%) a los 78 días y T4 (25% RSU : 75% EB) a los 106 días, Sullcata (2014), encontró 32 cocones en el T3 (estiércol de ovino 50% + rastrojo de cebada 50%) a los 71 días y 41 cocones en el T2 (estiércol de ovino 75% + rastrojo de cebada 25%) a los 113 días, del vermicompostaje de estiércol de ovino y rastrojos de cebada.

Cuadro 17. Análisis de varianza para el número de cápsulas

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Tratamiento | 4 | 39253.95 | 9813.49 | 22.66 | <.0001 ** |
| Error Experimental | 10 | 4330.53 | 433.05 | 0.12 | 0.9994 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 208423.60 | 3473.73 | | |
| Total | 74 | 252008.08 | | | |
| Promedio (Unidades) | 25 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 % ; (**ns**) = No significativo

De acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 17), el número de cápsulas entre los tratamientos, estadísticamente fue diferente y altamente significativo, ya que la probabilidad ($Pr > F$) a sido menor a 0.01. En cuanto al número de cápsulas entre sub-muestras, la probabilidad ($Pr > F$) fue mayor a 0.05 (0.9994), esto indica que, estadísticamente no existieron diferencias en tre las sub-muestras. La media general del análisis de esta variable, fue de 25 unidades o capsulas.

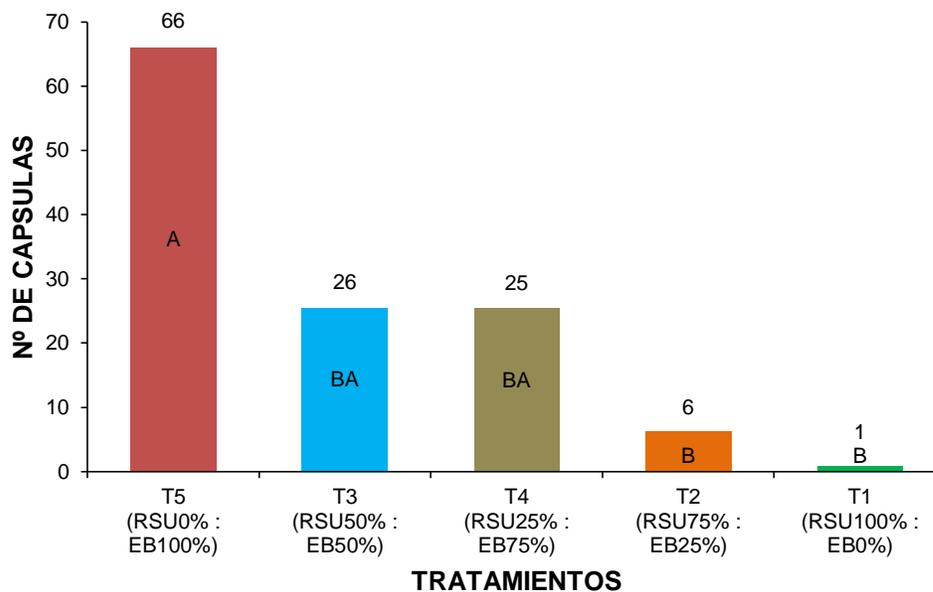


Figura 22. Prueba de Duncan para el número de cápsulas

La Figura 22, muestra que según a la prueba de medias de Duncan, existió diferencias estadísticas en el número de cápsulas presentes en los sustratos de vermicompostaje de RSU y EB; los tratamientos donde se obtuvo el mayor número de cápsulas o cocones fueron en el T5 (0% RSU : 100% EB) con 66 cápsulas, T4 (25% RSU : 75% EB) 26 cápsulas y T3 (50% RSU : 50% EB) con 25 cápsulas, seguido por el T2 (75% RSU : 25% EB) 6 capsulas y T1 (100% RSU : 0% EB) 1 capsula. En relación a este realidad, Bollo (2001) citado por Cano y Goff (2006), señala que la calidad del alimento influye en gran medida en la reproducción de las lombrices, puesto que si se suministra alimentos maduros con mayor tiempo de descomposición y buena calidad, aumenta la producción y fecundidad de las cápsulas.

Al respecto de la media del T5 (0% RSU : 100% EB) y T1 (100% RSU : 0% EB), Choque (2010), registro un promedio final de 37 cápsulas en el vermicompostaje de estiércol de bovino (TB). Por su parte, Mamani *et al.* (2012), obtuvieron promedios de 64 cápsulas en el (EV) y 41 cápsulas en los (RC), del vermicompostaje de sustratos compuestos por estiércol de vacuno (EV) y restos de cocina (RC), en condiciones de carpa solar. En este mismo sentido, López *et al.* (2013), registraron una media de 79 cápsulas en el vermicompostaje de los sustratos del T3 (aserrín con estiércol de bovino).

4.2.2.5. Número total de lombrices

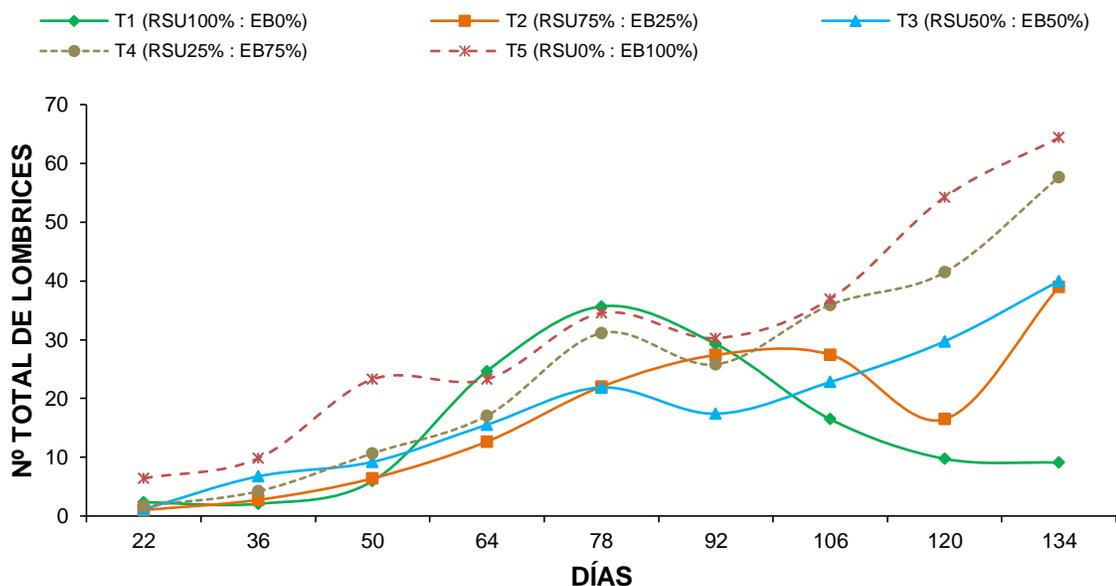


Figura 23. Evolución del número total de lombrices

Con el objetivo de evaluar la población de lombrices totales presentes en los sustratos del proceso de vermicompostaje de RSU y EB (Figura 23), se sumó las lombrices de toda las categorías (lombrices cliteladas, sub-cliteladas y juveniles) y se observó que a los 22 días los tratamientos registraron los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 2 individuos, T2 (75% RSU : 25% EB) 1 individuo, T3 (50% RSU : 50% EB) 1 individuo, T4 (25% RSU : 75% EB) 2 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) 6 individuos totales; los tratamientos que demostraron una secuencia ascendente hasta concluir el experimento fueron: el T2 (75% RSU : 25% EB) con 39 individuos, T3 (50% RSU : 50% EB) 40 individuos, T4 (25% RSU : 75% EB) 58 individuos y T5 (0% RSU : 100% EB) con 64 individuos totales; con respecto al T1 (100% RSU : 0% EB) a los 78 días, alcanzó un promedio máximo de 36 individuos consecutivamente descendió hasta llegar a un promedio de 9 individuos al finalizar el experimento (día 134).

Es importante mencionar que en el T1 (100% RSU : 0% EB), hubo una tasa de mortandad de lombrices elevado, debido a los diferentes factores: reducción de volumen del sustrato durante el proceso de vermicompostaje, pH alcalino (8.9), exceso de concentración de sales (22.4 dS/m) y a la pérdida de humedad de los sustratos, debido a las altas temperatura ambientes alcanzadas dentro del lombricario (36 °C). Al respecto, Schuld

(2006), indica que las lombrices soportan un pH de 6.0 a 8.0 y una humedad de 85 a 95%, siendo estos lo más recomendable para el desarrollo y actividad de las lombrices.

En comparación con el T5 (0% RSU : 100% EB) a los 134 días, Morales *et al.* (2009), obtuvieron un total de 101 lombrices totales como promedio final del vermicompostaje de estiércol de vaca. En relación al T2 (75% RSU : 25% EB) a los 134 días, Carita (2014), encontró 33 individuos en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) a los 120 días de la biotransformación de hoja de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU). Comparativamente con el T3 (50% RSU : 50% EB) y T4 (25% RSU : 75% EB) a los 106 días, Sullcata (2014), registro 42 lombrices en el T3 (estiércol de ovino 50% + rastrojo de cebada 50%) y 25 lombrices en el T2 (estiércol de ovino 75% + rastrojo de cebada 25%) a los 113 días del vermicompostaje de estiércol de ovino mezclados con rastrojos de cebada.

Cuadro 18. Análisis de varianza para el número total de lombrices

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Tratamiento | 4 | 2758.21 | 689.55 | 5.06 | 0.0172 * |
| Error Experimental | 10 | 1362.27 | 136.23 | 0.31 | 0.9744 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 25962.00 | 432.70 | | |
| Total | 74 | 30082.48 | | | |
| Promedio (Individuos) | 21 | | | | |

(*) = Significativo al 5 % ; (**ns**) = No significativo

En el análisis de varianza (Cuadro 18), se observa que la probabilidad fue menor a 0.05 (0.0172), esto significa que el número total de lombrices entre tratamientos, fueron significativamente diferentes. Con respecto al número total de lombrices entre sub-muestras, no existió diferencias estadísticas significativas, ya que la probabilidad fue mayor a 0.05 (0.9744).

Se obtuvo una media general de 21 individuos totales. En relación a esta situación, Carita (2014), registró un promedio general de 33 individuos totales, en el vermicompostaje de hoja de coca residual acondicionados con residuos sólidos urbanos.

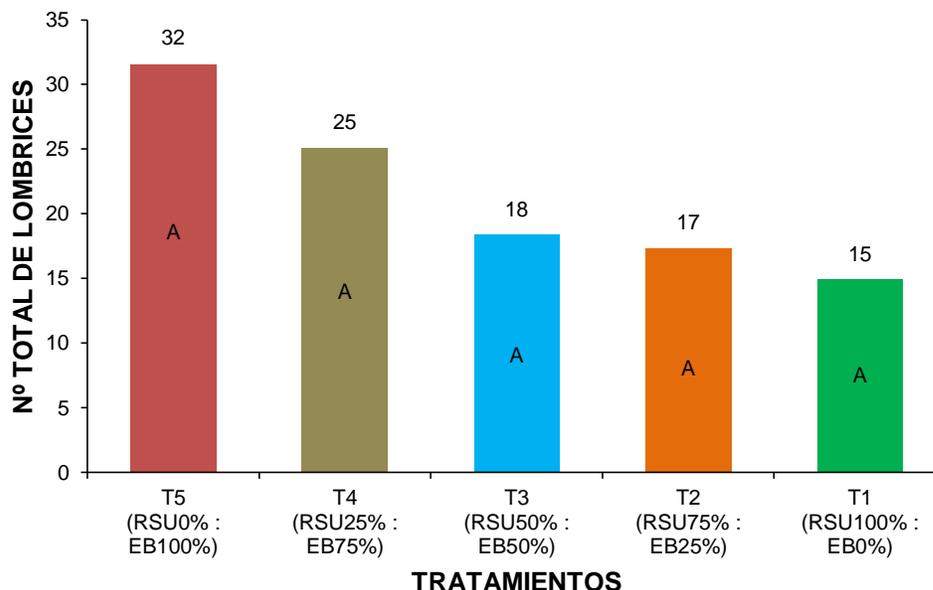


Figura 24. Prueba de Duncan para el número total de lombrices

La prueba de medias de Duncan (Figura 24), muestra que existió diferencias en la evolución del número total de lombrices entre los tratamientos del proceso de vermicompostaje de RSU y EB; se puede observar que el mayor número de lombrices se obtuvo en el T5 (0% RSU : 100% EB) con 32 individuos totales, seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) con 25 individuos totales, T3 (50% RSU : 50% EB) 18 individuos totales, T2 (75% RSU : 25% EB) 17 individuos totales y T1 (100% RSU : 0% EB) con un total de 15 individuos. Con respecto a los 3 últimos tratamientos, Edwards (1988) citado por Nogales *et al.* (2014), indica que el contenido de sales en los residuos orgánicos, pueden desequilibrar la composición iónica de los fluidos internos de estos oligoquetos, ya que las lombrices tienen una baja capacidad de osmoregular las sales que absorben con el agua a través de su piel. Por esta razón una elevada concentración de sales en el residuo orgánico puede impedir el desarrollo de la población de lombrices.

Paco (2007), registró 300 lombrices totales en 0.02 m³, en el vermicompostaje de restos de cocina; este valor es mayor a los resultados encontrados en el T1 (100% RSU : 0% EB) con un total de 15 lombrices. En relación comparativa con el T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), López *et al.* (2013), registraron 44 lombrices en el T1 (frijol con estiércol de bovino) y 46 lombrices en el T3 (aserrín con estiércol de bovino), como resultado del vermicompostaje de sustratos orgánicos. Por su parte, Carita (2014),

encontró una media poblacional de 27 lombrices en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) y 26 lombrices en el T2 (HCR 50% : RSU 50%) en el vermicompostaje de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU).

4.2.2.6. Biomasa de lombrices

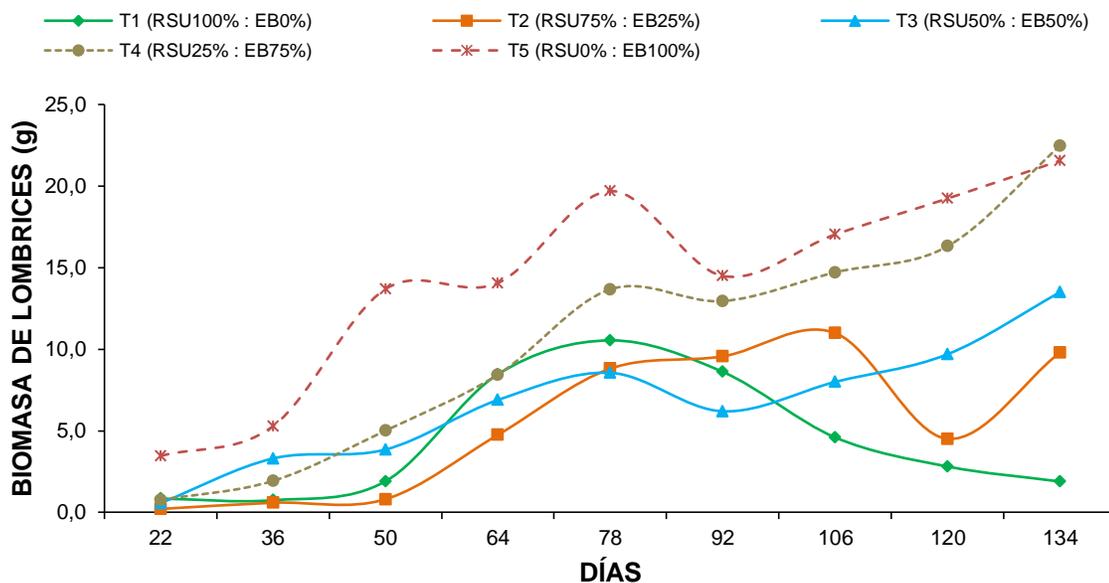


Figura 25. Evolución de la biomasa de lombrices

En la Figura 25, se puede visualizar la evolución de la biomasa de lombrices del proceso de vermicompostaje de RSU y EB; al inicio del experimento se obtuvo los siguientes promedios: T1 (100% RSU : 0% EB) 0.8 g/2 lombrices, T2 (75% RSU : 25% EB) 0.2 g/1 lombriz, T3 (50% RSU : 50% EB) 0.6 g/1 lombriz, T4 (25% RSU : 75% EB) 0.8 g/2 lombrices y T5 (0% RSU : 100% EB) 3.5 g/6 lombrices.

El T1 (100% RSU : 0% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB) alcanzan un mayor desarrollo a los 78 y 106 días; posteriormente al finalizar el experimento, presentaron un descenso hasta llegar a 1.9 g/9 lombrices en el T1 (100% RSU : 0% EB) y 9.8 g/39 lombrices en el T2 (75% RSU : 25% EB), esto es debido a las condiciones inadecuadas que surgió en el alimento de las lombrices: pH alcalino mayor a 8.5, exceso de concentración de sales (conductividad eléctrica mayor a 19 dS/m) y a la reducción del volumen del sustrato por efecto de la descomposición. Al respecto, Kaplan *et al.* (1980) citado por Acosta *et al.*

(2012), indican que las lombrices mueren después de ser sometidas a un pH <5.0 ó >9.0, pero sobreviven y ganan peso cuando están expuestas a un pH de un rango de 6.0 a 9.0.

En cuanto al T3 (50% RSU : 50% EB), T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), demostraron una evolución ascendente hasta finalizar el experimento con promedios de: T3 (50% RSU : 50% EB) 13.5 g/40 lombrices, T4 (25% RSU : 75% EB) 22.5 g/58 lombrices y T5 (0% RSU : 100% EB) con 21.6 g/64 lombrices. En relación comparativa, Serrano (2004), obtuvo un promedio de 0.926 g/lombriz en el T2 (R 0% : E 100%) y 0.23 g/lombriz en el T1 (R 100% : E 0%), durante los procesos de vermicompostaje de residuos orgánicos (R) combinados con estiércol de vacuno (E).

En comparación con el T1 (100% RSU : 0% EB) a los 78 días y T2 (75% RSU : 25% EB) a los 106 días, Carita (2014), obtuvo 10.0 g/27 lombrices en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) a los 75 días y en el T2 (HCR 50% : RSU 50%) registro 14.7 g/52 lombrices a los 105 días, del vermicompostaje de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU). Por su parte, Saavedra (2007), obtuvo una biomasa de 18.2 g/50 lombrices totales a los dos meses y medio de la biodegradación de alperujo por *Pleurotus ostreatus* y *Eisenia foetida*.

Sin embargo, si comparamos el comportamiento de la biomasa del T1 (100% RSU : 0% EB) a los 78 días, con la evolución del número total de lombrices (Figura 23) en el mismo día, podemos observar que no hubo un incremento de peso en la biomasa de este tratamiento; esto se debe a que las lombrices no encontraron las condiciones adecuadas en el alimento; por lo cual, se deduce que en este tratamiento hubo una mayor presencia de lombrices sub-cliteladas o post-cliteladas (Figura 17), que son lombrices adultas que están en un estado letargo o de reposo. En este tratamiento también, se observó que las lombrices se dispusieron en ovillos para su protección y sobre vivencia.

Cuadro 19. Análisis de varianza para la biomasa de lombrices

| FV | GL | SC | CM | Fc | Pr > F |
|--------------------|------|---------|--------|------|-----------|
| Tratamiento | 4 | 990.93 | 247.73 | 8.83 | 0.0026 ** |
| Error Experimental | 10 | 280.47 | 28.05 | 0.37 | 0.9552 ns |
| Error de Muestreo | 60 | 4556.88 | 75.95 | | |
| Total | 74 | 5828.28 | | | |
| Promedio (g) | 8.36 | | | | |

(**) = Altamente significativo al 1 % ; (ns) = No significativo

En el Cuadro 19, se muestra que la probabilidad ($Pr>F$) fue inferior a 0.01 (0.0026), esto nos indica que la biomasa de lombrices entre tratamientos fueron diferentes y altamente significativos estadísticamente. Con respecto a la biomasa de lombrices entre submuestras, el análisis de varianza, demostró que no existió diferencias estadísticas significativas, ya que la probabilidad ($Pr>F$) fue mayor a 0.05 (0.9552). Se obtuvo un promedio general de 8.36 g de biomasa de lombrices.

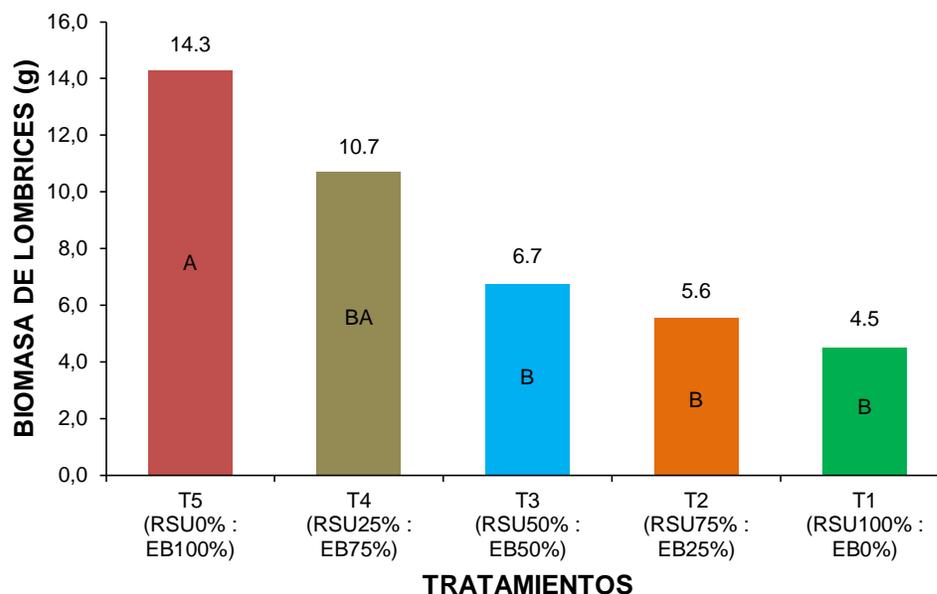


Figura 26. Prueba de Duncan para la biomasa de lombrices

En la Figura 26, se puede observar la prueba de medias de Duncan; el tratamiento que dio resultados favorables en la evolución de la biomasa de lombrices durante el proceso de la investigación, fue el T5 (0% RSU : 100% EB) con 14.3 g y el T4 (25% RSU : 75% EB) con 10.7 g, seguido por el tratamiento T3 (50% RSU : 50% EB) con 6.7 g, T2 (75% RSU : 25% EB) 5.6 g y T1 (100% RSU : 0% EB) con 4.5 g. En el T5 (0% RSU : 100% EB) las lombrices demostraron una ganancia de peso debido a que el alimento en este tratamiento era estiércol de bovino.

En comparación con el T1 (100% RSU : 0% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Mamani *et al.* (2012), obtuvieron promedios de 1.410 g en el vermicompostaje de estiércol de vacuno y 0.185 g en el vermicompostaje de restos de cocina, en condiciones de carpa solar. Similar a estos resultados, Saavedra (2007), menciona que la biomasa total de las lombrices fue de 112 g/182 lombrices, lo que significa que cada lombriz pesa aproximadamente 0.6 g.

En relación a la biomasa del T2 (75% RSU : 25% EB) y T3 (50% RSU : 50% EB), Carita (2014), obtuvo medias de 8.7 g en el T1 (HCR 25% : RSU 75%) y 7.6 g en el T2 (HCR 50% : RSU 50%), en la biotransformación de hojas de coca residual (HCR) acondicionados con residuos sólidos urbanos (RSU).

4.2.3. Biomasa final de lombrices

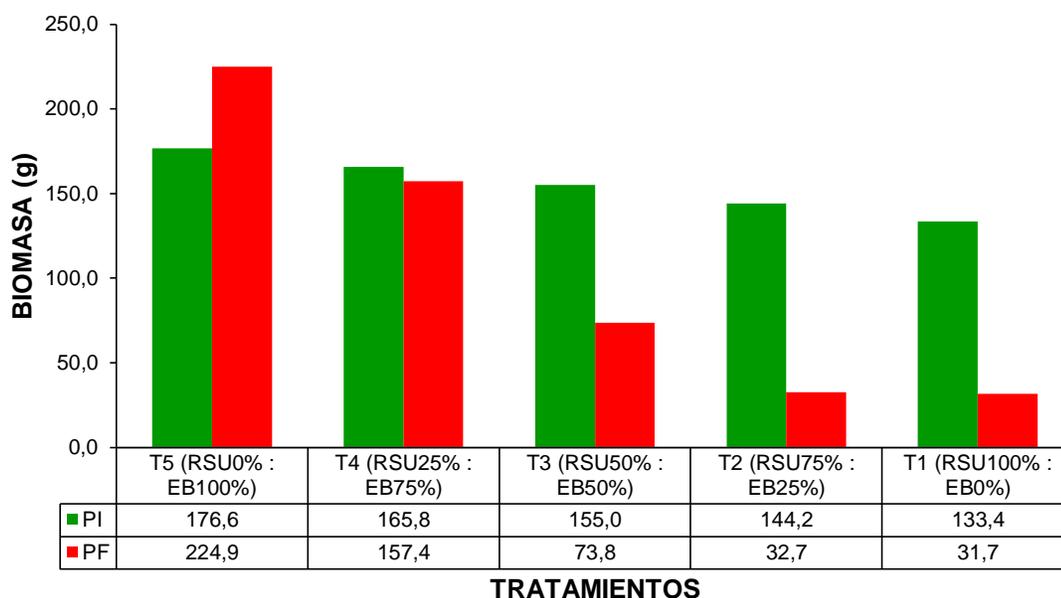


Figura 27. Comparación del peso inicial con el peso final de lombrices

En la Figura 27, se puede observar una comparación del peso inicial con el peso final de la biomasa de las lombrices; en el T5 (0% RSU : 100% EB) se obtuvo una biomasa final mayor a la biomasa inicial, es decir que de 176.6 g de biomasa se ganó en promedio 48.3 g de biomasa; sin embargo, en los tratamientos combinados con residuos sólidos urbanos hubo pérdidas de biomasa, en el T4 (25% RSU : 75% EB) se perdió un promedio de 8.4 g de biomasa, en el T3 (50% RSU : 50% EB) se perdió 81.2 g, en el T2 (75% RSU : 25% EB) se perdió 111.5 g y en el T1 (100% RSU : 0% EB) se perdió un promedio de 101.7 g de biomasa en comparación con la biomasa inicial inoculada; esto se debe a los diferentes factores producidos durante el proceso de vermicompostaje en los tratamientos con mayores proporciones de residuos sólidos urbanos, como la reacción alcalina del pH, la excesiva concentración de sales y la reducción de volumen del sustrato.

Al respecto, Serrano (2004), también observo un decremento en los tratamientos combinados con residuos orgánicos, es así que en el T1 (R 100% : E 0%) la biomasa inicial fue de 150 g, del cual al culminar el experimento solo obtuvo 2.1 g de biomasa final. De la misma manera Carita (2014), también registró una pérdida de biomasa en los tratamientos con mayor proporción de residuos sólidos urbanos. En este mismo sentido, Moreno y Moral (2008), mencionan que la elevada concentración de sales en los residuos, pueden tener efectos inhibitorios en la reproducción y desarrollo de la población de lombrices, e incluso puede llevar a la muerte de los individuos.

4.2.4. Determinación del volumen final de biolixiviados

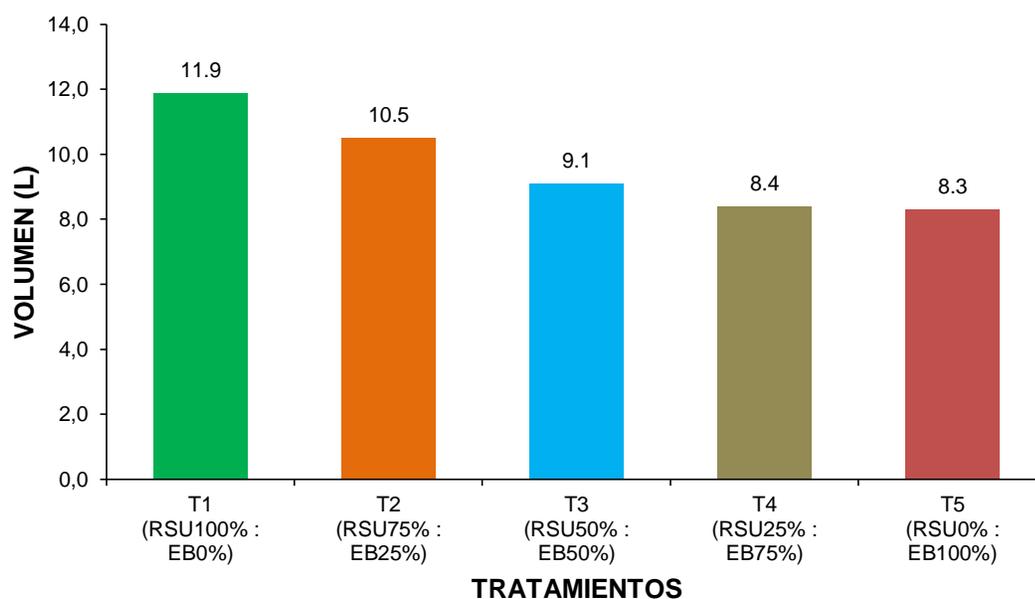


Figura 28. Promedio del volumen de los biolixiviados (L)

El rendimiento final de biolixiviados del proceso de vermicompostaje de RSU combinados con EB se puede observar en la Figura 28, en donde los resultados demostraron que en el T1 (100% RSU : 0% EB) se obtuvo 11.9 L de biolixiviado, seguido por el T2 (75% RSU : 25% EB) con 10.5 L, T3 (50% RSU : 50% EB) 9.1 L, T4 (25% RSU : 75% EB) 8.4 L y T5 (0% RSU : 100% EB) con 8.3 L de biolixiviado; en el T1 (100% RSU : 0% EB), T2 (75% RSU : 25% EB), y T3 (50% RSU : 50% EB) se logró un mayor rendimiento de biolixiviados, debido a que el sustrato que contenía estos tratamientos, en su mayor proporción eran residuos sólidos urbanos y no había tanta retención de agua en el

sustrato, como en el T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), que estaba compuesto mayormente por estiércol de bovino donde había una mayor retención de humedad.

Es importante mencionar que en el T1 (100% RSU : 0% EB), se produjo una reducción de volumen del sustrato en las cajas de vermicompostaje y al momento de realizar el riego desde la última caja, el agua percoló con mayor facilidad a la caja de recepción de biolixiviados.

4.2.5. Evaluación de las características químicas del biolixiviado

Cuadro 20. Características químicas de los biolixiviados

| Parámetros | Tratamientos | | | | |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | T1 (RSU 100% : EB 0%) | T2 (RSU 75% : EB 25%) | T3 (RSU 50% : EB 50%) | T4 (RSU 25% : EB 75%) | T5 (RSU 0% : EB 100%) |
| N (mg/L) | 252.00 | 378.00 | 420.00 | 490.00 | 364.00 |
| P (mg/L) | 23.68 | 91.12 | 85.29 | 84.72 | 62.81 |
| K (mg/L) | 7738.00 | 8310.00 | 6119.00 | 6643.00 | 5048.00 |
| Ca (mg/L) | 46.66 | 103.93 | 183.93 | 295.09 | 343.43 |
| Mg (mg/L) | 40.80 | 58.45 | 122.01 | 201.43 | 232.40 |
| Fe (mg/L) | 3.65 | 1.24 | 1.72 | 2.68 | 4.23 |
| Cu (mg/L) | 0.19 | 0.18 | 0.20 | 0.24 | 0.18 |
| Zn (mg/L) | 0.62 | 0.60 | 0.96 | 1.14 | 1.07 |
| Mn (mg/L) | 0.45 | 1.54 | 2.96 | 3.38 | 3.80 |
| Na (mg/L) | 258.00 | 326.00 | 711.00 | 881.00 | 1080.00 |
| Cl (mg/L) | 2573.00 | 3384.00 | 3419.00 | 4301.00 | 4089.00 |
| B (mg/L) | 8.28 | 30.61 | 46.56 | 75.27 | 91.22 |
| pH | 9.4 | 9.3 | 9.1 | 8.8 | 8.4 |
| CE (dS/m) | 21.7 | 24.2 | 20.3 | 22.3 | 17.6 |

Fuente: Elaboración propia, en base al análisis químico del laboratorio Spectrolab-UTO (2015)

En el Cuadro 20, se observó el contenido de macronutrientes, micronutrientes, pH final y conductividad eléctrica final de los biolixiviados del proceso de vermicompostaje de RSU y EB, estos datos fueron obtenidos por medio de un análisis químico de los biolixiviados, realizado por el laboratorio Spectrolab-UTO (Anexo 26).

4.2.5.1. Macroelementos

4.2.5.1.1. Nitrógeno total

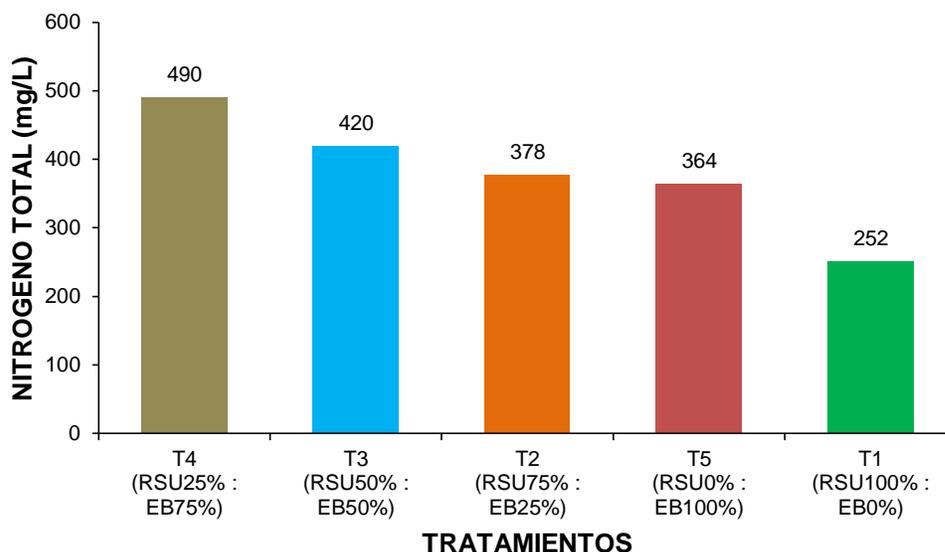


Figura 29. Contenido de nitrógeno total (mg/L)

En la Figura 29, se muestra el contenido de nitrógeno total que tuvo los biolixiviado del proceso de vermicompostaje; la más alta concentración de nitrógeno total se obtuvo en el T4 (25% RSU : 75% EB) con 490 mg N/L seguido por el T3 (50% RSU : 50% EB) 420 mg N/L, T2 (75% RSU : 25% EB) 378 mg N/L, T5 (0% RSU : 100% EB) 364 mg N/L y T1 (100% RSU : 0% EB) 252 mg N/L. En el T4 (25% RSU : 75% EB), T3 (50% RSU : 50% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB), los sustratos estaban compuestos por residuos sólidos urbanos combinados con estiércol de bovino. Según Simek *et al.* (1999) citado por Saavedra (2007), mencionan que las lombrices favorecen la fijación del nitrógeno, aumentando la actividad nitrogenasa propia de las bacterias nitrificantes.

Benítez *et al.* (1996), obtuvieron 61 mg N/L, en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de ovino. Sin embargo, Nogales (1999) citado por Carita (2014), señala que la dinámica del N durante el vermicompostaje es variable, observándose aumentos y disminuciones debido a procesos de desnitrificación y volatilización en forma de amonio (NH_4^+). Relacionadamente, Rojas. (2013), obtuvo 400 mg N/L en los lixiviados del vermicompostaje de residuos orgánicos. En este mismo sentido y en comparación con los resultados de los análisis químico del T5 (0% RSU : 100% EB), Chavez y Fuentes (2013),

registraron nitrógeno 1200 mg/L, al realizar el análisis químico del lixiviado obtenido durante el vermicompostaje de estiércol de bovino. Por su parte, Carrillo (2013), obtuvo 1.6 % de N total en el T1 (Estiércol de bovino, ovino + rastrojos agrícolas), como resultado de los análisis químico del vermicompost de sustratos orgánicos procedentes de baños ecológicos y estiércol animal.

4.2.5.1.2. Fósforo total

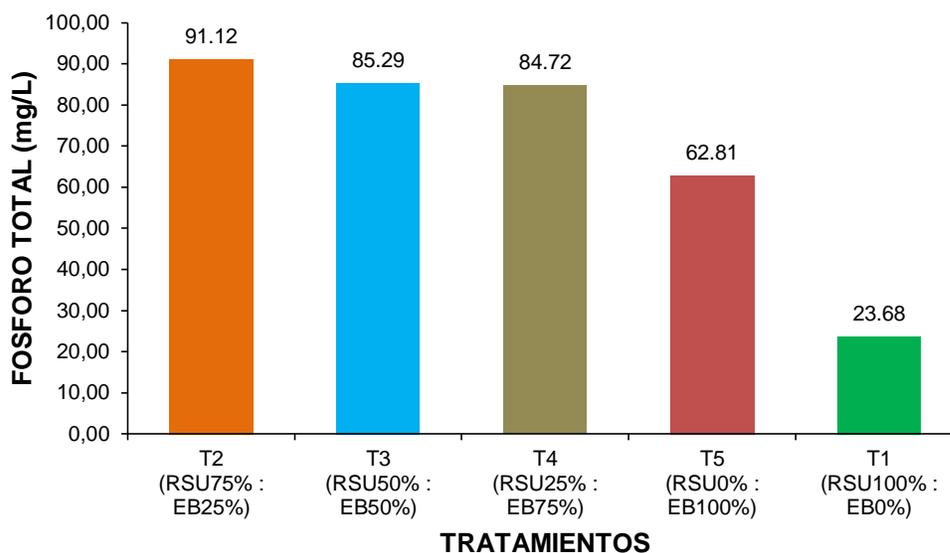


Figura 30. Contenido de fósforo total (mg/L)

El contenido de fósforo total que tuvo los biolixiviados del proceso de vermicompostaje se observa en la Figura 30; el T2 (75% RSU : 25% EB) con 91.12 mg P/L demostró el más alto contenido de fósforo, en comparación con el T3 (50% RSU : 50% EB), T4 (25% RSU : 75% EB), T5 (0% RSU : 100% EB) y T1 (100% RSU : 0% EB); los tratamientos que tenían como sustrato RSU combinado con EB, presentan una mayor concentración de fósforo, que el T5 (100 % EB) y T1 (100 % RSU). Sin embargo, Navarro y Navarro (2003), menciona que la baja concentración de fósforo en los residuos orgánicos, es debido a la baja solubilidad de este elemento, ya que se encuentra en formas orgánicas como: fosfolípidos, ácidos nucleicos y fitinas.

En relación comparativa, Quaik *et al.* (2012), obtuvieron 400 mg P/L en el lixiviado del vermicompostaje de desperdicios vegetales, 500 mg P/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vaca mezclado con desperdicios vegetales (Relación 1:2)

y 600 mg P/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vaca, por lo tanto, se deduce que el contenido de fósforo en el T1 (100% RSU : 0% EB), T2 (75% RSU : 25% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), están por debajo de los valores encontrados por este autor. Por su parte, Oliva *et al.* (2010), registraron 11 mg P/L en el lixiviado del vermicompostaje de residuos orgánicos. De la misma manera, Chavez y Fuentes (2013), obtuvieron fósforo 478.5 mg/L en los lixiviados obtenidos durante el vermicompostaje de estiércol de bovino.

4.2.5.1.3. Potasio

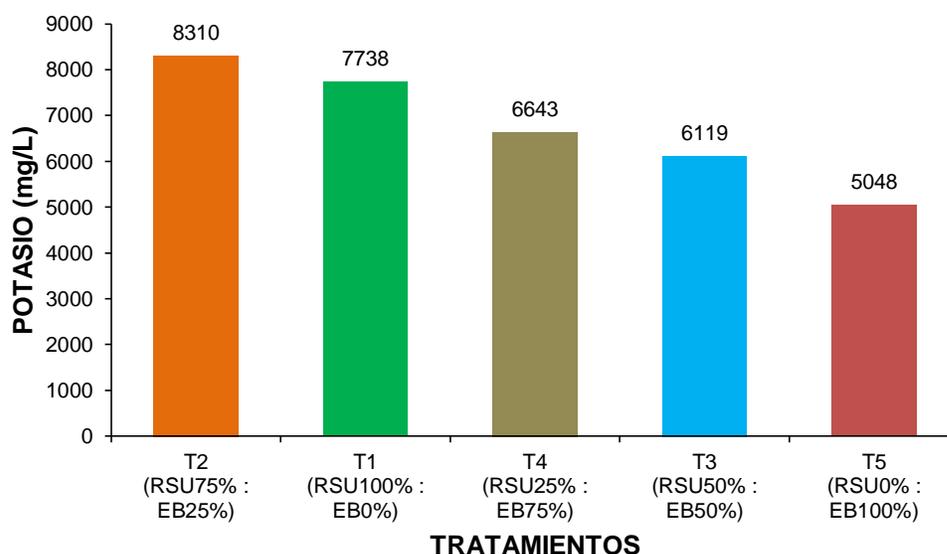


Figura 31. Contenido de potasio (mg/L)

La más alta concentración de potasio en los biolixiviados (Figura 31), se consiguió en el T2 (75% RSU : 25% EB) con 8310 mg K/L y T1 (100% RSU : 0% EB) con 7738 mg K/L, seguidos por el T4 (25% RSU : 75% EB) 6643 mg K/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 6119 mg K/L y T5 (0% RSU : 100% EB) 5048 mg K/L. En relación al T1 (100% RSU : 0% EB), Rojas. (2013), obtuvo 7800 mg K/L en los lixiviados del vermicompostaje de residuos orgánicos. En comparación con los resultados encontrados en el T5 (0% RSU : 100% EB), Chavez y Fuentes (2013), registraron potasio 4850 mg/L, en el lixiviado obtenido durante el vermicompostaje de estiércol de bovino. Relacionadamente con los resultados del T3 (50% RSU : 50% EB), Carrillo (2013), menciona que en los análisis químicos del T1

(estiércol de bovino combinado con estiércol de ovino + rastrojos agrícolas), se obtuvo 7586 mg potasio/kg.

Los biolixiviados procedentes de sustratos con RSU, son ricos en este elemento. Al respecto, Carita (2014), menciona que hay elevadas concentraciones de potasio en los RSU, puesto que en el análisis químico de estos residuos encontró 23890 mg K/kg. Esto puede ser la razón de que hay un alto contenido de potasio en el biolixiviado de los tratamientos que contenían como sustrato diferentes proporciones de RSU.

4.2.5.1.4. Calcio

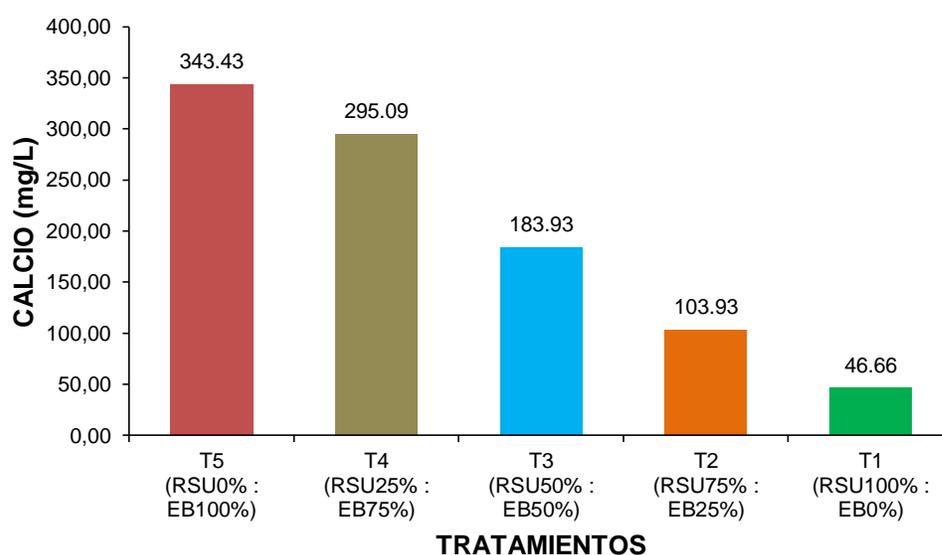


Figura 32. Contenido de calcio (mg/L)

En la Figura 32, se puede visualizar que el T5 (0% RSU : 100% EB) contenía 343.43 mg Ca/L y fue el tratamiento con el más alto contenido de calcio en comparación con los demás tratamientos. En los biolixiviados de los sustratos con más contenido de EB, se obtuvo mayores concentraciones de este elemento, que los biolixiviados producidos a base de sustratos con mayores proporciones de residuos sólidos urbanos, como el T1 (100% RSU : 0% EB), T2 (75% RSU : 25% EB) y T3 (50% RSU : 50% EB), por lo cual se interpreta que en el T5 (0% RSU : 100% EB) y T4 (25% RSU : 75% EB) hubo una mayor actividad biológica de las lombrices, ya que al biodegradar el material secretan iones de carbonato de calcio por medio de las glándulas de Morren (Bollo, 2001).

En comparación con el T1 (100% RSU : 0% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB), Saavedra (2007), registró 21.5 g Ca/kg en el vermicompost de alperujo biodegradado por la acción directa de la *E. foetida*. Relacionadamente, Quaik *et al.* (2012), obtuvieron 94 mg Ca/L en el lixiviado del vermicompostaje de desperdicios vegetales, 85 mg Ca/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vaca mezclado con desperdicios vegetales (Relación 1:2) y 71 mg Ca/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vaca. Con respecto a los resultados obtenidos en el T5 (0% RSU : 100% EB), son bajos en comparación con los valores encontrados por Chavez y Fuentes (2013), que obtuvieron calcio 950 mg/L en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de bovino.

4.2.5.1.5. Magnesio

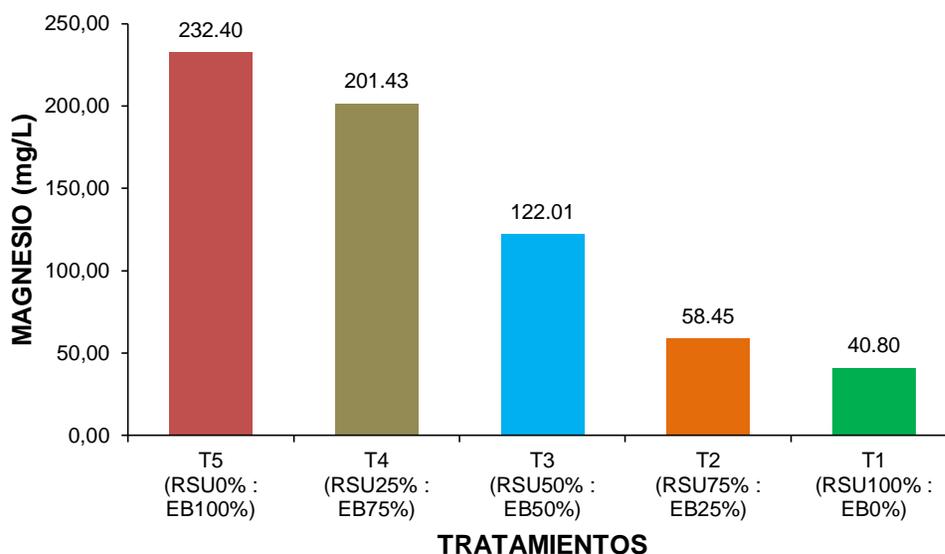


Figura 33. Contenido de magnesio (mg/L)

El contenido de magnesio que tuvo los biolixiviados del proceso de vermicompostaje, se puede observar en la Figura 33, donde se demuestra que existió altas concentraciones de Mg en el T5 (0% RSU : 100% EB) con 232.40 mg Mg/L, seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) 201.40 mg Mg/L y T3 (50% RSU : 50% EB) 122.01 mg Mg/L, en el T1 (100% RSU : 0% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB) se obtuvo bajas concentraciones de este elemento.

Comparativamente con el T1 (100% RSU : 0% EB), Oliva *et al.* (2010), obtuvieron 59 mg Mg/L, en los análisis químicos de lixiviados del vermicompostaje de residuos orgánicos.

Relacionadamente con los resultados del T5 (0% RSU : 100% EB), Chavez y Fuentes (2013), obtuvieron magnesio 300 mg/L en el lixiviado colectado durante el vermicompostaje de estiércol de bovino. De la misma manera, Ávila *et al.* (2015), obtuvieron 200 mg Mg/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vacuno.

4.2.5.2. Microelementos

4.2.5.2.1. Hierro

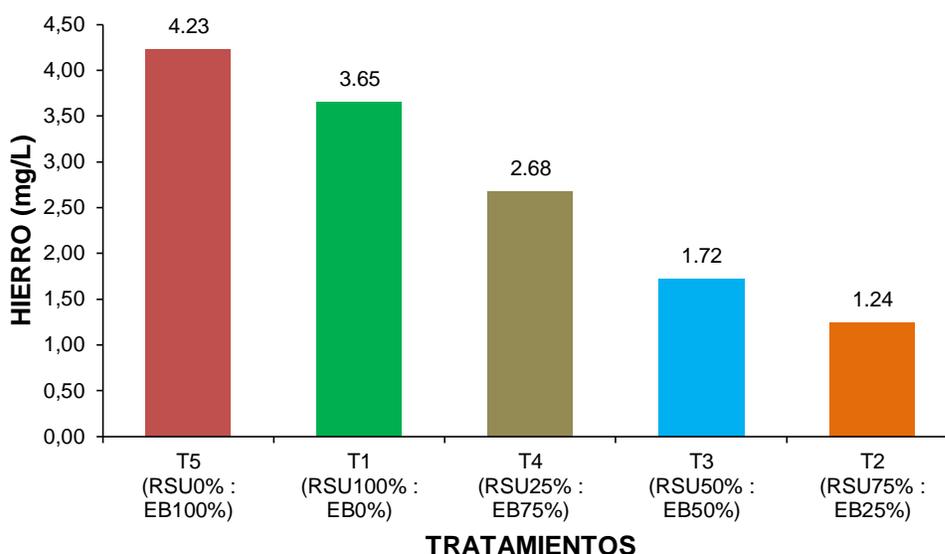


Figura 34. Contenido de hierro (mg/L)

En la Figura 34, se puede observar la concentración de hierro que tuvo los biolixiviados de RSU y EB; en el T5 (0% RSU : 100% EB) con 4.23 mg Fe/L, T1 (100% RSU : 0% EB) con 3.65 mg Fe/L y en el T4 (25% RSU : 75% EB) con 2.68 mg Fe/L, se obtuvo considerables concentraciones de hierro; el T3 (50% RSU : 50% EB) y T2 (75% RSU : 25% EB) presentaron bajas concentraciones de este elemento, tal como se muestran en la Figura 34. En referencia a esta situación, Thompson y Troeh (1988), mencionan que el hierro reside en la naturaleza extraordinariamente en compuestos demasiado insolubles.

En relación al contenido de hierro en el T3 (50% RSU : 50% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Benítez *et al.* (1996), obtuvieron 163 mg Fe/L en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de ovino. De la misma manera, López *et al.* (2013), registraron 8.77 mg hierro/kg en el vermicompost del T1 (rastros de frijol mezclados con estiércol de bovino)

y 9.92 mg hierro/kg en el vermicompost del T3 (aserrín mezclado con estiércol de bovino). Según, Ávila *et al.* (2015), mencionan que los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de vacuno contienen 10 mg Fe/L, por lo tanto, se deduce que el contenido de hierro en todos los tratamientos, fue inferior a los valores encontrados por Benítez *et al.* (1996), López *et al.* (2013) y Ávila *et al.* (2015).

4.2.5.2.2. Cinc

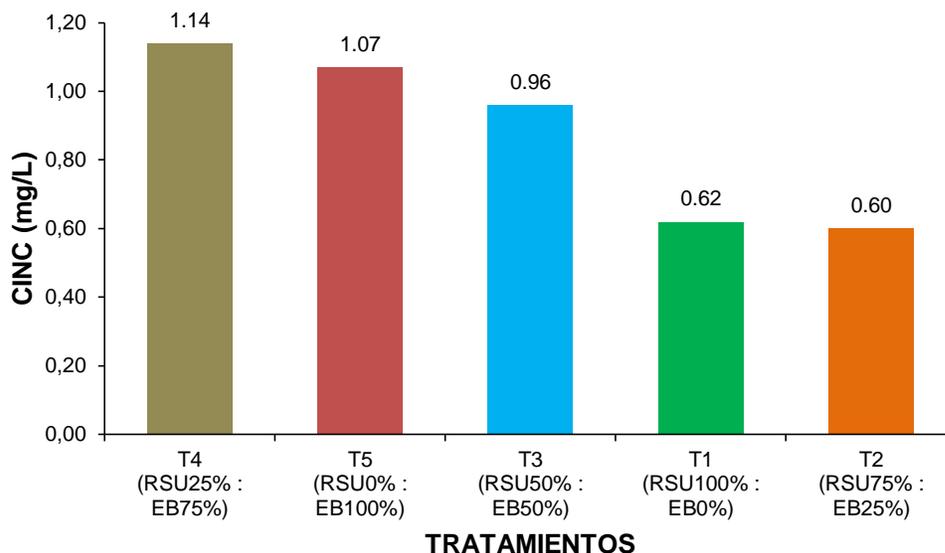


Figura 35. Contenido de cinc (mg/L)

En la Figura 35, se muestra el contenido de cinc que tuvo los biolixiviados del proceso de vermicompostaje de RSU y EB; en el T4 (25% RSU : 75% EB) se obtuvo 1.14 mg Zn/L, T5 (0% RSU : 100% EB) 1.07 mg Zn/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 0.96 mg Zn/L, T1 (100% RSU : 0% EB) 0.62 mg Zn/L y en el T2 (75% RSU : 25% EB) se obtuvo 0.60 mg Zn/L.

En relación a los resultados del T5 (0% RSU : 100% EB) y T1 (100% RSU : 0% EB), Benítez *et al.* (1996), obtuvieron 13 mg Zn/L en el lixiviado del proceso de vermicompostaje del estiércol de ovino. Por su parte, Ávila *et al.* (2015), registraron 3.99 mg Zn/L, en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de vacuno y 10.5 mg Zn/L, en el lixiviado del vermicompostaje de desperdicios vegetales con hongos.

Thompson y Troeh (1988), indican que el cinc es un elemento mineral que está ampliamente distribuido en pequeñas cantidades y en compuestos muy poco solubles al

agua. Esto podría ser el motivo por el que hay bajas concentraciones de este elemento, en los biolixiviados. Asimismo, también señalan que la solubilidad del cinc aumenta en un pH ácido y disminuye en pH alcalinos.

4.2.5.2.3. Cobre

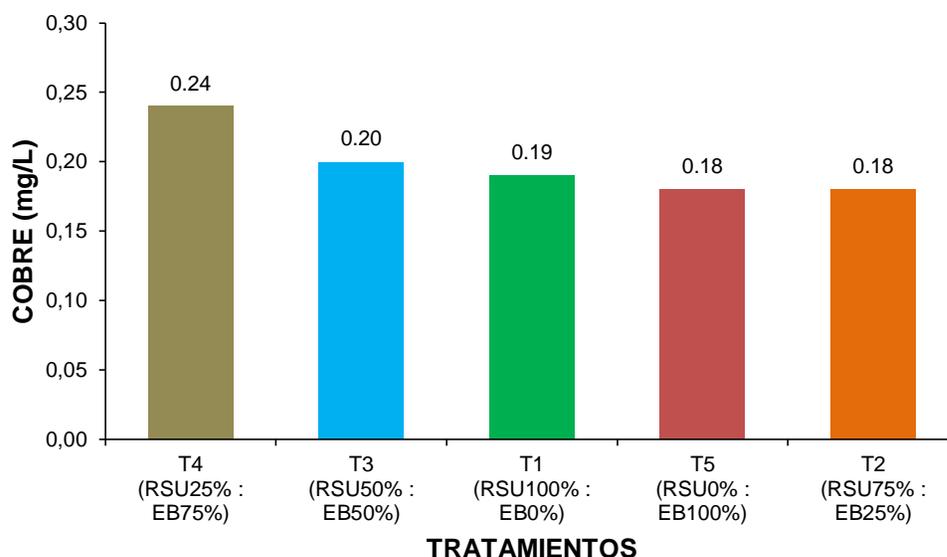


Figura 36. Contenido de cobre (mg/L)

En la Figura 36, se puede observar que existió bajas concentraciones de cobre en los biolixiviados, en el T4 (25% RSU : 75% EB) se obtuvo 0.24 mg Cu/L, en el T3 (50% RSU : 50% EB) 0.20 mg Cu/L, T1 (100% RSU : 0% EB) 0.19 mg Cu/L, T5 (0% RSU : 100% EB) 0.18 mg Cu/L y T2 (75% RSU : 25% EB) 0.18 mg Cu/L. Al respecto, Thompson y Troeh (1988), indican que el cobre es soluble y se ioniza, pero su solubilidad es máxima cuando el pH es ácido y la disponibilidad del cobre desciende conforme va aumentando la alcalinidad del pH; también, mencionan que hay poca disponibilidad de cobre en materiales orgánicos.

En relación a los resultados del T1 (100% RSU : 0% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), Saavedra (2007), obtuvo 22 mg Cu/kg en los resultados del análisis químico, del vermicompost de alperujo biodegradado por la *E. foetida*. En este mismo orden de experiencias, López *et al.* (2013), registraron 6.3 mg cobre/kg en el vermicompost del T1 (frijol con estiércol de bovino) y 5.88 mg cobre/kg en el vermicompost del T3 (aserrín con estiércol de bovino). Por su parte, Ávila *et al.* (2015), obtuvieron 4.48 mg Cu/L en el

lixiviado del vermicompost de restos vegetales mezclados con hongos y 6.27 mg Cu/L en el lixiviado del vermicompost de estiércol de vacuno.

Los resultados químicos obtenidos, sobre la concentración del cobre en los biolixiviados de vermicompost de RSU y EB, son bajos en comparación con los resultados encontrados por los mencionados autores.

4.2.5.2.4. Manganeso

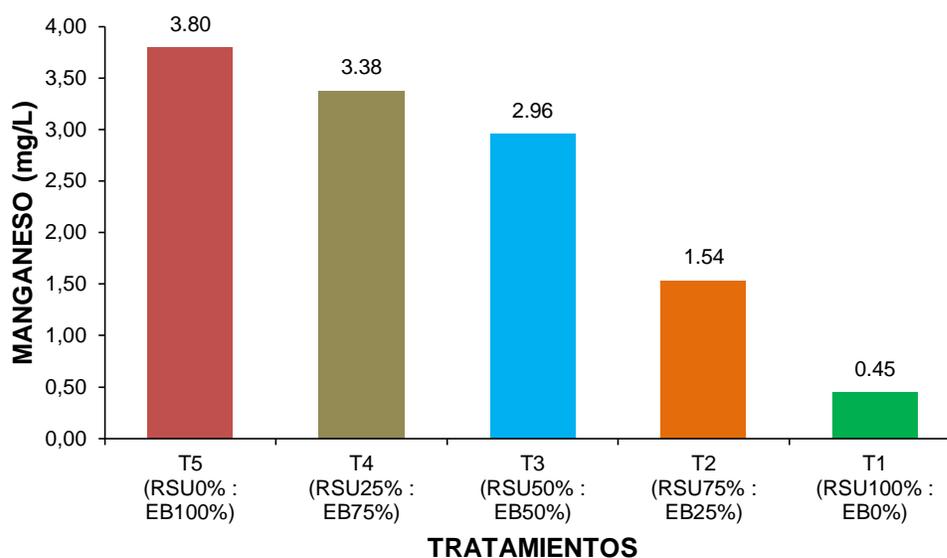


Figura 37. Contenido de manganeso (mg/L)

En cuanto al contenido de Manganeso en los biolixiviados según al análisis químico realizado por el laboratorio Spectrolab se obtuvo los siguientes resultados: T5 (0% RSU : 100% EB) 3.80 mg Mn/L, T4 (25% RSU : 75% EB) 3.38 mg Mn/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 2.98 mg M /L, T2 (75% RSU : 25% EB) 1.54 mg Mn/L, y el T1 (100% RSU : 0% EB) con un bajo contenido de 0.45 mg Mn/L.

Con respecto al contenido de manganeso en el T3 (50% RSU : 50% EB), López *et al.* (2013), registraron los siguientes resultados: T1 (rastros de frijol con estiércol de bovino) 3.26 mg manganeso/kg y T3 (aserrín con estiércol de bovino) 2.63 mg manganeso/kg, en el vermicompost de residuos orgánicos.

En relación a los resultados químicos del T5 (0% RSU : 100% EB), Ávila *et al.* (2015), obtuvieron 1.71 mg Mn/L en el lixiviado del vermicompost de estiércol de vacuno. Dado los resultados que anteceden en cuestión de contenido del manganeso en el lixiviado del estiércol de bovino, se interpreta que los resultados obtenidos en el T5 (0% RSU : 100% EB), superan los valores encontrados por Ávila *et al.* (2015). En este mismo orden de ideas, Moreno (2015), señala que la calidad del bio bovino depende de la buena alimentación suministrada al ganado bovino. Por lo tanto, los animales mal alimentados principalmente a base de paja, producen un estiércol pobre y de poco valor nutricional.

4.2.5.2.5. Sodio

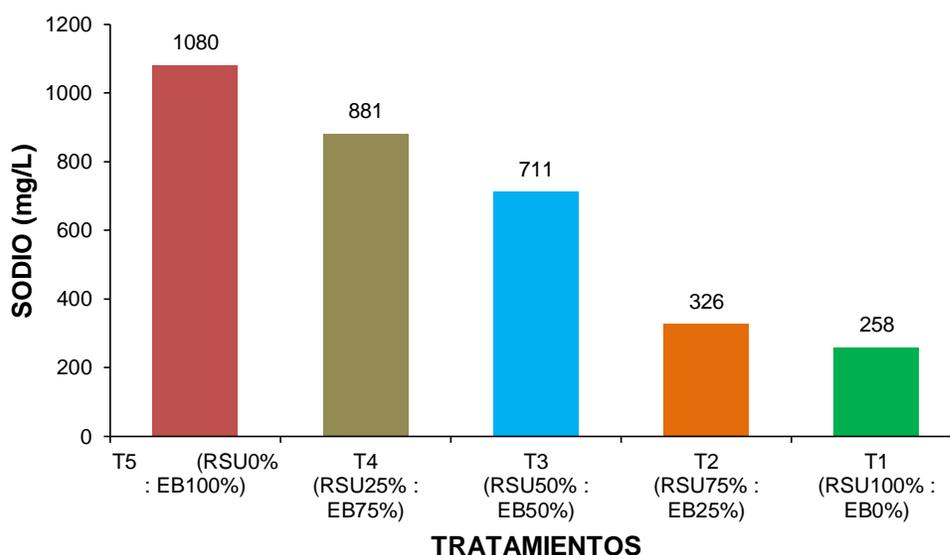


Figura 38. Contenido de sodio (mg/L)

En la Figura 38, se visualiza las concentraciones de sodio que tuvieron los biolixiviados del proceso de vermicompostaje de RSU y EB; en el T5 (0% RSU : 100% EB) se obtuvo 1080 mg Na/L, y son las más altas concentraciones de este elemento, seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) 881 mg Na/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 711 mg Na/L, T2 (75% RSU : 25% EB) 326 mg Na/L y T1 (100% RSU : 0% EB) 258 mg Na/L. Al respecto, Navarro y Navarro (2003), señalan que el sodio es un elemento muy lixiviable y puede ser lavado fácilmente si se ejerce cantidades de riego sobre el material sólido. Por su parte, Saavedra (2007), encontró 417 mg Na/kg, en el vermicompost de alperujo biodegradado por las lombrices rojas californianas.

Preciado *et al.* (2011), confirmaron por medio de un análisis químico, que los lixiviados del proceso de vermicompostaje de residuos orgánicos, contienen altas concentraciones de sodio 2312.42 mg/L. Relacionadamente, Ávila *et al.* (2015), indican que los lixiviados del vermicompostaje de desperdicios vegetales contiene 4300 mg Na/L y 4400 mg Na/L en los lixiviado del vermicompostaje de estiércol de vacuno. En comparación con los resultados obtenidos en el T1 (100% RSU : 0% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), podemos observar que están por debajo de los valores encontrados por Ávila *et al.* (2015).

4.2.5.2.6. Cloro

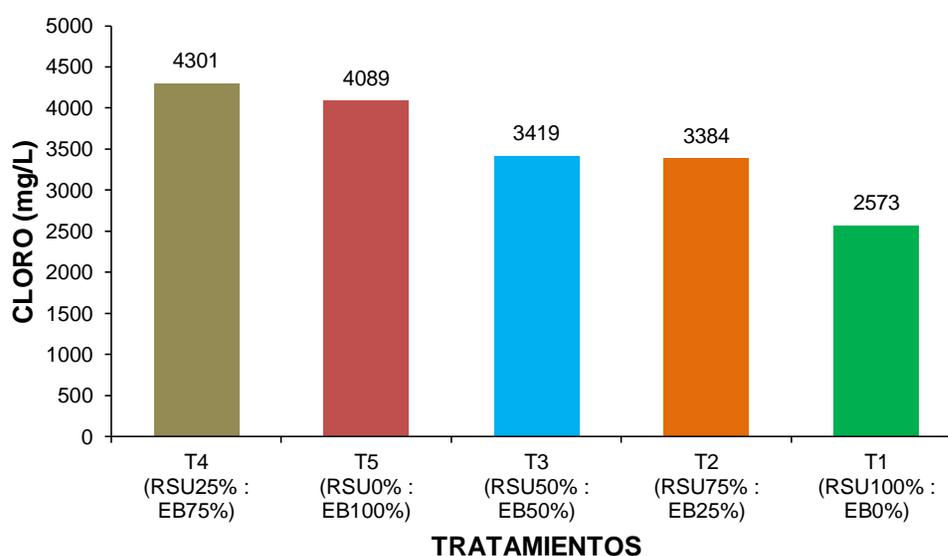


Figura 39. Contenido de cloro (mg/L)

En la Figura 39, se observa la concentración de cloro que tuvo los biolixiviados en los procesos de vermicompostaje de residuos sólidos urbanos combinados con estiércol de bovino; la más alta concentración de cloro se obtuvo en el T4 (25% RSU : 75% EB) con 4301 mg Cl/L, seguido por el T5 (0% RSU : 100% EB) 4089 mg Cl/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 3419 mg Cl/L, T2 (75% RSU : 25% EB) 3384 mg Cl/L y T1 (100% RSU : 0% EB) con 2573 mg Cl/L.

El contenido de cloro en el T1 (100% RSU : 0% EB), es mayor que los resultados obtenidos por, Oliva *et al.* (2010), que obtuvieron 130 mg Cl/L en los lixiviados del proceso de vermicompostaje de residuos orgánicos. Por su parte, Preciado *et al.* (2011), señalan que los lixiviados de vermicompost de residuos sólidos orgánicos contienen cloro 607

mg/L, debido al origen de las aguas aplicadas como riego a las camas vermicompostadoras.

Thompson y Troeh (1988), indican que existen importantes cantidades de cloro unidas a los compuestos orgánicos, los cloruros son compuestos aniones muy solubles. Los mismos autores también, mencionan que los sustratos ricos en sales solubles suelen contener gran cantidad de cloruros en solución y como estos son muy solubles se desplazan hacia abajo en presencia del agua.

4.2.5.2.7. Boro

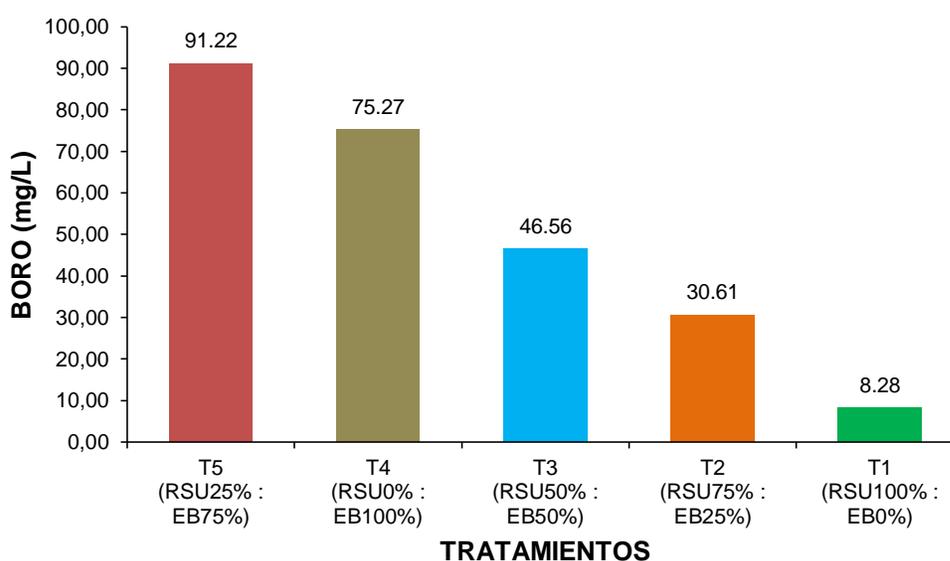


Figura 40. Contenido de boro (mg/L)

En la Figura 40, se muestra el contenido de boro que tuvo los biolixiviados de RSU y EB; en el T5 (0% RSU : 100% EB) se obtuvo 91.22 mg B/L, seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) con 75.27 mg B/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 46.56 mg B/L, T2 (75% RSU : 25% EB) 30.61 mg B/L y T1 (100% RSU : 0% EB) con 8.28 mg B/L.

La concentración de boro en el T1 (100% RSU : 0% EB), T3 (50% RSU : 50% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB) es bajo, en comparación con los resultados obtenidos por Quaik *et al.* (2012), que registraron 182 mg B/L en el lixiviado del vermicompostaje de residuos vegetales, 191 mg B/L en el lixiviado de estiércol de vaca mezclado con residuos vegetales (Relación 1:2) y 151 mg B/L en el lixiviado del vermicompostaje de estiércol de

vaca. Sin embargo, Ávila *et al.* (2015), encontró un bajo contenido de boro (0.01 mg B/L), en los lixiviados del vermicompostaje de residuos vegetales con hongos.

Thompson y Troeh (1988), señalan que los compuestos de boro son bastante solubles en agua y están ligados a la materia orgánica.

4.2.5.3. pH del producto final

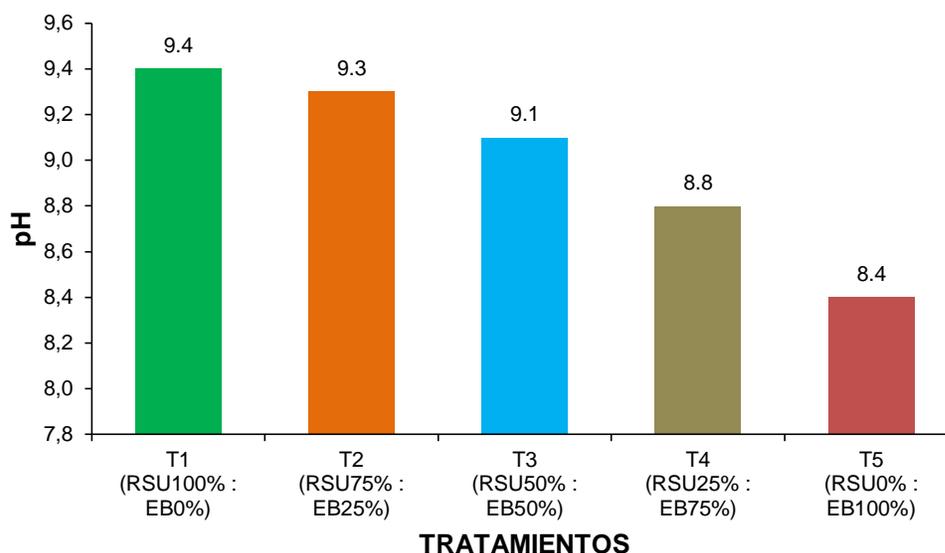


Figura 41. pH del producto final

En la Figura 41, se observa que en el T1 (100% RSU : 0% EB) se obtuvo un pH final de 9.4 y es el valor más alto, seguido por los demás tratamientos. En comparación con el pH final del T1 (100% RSU : 0% EB), Ávila *et al.* (2015), obtuvieron un pH de 9.06 en los lixiviados del vermicompostaje de desperdicios vegetales con hongos. En relación al pH final del T5 (0% RSU : 100% EB), Benítez *et al.* (1996), registraron un pH de 8.45 en los lixiviados del vermicompost de estiércol de ovino. Sin embargo, Chavez y Fuentes (2013), obtuvieron un pH de 9.3 en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de bovino.

Al respecto según a la representación esquemática de la reacción del pH de Truog (1946) citado por Thompson y Troeh (1988), se deduce que el pH del T5 (0% RSU : 100% EB) 8.4, tiene una reacción medianamente alcalino y el T4 (25% RSU : 75% EB) 8.8, T3 (50% RSU : 50% EB) 9.1, T2 (75% RSU : 25% EB) 9.3 y T1 (100% RSU : 0% EB) 9.4, tienen una reacción pH fuertemente alcalino. Por otro lado el esquema de Truog también nos

ayuda a interpretar la disponibilidad de los macro y microelementos en base a la reacción pH (Anexo 22).

La reacción alcalina del pH es debido a la excesiva concentración de elementos alcalinizantes (potasio, calcio, magnesio y sodio), tanto en el sustrato, como en el agua utilizada para riego que tenía un pH de 7.7. Además, Bollo (2001), indica que el alimento ingerido por las lombrices, los ácidos orgánicos sufren una neutralización por el carbonato cálcico secretado por las glándulas de Morren que se encuentran en la parte terminal del esófago, por lo que el vermicompost excretado es de reacción alcalina.

4.2.5.4. Conductividad eléctrica del producto final

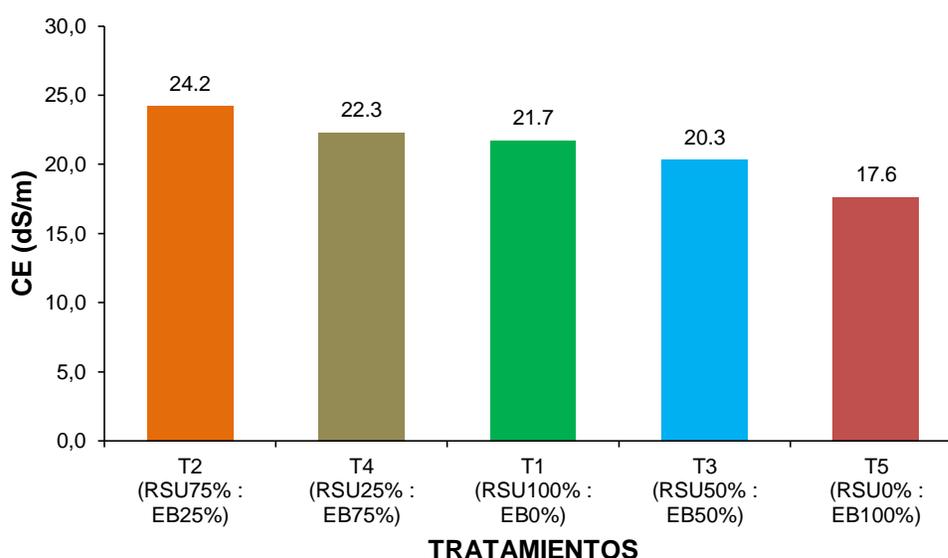


Figura 42. Conductividad eléctrica del producto final

En la Figura 42, se puede visualizar que en todos los tratamientos hubo una alta y excesiva concentración de sales, es así que en el T2 (75% RSU : 25% EB) se obtuvo 24.2 dS/m, seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) 22.3 dS/m, T1 (100% RSU : 0% EB) 21.7 dS/m, T3 (50% RSU : 50% EB) 20.3 dS/m y T5 (0% RSU : 100% EB) 17.6 dS/m; los biolixiviados producidos en los tratamientos que contenían sustratos con mayores proporciones de RSU, es donde hubo una mayor concentración de sales.

Con respecto a esta situación, Carballo *et al.* (2009) y Oliva *et al.* (2010) citados por Preciado *et al.* (2011), mencionan que la conductividad eléctrica puede ser ajustada

mediante la dilución con agua natural a fin de evitar problemas de fitotoxicidad, el pH también, se puede regular a la neutralidad aplicando ácido cítrico. Sobre esta base, se deduce que existe la posibilidad de manejar las altas concentraciones de sales y el pH alcalino de los biolixiviados, por ser un bioabono líquido que, puede ser diluido en mayores cantidades de agua, al cual se puede aplicar cualquier sustancia orgánica que reduzca la alcalinidad del pH.

Carita (2014), obtuvo una conductividad eléctrica final de 12.67 dS/m en el vermicompost del T2 (HCR 50% : RSU 50%). En relación con los resultados finales de conductividad eléctrica obtenidos en el biolixiviado del T5 (0% RSU : 100% EB) 17.6 dS/m, Ávila *et al.* (2015), registraron 7.27 dS/m de conductividad eléctrica en los lixiviados del vermicompostaje de estiércol de vacuno.

4.2.5.5. Metales pesados

Cuadro 21. Contenido de metales pesados en los biolixiviados

| Parámetros | Tratamientos | | | | |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | T1 (RSU 100% : EB 0%) | T2 (RSU 75% : EB 25%) | T3 (RSU 50% : EB 50%) | T4 (RSU 25% : EB 75%) | T5 (RSU 0% : EB 100%) |
| Cr (mg/L) | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 |
| Pb (mg/L) | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cd (mg/L) | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |

Fuente: Elaboración propia, en base al análisis químico del laboratorio Spectrolab-UTO (2015)

En el Cuadro 21, se muestra la concentración de algunos metales pesados que contenían los biolixiviados del proceso de vermicompostaje de RSU y EB, el cual fue analizado en el laboratorio Spectrolab-UTO (Anexo 26).

- **Cromo:** En el Cuadro 21, se observa que no se detectó ningún contenido de cromo en los biolixiviados de ninguno de los tratamientos, esto significa que los biolixiviados son aptos para el uso agrícola.
- **Plomo:** En el Cuadro 21, se muestra que no existe concentraciones de plomo en los biolixiviados de la mayoría de los tratamientos, con excepción del T1 (100% RSU : 0% EB) que tuvo una concentración de 0.20 mg Pb/L y según la clasificación de límites máximos en metales pesados de Moreno y Moral (2008), podemos verificar que

pertenece a la clase A (Anexo23), por lo tanto, los biolixiviados no contienen plomo al grado de causar una toxicidad a los seres vivos.

- **Cadmio:** En el Cuadro 21, se puede observar el contenido de cadmio en los biolixiviados, los cuales dieron los siguientes valores: T1 (100% RSU : 0% EB) 0.07 mg Cd/L, T2 (75% RSU : 25% EB) 0.08 mg Cd/L, T3 (50% RSU : 50% EB) 0.08 mg Cd/L, T4 (25% RSU : 75% EB) 0.09 mg Cd/L y T5 (0% RSU : 100% EB) 0.09 mg Cd/L; según a la tabla de clasificación de límites máximos en metales pesados en sólidos y líquidos de Moreno y Moral (2008), podemos verificar que el contenido de cadmio en los biolixiviados pertenecen a la clase A (Anexo23); entonces, los biolixiviados no tienen concentraciones altas de cadmio y se determina que son viables para uso agrícola.

4.2.6. Análisis económico de los biolixiviados

Cuadro 22. Ingresos netos y Relación B/C de los tratamientos

| Tratamientos | Rendimiento (l/Trat.) | Rendimiento Ajustado 10% | Beneficio Bruto (20 Bs/L) | Costo de Producción (Bs/Trat) | Beneficio Neto (Bs/Trat) | B/C |
|--------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| T1 | 35.70 | 32.13 | 642.60 | 351.02 | 291.58 | 1.83 |
| T2 | 31.60 | 28.44 | 568.80 | 377.44 | 191.37 | 1.51 |
| T3 | 27.30 | 24.57 | 491.40 | 374.39 | 117.01 | 1.31 |
| T4 | 25.30 | 22.77 | 455.40 | 378.31 | 77.10 | 1.20 |
| T5 | 24.90 | 22.41 | 448.20 | 397.76 | 50.44 | 1.13 |

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 22, se puede visualizar la evaluación de la rentabilidad de los tratamientos, en la producción de biolixiviados; los altos rendimientos se obtuvieron en los siguientes tratamientos: T1 (100% RSU : 0% EB) 32.13 L, T2 (75% RSU : 25% EB) 28.44 L y T3 (50% RSU : 50% EB) 24.57 L seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) 22.77 y T5 (0% RSU : 100% EB) 22.41. Estos rendimientos fueron ajustados al 10 %.

En los costos de producción se consideró los costos de los materiales, insumos y mano de obra (Anexo25).

4.2.6.1. Beneficio neto

Los más altos beneficios se obtuvieron en los siguientes tratamientos: T1 (100% RSU : 0% EB) 291.58 Bs, T2 (75% RSU : 25% EB) 191.37 Bs y T3 (50% RSU : 50% EB) 117.01 Bs seguido por el T4 (25% RSU : 75% EB) 77.10 y T5 (0% RSU : 100% EB) 50.44.

Considerando que el precio del biolixiviado es de 20 Bs/L, dato que se obtuvo de la (Empresa BIOVEL Cochabamba).

4.2.6.2. Relación Beneficio/Costo

En el Cuadro 22, se observa que los 5 tratamientos demostraron una relación B/C > a 1; en el T1 (100% RSU : 0% EB) se obtuvo una relación de 1.83, lo que significa que de cada 1 Bs invertido se obtuvo una ganancia de 0.83 Bs, T2 (75% RSU : 25% EB) 1.51, de cada 1 Bs invertido se obtuvo una ganancia de 0.51 Bs, T3 (50% RSU : 50% EB) 1.31, de cada 1 Bs invertido se ganó 0.31 Bs, T4 (25% RSU : 75% EB) 1.20, significa que se obtuvo 0.20 Bs de ganancia y en el T5 (0% RSU : 100% EB) solo se obtuvo 0.13 Bs de ganancia.

A pesar de las bajas ganancias en los dos últimos tratamientos, es necesario considerar la calidad del biolixiviado, puesto que en el T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), se obtuvo las más altas concentraciones de nutrientes entre macro y micro elementos (Anexo24).

5. CONCLUSIONES

En base a los objetivos específicos planteados y los resultados obtenidos en la presente tesis de grado, se llega a las siguientes conclusiones:

- Hubo un adecuado comportamiento de la temperatura en el T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB) con un promedio de 17 °C, que favorecieron el desarrollo de la población de lombrices durante el proceso de vermicompostaje de los RSU y EB.
- La alcalinidad y la alta concentración de sales se presentó en los tratamientos con mayores proporciones de RSU, T1 (100% RSU : 0% EB), T2 (75% RSU : 25% EB) y T3 (50% RSU : 50% EB), esto inhibió el desarrollo de la población de lombrices y la biodegradación del sustrato en estos tratamientos. El T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB) con un promedio pH de 8.7 y CE de 15.5 dS/m, fueron los tratamientos con menos concentración de sales.
- Sobre la población biológica, los tratamientos con una mejor evolución de lombrices fueron: el T4 (25% RSU : 75% EB) con promedios de (14 lombrices cliteladas, 2 lombrices sub-cliteladas, 9 lombrices juveniles, 25 cápsulas, con un total de 25 lombrices que registraron una biomasa de 10.7 g) y el T5 (0% RSU : 100% EB) con promedios de (18 lombrices cliteladas, 1 lombriz sub-clitelada, 12 lombrices juveniles, 66 cápsulas, con un total de 32 lombrices que registraron una biomasa de 14.3 g y también, se obtuvo una ganancia de 48.3 g de biomasa final en comparación a la biomasa inicial); esto demuestra que las lombrices tienen una mejor evolución en los sustratos con mayores proporciones de estiércol de bovino.
- Se obtuvo un mayor rendimiento de los biolixiviados en el T1 (100% RSU : 0% EB) con un promedio de 11.9 L, debido a la baja retención de humedad en el sustrato de este tratamiento, efecto que fue causado por la descomposición y reducción de volumen del material o sustrato en este tratamiento.
- En los resultados químicos de los biolixiviados, los tratamientos con las más altas concentraciones de nutrientes fueron el T4 (25% RSU : 75% EB), con 490.00 mg N/L, 0.24 mg Cu/L, 1.14 mg Zn/L y 4300.70 mg Cl/L y el T5 (0% RSU : 100% EB) con 343.43 mg Ca/L, 232.40 mg Mg/L, 4.23 mg Fe/L, 3.80 mg Mn/L, 1079.76 mg Na/L y 91.22 mg B/L.
- La concentración de metales pesados fue bajo; por lo tanto, los biolixiviados no son considerado tóxicos por estos elementos.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis económico, los cinco tratamientos demostraron una relación B/C >1 ; sin embargo, el T1 (100% RSU : 0% EB) mostró una mayor rentabilidad con una relación B/C de 1.83, lo que significa que de cada 1 Bs invertido, se logró recuperar el 1 Bs y adicionalmente se tuvo una ganancia de 0.83 Bs.

6. RECOMENDACIONES

Por consiguiente luego de haber analizado los resultados del presente trabajo de investigación, se tiene las siguientes recomendaciones:

- Para futuras investigaciones en la técnica del vermicompostaje, no es recomendable el pre-compostaje en columna de cajas, puesto que en este tipo de pre-compostaje el sustrato no logra alcanzar altas temperaturas, para la activación de la microflora termofílica, ni la eliminación de patógenos.
- Si se quiere aplicar los biolixiviados como bioabono, se recomienda el biolixiviado del T5 (0% RSU : 100% EB), que tiene un pH medianamente alcalino y es el tratamiento que contiene menos concentración de sales en comparación con los demás tratamientos.
- Para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos mediante la técnica del vermicompostaje, se sugiere utilizar proporciones del T4 (25% RSU : 75% EB), ya que esta combinación de RSU y EB es lo más adecuado como alimento de las lombrices, a la vez la evolución de lombrices es óptima.
- En cuanto al contenido de nutrientes en los biolixiviados, se recomienda el T4 (25% RSU : 75% EB) y T5 (0% RSU : 100% EB), que tienen considerables concentraciones de macro y micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Na, Cl y B), en los biolixiviados de estos tratamientos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Angima, S.; Noack, M. y Noack, S. 2011. Composting with worms. U. S. Department of Agriculture. Oregon State University. p. 6.
- Ávila, L.; Rodríguez, A.; Rodríguez, N.; Guevara, RG.; Torres, I.; Ocampo, RV. y Moustapha, B. 2015. Vermicompost leachate as a supplement to increase tomato fruit quality. Journal of soil scientific and plant nutrition. Vol. 1. p.p. 46-59.
- Acosta, CM.; Solís, O.; Villegas, OG.; Cardoso, L. 2012. Precomposteo de residuos orgánicos y su efecto en la dinámica poblacional de *Eisenia foetida*. Agronomía costarricense. Vol. 1. (Nº 37). p.p. 127-139.
- Barradas, A. 2005. Gestión integral de residuos sólidos municipales (en línea). México. Consultado 22 abr. 2015. Disponible en.
http://oa.upm.es/1922/1/Barradas_MONO_2009_01.pdf
- Benítez, E.; Elvira, C.; Gomez, M.; Gallardo, F. y Nogales, R. 1996. Leachates from a vermicomposting process; A possible new liquid fertilizer?. Kluwer academic publishers. Vol. 66. p.p. 323-326.
- Bollo, E. 2001. Lombricultura, una alternativa de reciclaje. Sistema digestivo de la lombriz. SOBOC GRAFIC. Quito, Ecuador. p.p. 16; 21; 37; 70.
- Cacciamani, MA. 1999. Lombricultura, una actividad ecológica y rentable. Residuos domiciliarios. Hemisferio Sur. 2^{da} Edición. Buenos Aires, Argentina. Hemisferio Sur S.A. p. 37.
- Cano, CN. y G, N. 2006. Efecto de la aplicación del EM sobre la capacidad reproductiva de la lombriz *Eisenia foetida* y la calidad del lombricompost. Estiércol de bovino. Trabajo de graduación. Universidad Earth. Guácimo, Costa Rica. p.p. 17-20.
- Carita, E. 2014. Biotransformación de residuos de hoja de coca (*Erythroxylum coca*) mediante vermicompostaje en el Centro Experimental de Kallutaca. Generación de Residuos Sólidos orgánicos en Bolivia. Tesis de Grado. Universidad Pública de El Alto. El Alto, Bolivia. p.p. 11; 28.

- Carrillo, VB. 2013. Evaluación de la calidad de humus de lombriz a partir de sustratos orgánicos procedentes de baños ecológicos y estiércol animal en el altiplano norte de La Paz. Evaluación del pH en laboratorio. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. p.p. 54-55.
- Casco, CA. e Iglesias, MC. 2005. Producción de biofertilizantes líquidos a base de lombricomposteo (en línea). Argentina. Consultado 05 dic. 2014. Disponible en. <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2005/5-Agrarias/A-063.pdf>
- Castells, XE. 2000. Reciclaje de Residuos Industriales. Definición de residuo. Díaz de Santos S.A. Madrid, España. p. 15.
- Chavez, CR. y Fuentes, AE. 2013. Determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lixiviado obtenido del estiércol de bovino utilizando *Eisenia foetida* (Lombriz roja californiana). Obtención de lixiviados y realización de análisis fisicoquímico. Trabajo de Graduación. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. p.p. 45-70.
- Choque, GE. 2010. Ovulación de lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*) criadas en distintos sustratos orgánicos. Número de huevos en toda la experimentación. Tesis de Grado. Universidad Autónoma "Tomas Frías". Potosí, Bolivia. p. 40.
- Chura, D. 2010. Producción y tiempo de maduración de humus de lombriz (*Eisenia foetida*), obtenido de estiércoles de cinco Sp de ganado criado en el departamento de potosí. Comportamiento de pH en cinco sustratos, en la producción de humus. Tesis de Grado. Universidad Autónoma "Tomas Frías". Potosí, Bolivia. p.p. 62-63.
- Empresa Municipal de Aseo El Alto (EMALT), 2015. Residuos Sólidos en la Ciudad de El Alto. Generación y composición de los residuos sólidos. La Paz, Bolivia. p. 1.
- Ferruzzi, C. 1994. Manual de lombricultura. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. p. 138.
- Fundación Hivos 2015. Usos y beneficios del biol y biogás. Nutrientes que contiene el bio bovino. Dávalos, J. Segunda edición proyecto BDG-HIVOS. La Paz, Bolivia. Dávalos, J. p. 16.

- González, KD. 2013. Efluente y té de vermicompost en la producción de hortalizas de hoja en sistema NFT. Efluente de vermicompost. Tesis. Montecillo, Texcoco, México. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. p.p. 6-7.
- Google Earth. 2016. (Programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital). Consultado 16 de mar.2016. Disponible en. <https://www.google.com.bo/maps/@-16.5239446,68.3090933,858a,20y,180h/data=!3m1!1e3>
- Larco, E. 2004. Preparación de lixiviados de compost y lombricompost (en línea). Costa Rica. Consultado 29 sep. 2014. Disponible en. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1897E/A1897E.PDF>
- Legall, M.; Discoviskly, L. y Valenzuela, Z. 2004. Manual básico de compostaje para condiciones tropicales. Escuela de Agricultura y Ganadería de Estela Francisco Luis Espinoza. Nicaragua. p. 360.
- Ley del Medio Ambiente N° 1333, 1992. Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos. (Título I, Disposiciones generales. Capítulo II, De las siglas y definiciones. Artículo 9. Enciso (b), Definiciones). p.p. 278-285.
- López, C.; Ruelas, RD.; Sañudo, RR.; Armenta, C. y Félix, JA. 2013. Influencia de diferentes sustratos orgánicos en la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). Tecnociencia Chihuahua. Vol. 7, (N° 2). pp. 81-87.
- Mamani, G.; Mamani, F.; Sainz, H. y Villca, R. 2012. Comportamiento de la lombriz roja (*Eisenia spp.*) en sistemas de vermicompostaje de residuos orgánicos. Journal of the selva andina research society. Vol. 3, (N° 1). p.p. 44-54.
- Mayta, E. 2012. Evaluación agromorfológica y componentes de rendimiento de doce accesiones de cañahua en condiciones de kallutaca. Vegetación. Tesis de Grado. Universidad Pública de El Alto. El Alto, Bolivia. pp. 22.
- Meléndez, NE. y Huerta, CR. 2010. Influencia de una mezcla de abonos orgánicos y fertilizantes sintéticos sobre el crecimiento y rendimiento del pipián (*Cucúrbita argyrosperma Huber*), Finca el Plantel, Masaya, 2009. Análisis económico. Trabajo de Graduación. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria. p. 8.

- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), 2011. Diagnóstico de la Gestión de Residuos en Bolivia 2011. Composición física de los Residuos Sólidos. La Paz, Bolivia. p.p. 69-70.
- Mota, ER. 1997. Evaluación de nitrógeno, fósforo y estiércol de bovino sobre el rendimiento de frutos de miltomate (*Physalis philadelphica Lam.*). Estiércol de bovino. Tesis. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. p. 17.
- Moreno, A. 2015. Actividades de riego, abonado y tratamientos en cultivos. Residuos sólidos urbanos. Paraninfo S.A. Nobel S.A. España. Paraninfo S.A. p.p. 101; 108.
- Moreno, J. y Moral, R. 2008. Compostaje. Naturaleza y acondicionamiento de los residuos orgánicos o materiales de partida. Aedos S.A. Mundi-Prensa. Madrid, España. Aedos S.A. p.p. 194; 203.
- Montes, LM. y Ruiz, MA. 2010. Manual para el establecimiento y manejo de instalaciones lombrícolas (en línea). México. Consultado 05 dic. 2014. Disponible en. http://portal2.edomex.gob.mx/icamex/investigacion_publicaciones/otras_alternativas/hongo_seta/groups/public/documents/edomex_archivo/icamex_arch_lombri.pdf
- Morales, JC.; Fernández, MV.; Montiel, A.; Peralta, BC. 2009. Evaluación de sustratos orgánicos en la producción de lombricomposta y desarrollo de lombriz (*eisenia foetida*). BIOtecnia. Vol. 11. (Nº 1). p.p. 19-26.
- Navarro, S. y Navarro, G. 2003. Química Agrícola. El fósforo en la planta. Aedos S.A. Mundi-Prensa. Madrid, España. Aedos S.A. p.p. 219-231; 419-424.
- Nogales, R.; Romero, E.; y Fernández, MJ. 2014. De Residuo a Recurso el Cambio hacia la Sostenibilidad, Vermicompostaje: Procesos, productos y aplicaciones. Metales pesados. Aedos S.A. Mundi-Prensa. Madrid, España. Aedos S.A. p.p. 17-21; 48.
- Oliva, MA.; Rodríguez, L.; Mendoza, P.; Ruiz, B.; Álvarez, JD.; Dendooven, L. y Gutiérrez, FA. 2010. Optimization of worm-bed leachate for culturing of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) inoculated with *Glomus fasciculatum* and *Pseudomonas fluorescens*. Electronic journal of biotechnology. Vol. 13. (Nº 2). p.p. 1-8.

- Paco, GH. 2007. Biotransformación de los residuos orgánicos mediante compostaje y vermicompostaje en la zona de Carmen Pampa. Los residuos sólidos. Tesis de Grado. Municipio de Coroico, Unidad Académica Campesina de Carmen Pampa (UAC-CP). La Paz, Bolivia. p.p. 47-48.
- Pérez, E. 2015. Aplicaciones Foliars de Líquido de Lombriz Enriquecido con Harina de Lombriz (*Eisenia foetida L.*) en Plántulas de Maíz (*Zea mays*). Líquido de lombriz. Tesis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. p. 10.
- Preciado, P.; Fortis, M.; García, JL.; Rueda, EO.; Esparza, JR.; Lara, A.; Segura, MA. y Orozco, JA. 2011. Evaluación de soluciones nutritivas orgánicas en la producción de tomate en invernadero. Redalyc. Vol. 36. Nº (10). p.p. 689-693.
- Quaik, S.; Embrandiri, A.; Rupani, PF. y Hakimi, MH. 2012. Potential of vermicomposting leachate as organic foliar fertilizer and nutrient solution in hydroponic culture. 2nd International conference on environment and bioscience. Vol. 44, (Nº 10). p.p. 43-47.
- Quaik, S. y Hakimi, M. 2013. A Review on potential of vermicomposting derived liquids in agriculture use. International journal of scientific and research publications. Vol. 3. p.p. 1-6.
- Rojas, RE. 2013. Evaluación productiva de dos variedades de cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum L.*) a la aplicación de tres niveles de lixiviado de lombriz. Análisis químico de abonos. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. p. 93.
- Ruiz, M. de 2011. Lombricomposta (en línea). México. Consultado 29 sep. 2014. Disponible en. <http://www.uia.mx/web/files/publicaciones/taller-de-lombricomposta.pdf>
- Sainz, H. 1999 y Bollo, E. 1999. El lixiviado del humus produce controversias. (en línea). Consultado 11 jul. 2014. Disponible en. <http://lombricesrojas.blogspot.com/2007/09/el-lixiviado-de-humus-provoca.html>
- Sánchez, C. 2003. Abonos orgánicos y Lombricultura. El estiércol. Servilibros. Ripalme; Lima, Perú. Servilibros. p.p. 50; 94-95; 119.

- Sánchez, A.; Artola, A.; Barrena, R.; Dios, M.; García, JC.; López, R.; Pérez, MD.; Puig, I.; Soto, M. y Gea, T. 2014. De Residuo a Recurso, el Cambio hacia la Sostenibilidad, Residuos urbanos. Generación de Residuos Urbanos. Aedos S.A. Mundi-Prensa. Barcelona, España. Aedos S.A. p.p. 17-25; 34-37.
- Saavedra, MA. 2007. Biodegradación de alperujo utilizando hongos del género *pleurotus* y anélidos de la especie *Eisenia foetida*. Ciclo biológico de la *Eisenia foetida*. Tesis doctoral. Universidad de Granada. Granada, España. p. 47.
- Schuldt, M. 2006. Lombricultura. Determinación de edades en la población de lombrices. Aedos S.A. Mundi-Prensa. Madrid, España. Aedos S.A. pp. 29; 53; 74.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). 2015. Centro de información meteorológico (en línea). Bolivia. Consultado 5 jun. 2016. Disponible en. <http://www.senamhi.org.bo>
- Serrano, T. 2004, Evaluación de procesos de vermicompostaje para el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos de la localidad de Tiahuanaco. Introducción. Tesis de Grado. Universidad Católica Boliviana, UCB. La Paz, Bolivia. p.p. 2; 22.
- Simposio iberoamericano de ingeniería de residuos. (I, 2008, Girona, España). 2008. Ensayos con lodos de una EDAR de la industria papelera para la obtención de humus de lombriz. Pardini, G.; Fatsini, A.; Gispert, M.; Pelach, MA.; Mutjé, P. Castellón España. REDISA 2008. p. 9.
- Sullcata, RP. 2014. Desarrollo poblacional de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en relación a sustratos a base de estiércol y rastrojo de cebada. Crecimiento de la lombriz en sus tres fases etológicas. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. pp. 65-66; 68-72.
- Tenecela, X. 2012. Producción de humus de lombriz mediante el aprovechamiento y manejo de los residuos orgánicos. Generación de residuos orgánicos. Monografía. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. p.p. 12-13.
- Thompson, LM. y Troeh, FR. 1988. Los suelos y su fertilidad. Hierro. REVERTÉ, S.A. Barcelona, España. p.p. 418; 432.

- Urquiaga, R. 2011. Manual básico de compostaje y vermicompostaje doméstico (en línea). España. Consultado 22 abr. 2015. Disponible en.
<http://www.compostaenred.org/documentacion/ManualesRed/ManualBasicoCompostaenRED.pdf>
- Yapu, W. 2015. Adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) en la Estación Experimental de Kallutaca. Características edafoclimáticas. Tesis de Grado. Universidad Pública de El Alto. El Alto, Bolivia. p.p. 24.

8. ANEXOS

Anexo 1. Acopio de RSU



Anexo 2. Acopio del EB



Anexo 3. Pre-compostaje de los RSU



Anexo 4. Limpieza de literas del lombricario**Anexo 5. Impermeabilización de las cajas****Anexo 6. Colocado de mallas milimétricas en las cajas**

Anexo 7. Llenado de las cajas con el sustrato**Anexo 8. Incorporación de bandas de aclimatación****Anexo 9. Inoculación**

Anexo 10. Aireación del sustrato**Anexo 11. Cosecha de lombrices****Anexo 12. Cosecha de biolixiviados**

Anexo 13. Toma de muestras para análisis químico



Anexo 14. Control de la temperatura



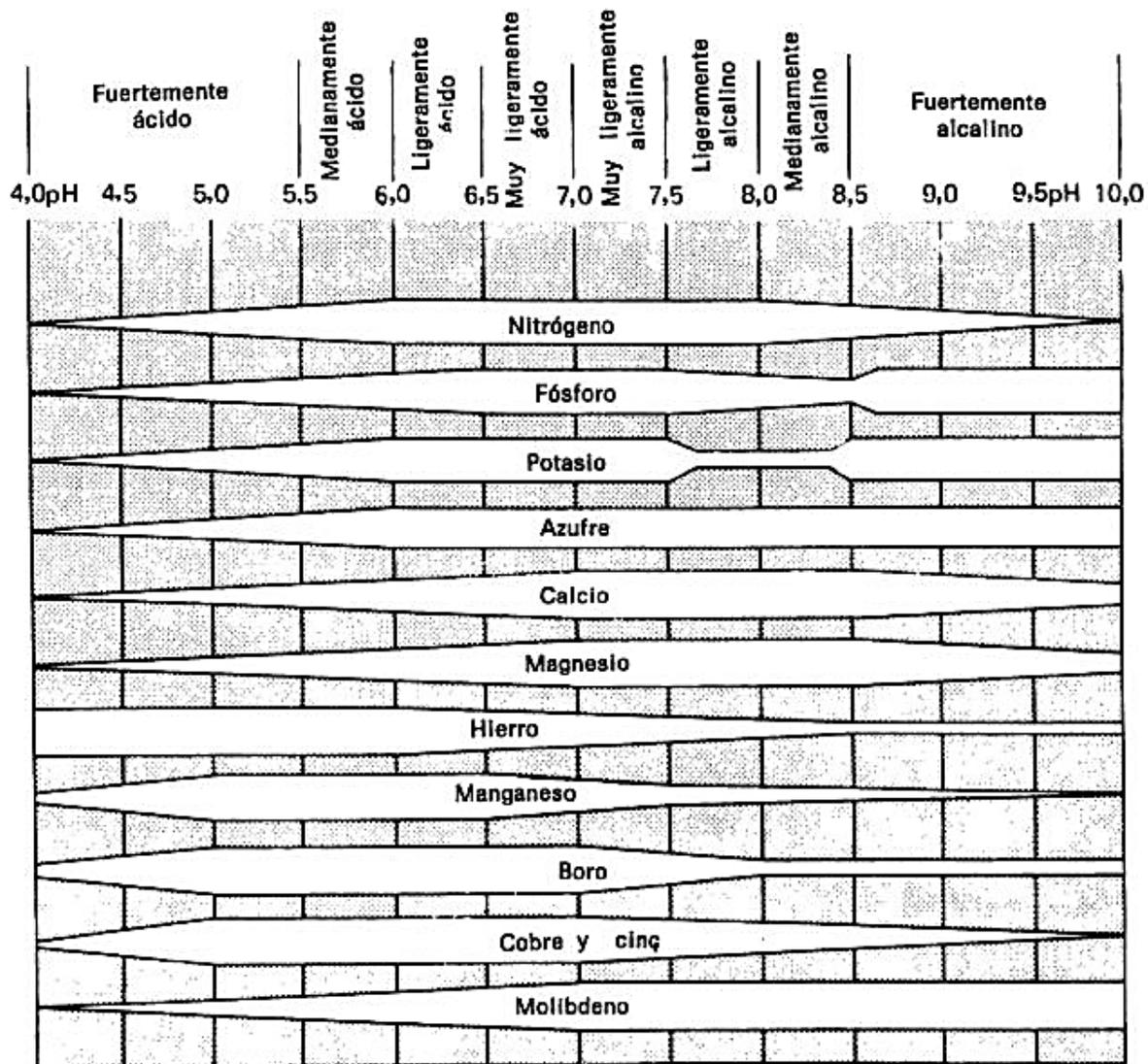
Anexo 15. Control del pH y CE



Anexo 16. Muestreo**Anexo 17. Clasificación y cuantificación de variables biológicas****Anexo 18. Cápsulas o cocones**

Anexo 19. Lombrices juveniles**Anexo 20. Biomasa final de lombrices****Anexo 21. Variación de la temperatura en las muestras**

Anexo 22. Esquema de la disponibilidad de nutrientes según a la reacción del pH



La disponibilidad máxima se indica por la anchura de la banda

Representación esquemática de la relación entre la disponibilidad de los principales nutrientes de las plantas y la relación del suelo (Truog, 1946).

Anexo 23. Límites máximos de metales pesados permitidos, en abonos sólidos y líquidos (mg/kg)

| | Clase A | Clase B | Clase C |
|---------------|---------|---------|---------|
| Cadmio | 0.7 | 2 | 3 |
| Cobre | 70 | 300 | 400 |
| Níquel | 25 | 90 | 100 |
| Plomo | 45 | 150 | 200 |
| Zinc | 200 | 500 | 1000 |
| Mercurio | 0.4 | 1.5 | 2.5 |
| Cromo (total) | 70 | 250 | 300 |

Clase A: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A.

Clase B: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B.

Clase C: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna C.

Fuente: Moreno y Moral (2008)

Anexo 24. Contenido de nutrientes en biolixiviados de RSU y EB

| Parámetros | Tratamientos | | | | |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | T1 (RSU 100% : EB 0%) | T2 (RSU 75% : EB 25%) | T3 (RSU 50% : EB 50%) | T4 (RSU 25% : EB 75%) | T5 (RSU 0% : EB 100%) |
| N (mg/L) | 252.00 | 378.00 | 420.00 | 490.00 | 364.00 |
| P (mg/L) | 23.68 | 91.12 | 85.29 | 84.72 | 62.81 |
| K (mg/L) | 7738.00 | 8310.00 | 6119.00 | 6643.00 | 5048.00 |
| Ca (mg/L) | 46.66 | 103.93 | 183.93 | 295.09 | 343.43 |
| Mg (mg/L) | 40.80 | 58.45 | 122.01 | 201.43 | 232.40 |
| Fe (mg/L) | 3.65 | 1.24 | 1.72 | 2.68 | 4.23 |
| Cu (mg/L) | 0.19 | 0.18 | 0.20 | 0.24 | 0.18 |
| Zn (mg/L) | 0.62 | 0.60 | 0.96 | 1.14 | 1.07 |
| Mn (mg/L) | 0.45 | 1.54 | 2.96 | 3.38 | 3.80 |
| Na (mg/L) | 258.00 | 326.00 | 711.00 | 881.00 | 1080.00 |
| Cl (mg/L) | 2573.00 | 3384.00 | 3419.00 | 4301.00 | 4089.00 |
| B (mg/L) | 8.28 | 30.61 | 46.56 | 75.27 | 91.22 |

T1: Considerable

T2: > Contenido en Macronutrientes: P y K

T3: Considerable

T4: > Contenido en Macro y Micronutrientes: N, Cu, Zn y Cl

T5: > Contenido Micronutrientes Ca, Mg, Fe, Mn, Na y B

Fuente: Elaboración propia, en base al análisis químico del laboratorio Spectrolab-UTO (2015)

Anexo 25. Costos de producción del biolixiviado

| № | Detalle | Cantidad | Unidad | Costo Unitario (Bs) | Total (Bs) |
|-------------------------------|--|---|--------|---------------------|--------------|
| COSTOS FIJOS | | | | | |
| COSTOS FIJOS PARCIALES | | | | | 971.5 |
| Insumos y Materiales | | | | | 289.0 |
| T1 | | | | | 57.8 |
| 1 | Malla milimétrica (plástica) | 1.6 | m | 8.0 | 12.8 |
| 2 | Agrofilm | 1.0 | m | 45.0 | 45.0 |
| T2 | | | | | 57.8 |
| 3 | Malla milimétrica (plástica) | 1.6 | m | 8.0 | 12.8 |
| 4 | Agrofilm | 1.0 | m | 45.0 | 45.0 |
| T3 | | | | | 57.8 |
| 5 | Malla milimétrica (plástica) | 1.6 | m | 8.0 | 12.8 |
| 6 | Agrofilm | 1.0 | m | 45.0 | 45.0 |
| T4 | | | | | 57.8 |
| 7 | Malla milimétrica (plástica) | 1.6 | m | 8.0 | 12.8 |
| 8 | Agrofilm | 1.0 | m | 45.0 | 45.0 |
| T5 | | | | | 57.8 |
| 9 | Malla milimétrica (plástica) | 1.6 | m | 8.0 | 12.8 |
| 10 | Agrofilm | 1.0 | m | 45.0 | 45.0 |
| Actividades Culturales | | | | | 682.5 |
| T1 | | | | | 114.0 |
| 11 | Instalación del experimento | 4.0 | hrs | 5.0 | 20.0 |
| 12 | Evaluación de variables físicos. químicos y biológicos | 18.0 | hrs | 5.0 | 90.0 |
| 13 | Cosecha de biolixiviados | 0.8 | hrs | 5.0 | 4.0 |
| T2 | | | | | 136.5 |
| 14 | Instalación del experimento | 4.0 | hrs | 5.0 | 20.0 |
| 15 | Evaluación de variables físicos. químicos y biológicos | 22.5 | hrs | 5.0 | 112.5 |
| 16 | Cosecha de biolixiviados | 0.8 | hrs | 5.0 | 4.0 |
| T3 | | | | | 136.5 |
| 17 | Instalación del experimento | 4.0 | hrs | 5.0 | 20.0 |
| 18 | Evaluación de variables físicos. químicos y biológicos | 22.5 | hrs | 5.0 | 112.5 |
| 19 | Cosecha de biolixiviados | 0.8 | hrs | 5.0 | 4.0 |
| T4 | | | | | 136.5 |
| 20 | Instalación del experimento | 4.0 | hrs | 5.0 | 20.0 |
| 21 | Evaluación de variables físicos. químicos y biológicos | 22.5 | hrs | 5.0 | 112.5 |
| 22 | Cosecha de biolixiviados | 0.8 | hrs | 5.0 | 4.0 |
| T5 | | | | | 159.0 |
| 23 | Instalación del experimento | 4.0 | hrs | 5.0 | 20.0 |
| 24 | Evaluación de variables físicos. químicos y biológicos | 27.0 | hrs | 5.0 | 135.0 |
| 25 | Cosecha de biolixiviados | 0.8 | hrs | 5.0 | 4.0 |
| T1 | | Insumos y materiales + Actividades culturales | | | 171.8 |
| T2 | | Insumos y materiales + Actividades culturales | | | 194.3 |
| T3 | | Insumos y materiales + Actividades culturales | | | 194.3 |
| T4 | | Insumos y materiales + Actividades culturales | | | 194.3 |
| T5 | | Insumos y materiales + Actividades culturales | | | 216.8 |

Continuación del Anexo 14.....

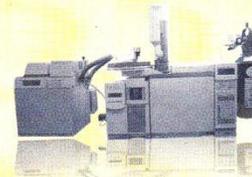
| COSTOS VARIABLES | | | | |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|----|---------------|
| T1 (RSU 100% : EB 0%) | | | | 179.2 |
| 26 | Lombriz roja californiana | 2.0 | kg | 69.6 |
| 27 | Residuos sólidos urbanos | 400.2 | kg | 0.1 |
| 28 | Estiércol de bovino | 0.0 | kg | 0.0 |
| T2 (RSU 75% : EB 25%) | | | | 183.1 |
| 29 | Lombriz roja californiana | 2.2 | kg | 69.6 |
| 30 | Residuos sólidos urbanos | 300.2 | kg | 0.1 |
| 31 | Estiércol de bovino | 132.5 | kg | 0.0 |
| T3 (RSU 50% : EB 50%) | | | | 180.1 |
| 32 | Lombriz roja californiana | 2.3 | kg | 69.6 |
| 33 | Residuos sólidos urbanos | 200.1 | kg | 0.1 |
| 34 | Estiércol de bovino | 264.9 | kg | 0.0 |
| T4 (RSU 25% : EB 75%) | | | | 184.0 |
| 35 | Lombriz roja californiana | 2.5 | kg | 69.6 |
| 36 | Residuos sólidos urbanos | 100.1 | kg | 0.1 |
| 37 | Estiércol de bovino | 397.4 | kg | 0.0 |
| T5 (RSU 0% : EB 100%) | | | | 181.0 |
| 38 | Lombriz roja californiana | 2.6 | kg | 69.6 |
| 39 | Residuos sólidos urbanos | 0.0 | kg | 0.1 |
| 40 | Estiércol de bovino | 529.8 | kg | 0.0 |
| COSTO DE PRODUCCIÓN | | | | |
| | T1 | Costos Fijos + Costos Variables | | 351.0 |
| | T2 | Costos Fijos + Costos Variables | | 377.4 |
| | T3 | Costos Fijos + Costos Variables | | 374.4 |
| | T4 | Costos Fijos + Costos Variables | | 378.3 |
| | T5 | Costos Fijos + Costos Variables | | 397.8 |
| Costo Total | | | | 1878.9 |

En los costos de los residuos sólidos urbanos (RSU) y estiércol de bovino (EB) solo se consideró los costos de transporte, puesto que estos insumos no tienen costo alguno.

Anexo 26. Análisis químico de biolixiviados de los RSU y EB



Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro



FOR - INFORME DE ENSAYO - 01
Revisión:00
Emisión 2015 - 06 - 20

INFORME DE ENSAYO

Nº: 35767

NOMBRE DEL CLIENTE

Universidad Pública de El Alto
Atn. Univ. Cleto Condori A.

DIRECCIÓN DEL CLIENTE

Av. Sucre - Villa Esperanza

PROCEDENCIA

Centro Experimental de Kallutaca -UPEA**

CARACTERÍSTICAS

Compuestas

RESPONSABLE MUESTREO

Univ. Cleto Condori A.**

FECHA DE MUESTREO 2015-04-05**

FECHA RECEPCIÓN

2015-11-12

FECHA DE ENSAYO Según detalle

PÁGINA

1/4

FECHA DE ENTREGA 2015-12-29

RESULTADOS:

| Parámetros | Unidades | Fecha de Ensayo | Norma / Método | L.D. | Código Cliente | | |
|-----------------|------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|---------|---------|
| | | | | | T1 | T2 | T3 |
| | | | | Código Laboratorio | 7918 | 7919 | 7920 |
| pH | | 2015-11-16 | ASTM D 1293-99 | | 9,4 | 9,3 | 9,1 |
| Conductividad | µS/cm | 2015-11-16 | ASTM D 1125-95 | 5 | 21710 | 24200 | 20310 |
| Calcio | Ca | 2015-11-27 | ASTM D 511-03 | 0,01 | 46,66 | 103,93 | 183,93 |
| Cromo III | Cr ³⁺ | 2015-11-26 | ASTM D 1687-02B | 0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Hierro | Fe | 2015-11-25 | ASTM D 1068-05A | 0,02 | 3,65 | 1,24 | 1,72 |
| Magnesio | Mg | 2015-11-25 | ASTM D 511-03 | 0,01 | 40,80 | 58,45 | 122,01 |
| Manganeso | Mn | 2015-11-26 | ASTM D 858-02A | 0,009 | 0,453 | 1,537 | 2,957 |
| Plomo | Pb | 2015-11-23 | ASTM D 3559-03A | 0,03 | 0,20 | <0,03 | <0,03 |
| Potasio | K | 2015-11-25 | ASTM D 4191-03 | 0,01 | 7738,10 | 8309,52 | 6119,05 |
| Sodio | Na | 2015-11-24 | ASTM D 3561-02 | 0,03 | 258,22 | 325,98 | 711,44 |
| Boro | B | 2015-11-17 | DIN 38405 T 17mod. | 0,01 | 8,28 | 30,61 | 46,56 |
| Cloruro | Cl ⁻ | 2015-11-17 | ASTM D 512-04B | 0,1 | 2573,4 | 3384,2 | 3419,4 |
| Fósforo Total | P _T | 2015-11-17 | EPA 365.2 | 0,01 | 23,68 | 91,12 | 85,29 |
| Nitrógeno Total | N _T | 2015-11-17 | ASTM 3590-89 | 0,1 | 252,0 | 378,0 | 420,0 |
| Sulfatos | SO ₄ ⁻ | 2015-11-18 | ASTM D 516-02 | 0,2 | **** | **** | **** |

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .

Valor con símbolo "<" implica por debajo del límite de determinación.

Conductividad Eléctrica = microsiemens /cm = micromhos/cm, medida a 21,2 °C

**** Interferencia de Matriz

T.S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jorge W. Fuentes A.
Jefe de Laboratorio

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

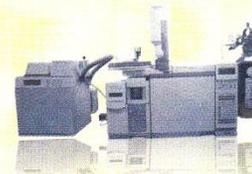
Dirección: Ciudadela Universitaria
Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
Casilla 252

e-mail: gerencia@spectrolab.com.bo
Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
www.spectrolab-bolivia.com
Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2)5260008
5262983
5264666



Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro



FOR - INFORME DE ENSAYO - 01
Revisión:00
Emisión 2015 - 06 - 20

INFORME DE ENSAYO

Nº: 35767

NOMBRE DEL CLIENTE

Universidad Pública de El Alto

Atn. Univ. Cleto Condori A.

Av. Sucre - Villa Esperanza

Centro Experimental de Kallutaca -UPEA**

DIRECCIÓN DEL CLIENTE

PROCEDENCIA

CARACTERÍSTICAS

RESPONSABLE MUESTREO

FECHA RECEPCIÓN

PÁGINA

Compuestas

Univ. Cleto Condori A.**

2015-11-12

3/4

FECHA DE MUESTREO 2015-04-05**

FECHA DE ENSAYO Según detalle

FECHA DE ENTREGA 2015-12-29

RESULTADOS:

| Parámetros | Unidades | Fecha de Ensayo | Norma / Método | L.D. | Código Cliente | |
|-----------------|------------------------------|-----------------|--------------------|-------|--------------------|---------|
| | | | | | T4 | T5 |
| | | | | | Código Laboratorio | |
| | | | | | 7921 | 7922 |
| pH | | 2015-11-16 | ASTM D 1293-99 | | 8,8 | 8,4 |
| Conductividad | µS/cm | 2015-11-16 | ASTM D 1125-95 | 5 | 22270 | 17600 |
| Calcio | Ca | 2015-11-27 | ASTM D 511-03 | 0,01 | 295,09 | 343,43 |
| Cromo III | Cr ³⁺ | 2015-11-26 | ASTM D 1687-02B | 0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Hierro | Fe | 2015-11-25 | ASTM D 1068-05A | 0,02 | 2,68 | 4,23 |
| Magnesio | Mg | 2015-11-25 | ASTM D 511-03 | 0,01 | 201,43 | 232,40 |
| Manganeso | Mn | 2015-11-26 | ASTM D 858-02A | 0,009 | 3,379 | 3,800 |
| Plomo | Pb | 2015-11-23 | ASTM D 3559-03A | 0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Potasio | K | 2015-11-25 | ASTM D 4191-03 | 0,01 | 6642,86 | 5047,62 |
| Sodio | Na | 2015-11-24 | ASTM D 3561-02 | 0,03 | 880,82 | 1079,76 |
| Boro | B | 2015-11-17 | DIN 38405 T 17mod. | 0,01 | 91,22 | 75,27 |
| Cloruro | Cl ⁻ | 2015-11-17 | ASTM D 512-04B | 0,1 | 4300,7 | 4089,2 |
| Fósforo Total | P _T | 2015-11-17 | EPA 365.2 | 0,01 | 84,72 | 62,81 |
| Nitrógeno Total | N _T | 2015-11-17 | ASTM 3590-89 | 0,1 | 490,0 | 364,0 |
| Sulfatos | SO ₄ ⁼ | 2015-11-18 | ASTM D 516-02 | 0,2 | **** | **** |

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .

Valor con símbolo "<" implica por debajo del límite de determinación.

Conductividad Eléctrica = microsiemens /cm = micromhos/cm, medida a 21,2 °C

**** Interferencia de Matriz

T.S. Rosmary Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jorge W. Fuentes A.
Jefe de Laboratorio

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
Casilla 252

e-mail: gerencia@spectrolab.com.bo
Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
www.spectrolab-bolivia.com
Oruro - Bolivia

Tel/Fax: (591-2)5260008
5262983
5264666



Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro

INFORME DE ENSAYO

N°: 35767

NOMBRE DEL CLIENTE

Universidad Pública de El Alto

DIRECCIÓN DEL CLIENTE

Atn. Univ. Cleto Condori A.

PROCEDENCIA

Av. Sucre - Villa Esperanza

CARACTERÍSTICAS

Centro Experimental de Kallutaca -UPEA**

RESPONSABLE MUESTREO

Univ. Cleto Condori A.**

FECHA DE MUESTREO 2015-04-05**

FECHA RECEPCIÓN

2015-11-12

FECHA DE ENSAYO Según detalle

PÁGINA

2/4

FECHA DE ENTREGA 2015-12-29

RESULTADOS:

| Parámetros | Unidades | Fecha de Ensayo | Norma / Método | L.D. | Código Cliente | | | T3 |
|------------|----------|-----------------|-----------------|------|--------------------|------|------|----|
| | | | | | T1 | T2 | T3 | |
| | | | | | Código Laboratorio | | | |
| | | | | | 7918 | 7919 | 7920 | |
| Cadmio | Cd | 2015-11-23 | ASTM D 3557-02A | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | |
| Cobre | Cu | 2015-11-25 | ASTM D 1688-02A | 0,05 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | |
| Zinc | Zn | 2015-11-24 | ASTM D 1691-02A | 0,05 | 0,62 | 0,60 | 0,96 | |

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .

T.S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jorge W. Fuentes A.
Jefe de Laboratorio

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
Casilla 252

gerencia@spectrolab.com.bo
Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2) 5260008
Telfs.: 5262983
5264666



INFORME DE ENSAYO

N°: 35767

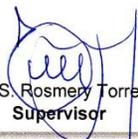
NOMBRE DEL CLIENTE Universidad Pública de El Alto
DIRECCIÓN DEL CLIENTE Atn. Univ. Cleto Condori A.
PROCEDENCIA Av. Sucre - Villa Esperanza
CARACTERISTICAS Centro Experimental de Kallutaca -UPEA**
RESPONSABLE MUESTREO Compuestas
FECHA RECEPCIÓN Univ. Cleto Condori A.** *FECHA DE MUESTREO* 2015-04-05**
PÁGINA 2015-11-12 *FECHA DE ENSAYO* Según detalle
FECHA DE ENTREGA 2015-12-29

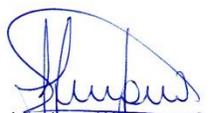
| RESULTADOS: | | | | Código Cliente | T4 | T5 |
|-------------|----------|-----------------|----------------|--------------------|------|------|
| | | | | Código Laboratorio | 7921 | 7922 |
| Parámetros | Unidades | Fecha de Ensayo | Norma / Método | L.D. | | |
| Cadmio | Cd | mg/l | 2015-11-23 | ASTM D 3557-02A | 0,05 | 0,09 |
| Cobre | Cu | mg/l | 2015-11-25 | ASTM D 1688-02A | 0,05 | 0,24 |
| Zinc | Zn | mg/l | 2015-11-24 | ASTM D 1691-02A | 0,05 | 1,14 |

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .


 T.S. Rosmery Torrez Y.
 Supervisor


 Ing. Jorge W. Fuentes A.
 Jefe de Laboratorio


 Ing. Jenny A. Espinoza Z.
 Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
 Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
 Casilla 252

gerencia@spectrolab.com.bo
 Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
 Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2) 5260008
 Telfs.: 5262983
 5264666

Anexo 27. Análisis químico del vermicompost de RSU y EB

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: MO 03/16

Página 1 de 5

INFORME DE ENSAYO EN MATERIA ORGÁNICA MO 03/16

Cliente: UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
 Solicitante: Univ. Cleto Condori Apaza
 Dirección del cliente: Z/Villa Tunaru, C/Eufronio Viscarra # 1224
 Procedencia de la muestra: Kallutaca - Laja
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Centro Experimental Kallutaca - UPEA
 Responsable del muestreo: Univ. Cleto Condori Apaza
 Fecha de muestreo: 05 de abril de 2015
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 17 de febrero de 2016
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 17 de febrero al 03 de marzo, 2016
 Caracterización de la muestra: Materia orgánica
 Tipo de muestra: Compuesta
 Envase: Bolsa plástica
 Código LCA: 3 - 1
 Código original: T 1

Resultado de Análisis

| Parámetro | Método | Unidad | Límite de determinación | 3 - 1 T 1 |
|-----------------|------------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| pH acuoso | ISRIC 4 | | 1 -14 | 10 |
| Nitrógeno total | ASPT-88 | % | 0,0030 | 2,5 |
| Fósforo total | Metodo calcinación/ASPT 91 | mg/kg | 0,40 | 7683 |
| Potasio total | Microwave Reaction System/EPA 258. | mg/kg | 8,0 | 57270 |

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, marzo 08 de 2016

c.c.: Arch.
JCH/LCA



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: MO 03/16

Página 2 de 5

INFORME DE ENSAYO EN MATERIA ORGÁNICA MO 03/16

Cliente: UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
 Solicitante: Univ. Cleto Condori Apaza
 Dirección del cliente: Z/Villa Tunaru, C/Eufonio Viscarra # 1224
 Procedencia de la muestra: Kallutaca - Laja
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Centro Experimental Kallutaca - UPEA
 Responsable del muestreo: Univ. Cleto Condori Apaza
 Fecha de muestreo: 05 de abril de 2015
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 17 de febrero de 2016
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 17 de febrero al 03 de marzo, 2016
 Caracterización de la muestra: Materia orgánica
 Tipo de muestra: Compuesta
 Envase: Bolsa plástica
 Código LCA: 3 - 2
 Código original: T 2

Resultado de Análisis

| Parámetro | Método | Unidad | Límite de determinación | 3 - 2 T 2 |
|-----------------|------------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| pH acuoso | ISRIC 4 | | 1 - 14 | 9,9 |
| Nitrógeno total | ASPT-88 | % | 0,0030 | 2,2 |
| Fósforo total | Metodo calcinación/ASPT 91 | mg/kg | 0,40 | 8531 |
| Potasio total | Microwave Reaction System/EPA 258. | mg/kg | 8,0 | 50580 |

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, marzo 08 de 2016

c.c.: Argh
JCH/LCA





Informe de Ensayo: MO 03/16

Página 3 de 5

INFORME DE ENSAYO EN MATERIA ORGÁNICA MO 03/16

Cliente: UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
 Solicitante: Univ. Cleto Condori Apaza
 Dirección del cliente: Z/Villa Tunaru, C/Eufronio Viscarra # 1224
 Procedencia de la muestra: Kallutaca - Laja
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Centro Experimental Kallutaca - UPEA
 Responsable del muestreo: Univ. Cleto Condori Apaza
 Fecha de muestreo: 05 de abril de 2015
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 17 de febrero de 2016
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 17 de febrero al 03 de marzo, 2016
 Caracterización de la muestra: Materia orgánica
 Tipo de muestra: Compuesta
 Envase: Bolsa plástica
 Código LCA: 3 - 3
 Código original : T 3

Resultado de Análisis

| Parámetro | Método | Unidad | Límite de determinación | 3 - 3 T 3 |
|-----------------|-----------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| pH acuoso | ISRIC 4 | | 1 - 14 | 9,1 |
| Nitrógeno total | ASPT-88 | % | 0,0030 | 1,9 |
| Fósforo total | Metodo calcinación/ASPT 91 | mg/kg | 0,40 | 6943 |
| Potasio total | microware Reaction System/EPA 258 | mg/kg | 8,0 | 29647 |

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, marzo 08 de 2016

c.c.: Arich
JCH/LCA





Informe de Ensayo: MO 03/16

Página 4 de 5

INFORME DE ENSAYO EN MATERIA ORGÁNICA MO 03/16

Cliente: UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
 Solicitante: Univ. Cleto Condori Apaza
 Dirección del cliente: Z/Villa Tunaru, C/Eufronio Viscarra # 1224
 Procedencia de la muestra: Kallutaca - Laja
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Centro Experimental Kallutaca - UPEA
 Responsable del muestreo: Univ. Cleto Condori Apaza
 Fecha de muestreo: 05 de abril de 2015
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 17 de febrero de 2016
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 17 de febrero al 03 de marzo, 2016
 Caracterización de la muestra: Materia orgánica
 Tipo de muestra: Compuesta
 Envase: Bolsa plástica
 Código LCA: 3 - 4
 Código original: T 4

Resultado de Análisis

| Parámetro | Método | Unidad | Límite de determinación | 3 - 4 T 4 |
|-----------------|------------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| pH acuoso | ISRIC 4 | | 1 -14 | 8,7 |
| Nitrógeno total | ASPT-88 | % | 0,0030 | 1,8 |
| Fósforo total | Metodo calcinación/ASPT 91 | mg/kg | 0,40 | 6179 |
| Potasio total | Microware Reaction System/EPA 258. | mg/kg | 8,0 | 19434 |

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, - marzo 08 de 2016

c.c.: Arch.
 JCH/LCA





Informe de Ensayo: MO 03/16

Página 5 de 5

INFORME DE ENSAYO EN MATERIA ORGÁNICA MO 03/16

Cliente: UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
 Solicitante: Univ. Cleto Condori Apaza
 Dirección del cliente: Z/Villa Tunaru, C/Eufronio Viscarra # 1224
 Procedencia de la muestra: Kallutaca - Laja
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Centro Experimental Kallutaca - UPEA
 Responsable del muestreo: Univ. Cleto Condori Apaza
 Fecha de muestreo: 05 de abril de 2015
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 17 de febrero de 2016
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 17 de febrero al 03 de marzo, 2016
 Caracterización de la muestra: Materia orgánica
 Tipo de muestra: Compuesta
 Envase: Bolsa plástica
 Código LCA: 3 - 5
 Código original : T 5

Resultado de Análisis

| Parámetro | Método | Unidad | Límite de determinación | 3 - 5 T 5 |
|-----------------|-----------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| pH acuoso | ISRIC 4 | | 1 -14 | 7,8 |
| Nitrógeno total | ASPT-88 | % | 0,0030 | 1,7 |
| Fósforo total | Metodo calcinación/ASPT 91 | mg/kg | 0,40 | 5767 |
| Potasio total | Microwave Reaction System/EPA 258 | mg/kg | 8,0 | 11900 |

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, marzo 08 de 2016




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



c.c.: Arch.
 JCH/LCA