

CAPÍTULO I

1. Antecedentes

Desde que la agricultura se inventó, hace cerca de 5.000 años, los campesinos aseguraron la fertilidad de sus campos mediante materiales orgánicos descompuestos de los residuos animales y vegetales de sus granjas. Esta técnica estaba basada en lo que ocurría en la Naturaleza sin la ayuda del ser humano, donde la materia orgánica de plantas y animales, se mezcla en el suelo, descomponiéndose y aportando sus nutrientes a la tierra de la que se alimentan de nuevo las plantas. (Lopez, 2018)

El desarrollo de la técnica de compostaje a gran escala tiene su origen en la India con las experiencias llevadas a cabo por el inglés Albert Howard desde 1905 a 1947. Su éxito consistió en combinar sus conocimientos científicos con los tradicionales de los campesinos. Su método, llamado método Indore, se basaba en fermentar una mezcla de desechos vegetales y excrementos animales, y humedecerla periódicamente. (Microbiologia.met, 2017)

El compostaje es la descomposición biológica aerobia de los constituyentes orgánicos de los residuos sólidos, desarrollado bajo condiciones controladas en el cual intervienen varios microorganismos que requieren de humedad adecuada y substratos orgánicos heterogéneos este proceso requiere un tiempo de 5 a 9 meses para su elaboración, mediante este proceso se obtiene un producto orgánico, higienizado y estabilizado denominado compost que resulta beneficioso para el suelo mejorando su estructura y el crecimiento de las plantas.

La palabra compost viene del latín componere, juntar; por lo tanto, es la unión de un conjunto de restos orgánicos que sufre un proceso de fermentación y da un producto de color marrón oscuro, es decir, que en él el proceso de fermentación está esencialmente finalizado. El

abono resultante contiene materia orgánica, así como nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro, necesarios para la vida de las plantas. (Ciencias de la tierra y el medio Ambiente, 2018)

Una de las estrategias para la producción ecológica es el uso de abonos orgánicos líquidos mediante abonamiento del suelo y la planta. Para permitir el mejoramiento de la fertilidad del suelo y de sus propiedades física, química y biológicas. (Intagri, 2021)

El uso de este tipo de abonos líquidos permite al cultivo incrementar la disponibilidad de nutrientes; alimentar, recuperar, reactivar la vida del suelo. Su funcionamiento en el sistema suelo-planta es fortalecer el equilibrio nutricional, que brinda una resistencia a factores externos como las plagas, enfermedades, y el ambiente a través de los ácidos orgánicos, las hormonas de crecimiento, antibióticos, vitaminas, minerales, enzimas, carbohidratos, aminoácidos, azúcares complejos entre otros. (Villacis, 2021)

Esta situación puede ser revertida por el avance tecnológico, por ejemplo, incorporando aditivos al proceso de compostaje con el fin de acelerarlo.

Uno de los aditivos incorporados al proceso de compostaje son los activadores que son un suministro de azúcares, nitrógeno, cepas seleccionadas de bacterias u otros microorganismos, enzimas, plantas medicinales y preparados biodinámicos. Todos estos aditivos incrementan la población de microorganismos en los primeros días y aceleran dicho proceso permitiendo disminuir el tiempo de compostaje. (Arce, 2018)

Contexto Internacional de Residuos Sólidos.

A nivel mundial, se generaron aproximadamente 2.01 mil millones de toneladas de residuos sólidos municipales (RSM). De esta cantidad, aproximadamente el 44%, es decir, 884 millones de toneladas, son residuos orgánicos. Los plásticos representan alrededor del 12%, lo

que equivale a 241.2 millones de toneladas. Los residuos de papeles y cartones constituyen aproximadamente el 17%, unos 341.7 millones de toneladas, mientras que los residuos de vidrio y metales juntos representan alrededor del 12%, lo que equivale a 241.2 millones de toneladas. El resto, que incluye textiles, residuos electrónicos y otros materiales inorgánicos, conforma el 15%, alrededor de 301.5 millones de toneladas. (BIRF-AIF, 2022)

Algunos países destacan por su alto aprovechamiento de residuos. En Europa, Alemania lidera con una tasa de reciclaje superior al 60%, seguida de los Países Bajos con cerca del 54%, y Suecia, conocida por su sistema de incineración de residuos para generación de energía, recicla más del 50% de sus residuos. En Asia, Japón tiene una tasa de reciclaje y reutilización de residuos municipales del 20%, con sistemas avanzados de separación y reciclaje. (BIRF-AIF, 2022)

Contexto en Latino América de los Residuos Sólidos.

En América Latina y el Caribe, se estima que se generan anualmente alrededor de 231 millones de toneladas de residuos sólidos municipales. De esta cantidad, aproximadamente la mitad son residuos orgánicos, totalizando unos 115.5 millones de toneladas al año. Los plásticos representan aproximadamente el 12%, equivalente a unos 27.72 millones de toneladas, mientras que los papeles y cartones constituyen cerca del 15%, alrededor de 34.65 millones de toneladas anuales. El vidrio y los metales juntos conforman aproximadamente el 7%, sumando unos 16.17 millones de toneladas, y el resto, que incluye textiles, residuos electrónicos y otros materiales inorgánicos, constituye aproximadamente el 16%, equivalente a unos 36.96 millones de toneladas anuales. La gestión adecuada de estos residuos sigue siendo un desafío en la región, con una infraestructura variada y tasas de reciclaje y compostaje que varían significativamente entre los países. Sin embargo, están emergiendo iniciativas para mejorar la recolección selectiva

y el tratamiento de los residuos, impulsadas por esfuerzos locales y la implementación de políticas más rigurosas en algunos lugares. (Naranjo, 2023)

La gestión de residuos orgánicos es un aspecto crucial debido a la significativa cantidad que representa dentro de los residuos sólidos municipales. En países como Brasil, aproximadamente el 55% de los residuos sólidos generados son orgánicos, lo que equivale a unos 127 millones de toneladas anuales. En este país se ha visto un aumento en iniciativas de compostaje impulsadas por cooperativas de recicladores y proyectos de agricultura urbana que utilizan residuos orgánicos para mejorar la fertilidad del suelo. En México, los residuos orgánicos constituyen alrededor del 50% del total de residuos sólidos municipales, generando aproximadamente 53 millones de toneladas anuales. Ciudades como Ciudad de México y Monterrey están implementando programas de compostaje comunitario y educación ambiental para reducir la cantidad de residuos orgánicos enviados a vertederos y promover prácticas más sostenibles de gestión de residuos. Estas iniciativas reflejan un movimiento hacia una economía circular más robusta y la adopción de prácticas que maximicen el aprovechamiento de recursos naturales dentro de la región. (Beck, 2022)

Contexto Nacional de los Residuos Sólidos.

El sector de gestión de residuos sólidos en Bolivia, a consecuencia de la falta de planificación e inversión que ha sufrido en los últimos años, se encuentra en un momento de transformación.

La composición de los residuos en la basura del ciudadano boliviano tiene un 55 % de fracción orgánica, un 22 % inorgánica y el resto son otros desechos. El sector de gestión de residuos presenta varios desafíos:

- La precariedad de la tecnología y la falta de innovación es constatable.

- No se produce la separación de residuos ni en origen ni en destino. Es necesario un mayor fortalecimiento técnico y administrativo, así como educación y concienciación ciudadana.
- A este necesario proceso de avance le debe acompañar un modelo y marco legal apropiado que facilite la evolución del sector.
- Existe una gran recolección informal de residuos, los cuales no pueden ser registrados ni controlados. La recolección es básica, no llega a todas las áreas de las principales metrópolis por igual y precisa de un mejor desarrollo.

Bolivia genera anualmente 1,7 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 55,2 % son orgánicos, el 22,1 % son desechos reciclables (papel, plástico, vidrios, metales) y el restante 22,7 % es basura no reciclable. Además de la necesaria gestión eficiente de residuos sólidos, en Bolivia se podría aprovechar un 80 % de ellos para producir compost o energía. Actualmente, solo se recicla el 4 % de las 7 mil toneladas de basura diarias que produce Bolivia. Del total nacional diario, el 87 % se genera en las áreas urbanas y el resto 13 % en el área rural, la tasa de aprovechamiento de residuos, incluidos los orgánicos, varía considerablemente entre los departamentos del país. Por ejemplo, departamentos como La Paz, Cochabamba y Santa Cruz han implementado programas piloto de compostaje comunitario y utilización de residuos orgánicos en la agricultura urbana. Sin embargo, estos esfuerzos enfrentan desafíos como la falta de infraestructura adecuada y recursos financieros limitados, especialmente en regiones menos desarrolladas. (ICEX, 2022)

1.2.Objetivos

1.2.1. *Objetivo general.*

- Reducir el tiempo del proceso de compostaje de los residuos orgánicos en el Municipio de Villazón utilizando microorganismos de montaña.

1.2.2. *Objetivos específicos.*

- Realizar la reproducción y activación de los microorganismos de montaña.
- Realizar los análisis químicos y biológicos de los microorganismos de montaña como acelerador biológico.
- Ejecutar la parte experimental, incorporando microorganismos de montaña a los residuos orgánicos a usarse en el proceso de investigación.
- Evaluar comparativamente tiempo y rendimiento del compost obtenido usando los microorganismos de montaña frente a la muestra testigo (sin microorganismos de montaña).

1.3.Justificación

1.3.1. *Justificación tecnológica.*

El presente trabajo pretende contribuir, a través de un trabajo de investigación experimental, con el procedimiento para la elaboración de compost a partir de la incorporación de microorganismos de montaña, para mejorar el tiempo del proceso de obtención del compost orgánico.

Las actividades programadas en el proyecto abarcan no sólo la investigación de dicho compost, sino también su transformación hasta un producto final, pasando por medio de diferentes procesos hasta la obtención del compost donde se obtendrá un producto altamente nutritivo y de fácil uso para el suelo.

1.3.2. Justificación económica.

El desarrollo comercial en la Ciudad de Villazón acompañado de un proceso de urbanización acelerada, el aumento en la concentración de la población, el incremento en la demanda de materias primas, productos y energía, originan el incremento de la generación de residuos sólidos, el que a su vez provoca el incremento en los costos operativos del servicio de limpieza (barrido, recolección, transporte y disposición final) y afecta por ende su sostenibilidad.

La Gestión Integral de Residuos Sólidos GIRS busca el aprovechamiento de estos residuos mediante el método de compostaje, para el tema de los residuos orgánicos los mismos que pueden ayudar a disminuir la cantidad de los gases invernadero y los líquidos lixiviados los cuales son nocivos para el medio ambiente.

1.3.3. Justificación ambiental.

Los procesos que se aplican en el proyecto son inofensivos al medio ambiente, debido a que sus prácticas no conllevan el uso de productos químicos que pongan en riesgo el medio ambiente, además que los residuos obtenidos de estos procesos son ciento por ciento biodegradables.

La mezcla adecuada de materia orgánica para la elaboración de compost, permite obtener un abono de elevada calidad, debido a que los macronutrientes, micronutrientes y minerales aportados al suelo disminuyen el uso de fertilizantes químicos, mejorando así la estructura físico química del suelo y consecuentemente evita la contaminación del ambiente.

1.3.4. Justificación social.

La elaboración del compost a partir de la incorporación de microorganismos de montaña ayudara al mejoramiento del proceso de compostaje en el relleno sanitario del Municipio de

Villazón, realizando un mejoramiento en calidad, tiempo del compostaje y ayuda reducir los líquidos lixiviados de los residuos solios,

Se tiene como enfoque la producción experimental del compost a partir de desechos orgánicos los mismos se llevarán a cabo para su posterior distribución en el Municipio de Villazón lo que permitirá promover el consumo municipal de este producto de forma que, se logrará disminuir el consumo de fertilizantes químicos y poder concientizar a la población sobre lo que es la conciencia ambiental.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Características Generales de los Residuos Orgánicos

2.1.1. *Residuos Orgánicos*

Los residuos orgánicos son desechos biodegradables de origen vegetal o animal que pueden descomponerse en la naturaleza y transformarse en otro tipo de materia orgánica. Estos son considerados basura, pueden ser reutilizados a través del compostaje, un proceso que los transforma en abono para enriquecer el suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. (Beck, 2022)

Los residuos orgánicos son causantes de diversos impactos ambientales asociados a una inadecuada disposición final, tales como la generación de lixiviados, olores, gases de efecto invernadero (principalmente metano), y la proliferación de vectores. Además, el manejo actual que se da a los residuos orgánicos en el país implica un desaprovechamiento de importantes oportunidades de generación de valor, puesto que se podrían utilizar para generar energía y nutrientes para los suelos. Alternativas como el compostaje, vermicompostaje, la biodigestión, entre otras (Economía Circular Medio Ambiental, 2017)

2.1.1.1. Origen de los Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos provienen de diversas fuentes, y cada una contribuye de manera significativa a la generación total de residuos. La identificación del origen es crucial para diseñar estrategias de gestión y tratamiento adecuadas. (Centellas, 2022)

A continuación, se detallan las principales fuentes de origen:

1. **Residuos Domésticos:** Los residuos domésticos son aquellos generados en los hogares a partir de las actividades cotidianas, principalmente relacionadas con la preparación y el

consumo de alimentos, así como el mantenimiento de jardines y áreas verdes. Estos residuos comprenden una amplia variedad de materiales orgánicos que se producen diariamente en cualquier hogar. La mayoría de estos residuos son altamente biodegradables, lo que significa que se descomponen rápidamente bajo condiciones adecuadas, convirtiéndose en recursos valiosos si se manejan correctamente. Entre los ejemplos más comunes de residuos domésticos se encuentran los restos de alimentos tanto cocidos como crudos. Esto incluye cáscaras de frutas y verduras, huesos, restos de carne, y sobras de comida. Además, los residuos de jardinería como hojas, césped, ramas pequeñas y flores marchitas también forman una parte significativa de los residuos orgánicos domésticos. Otros ejemplos incluyen productos de papel y cartón sucios, como servilletas usadas y papel de cocina, que también pueden ser compostados. (Ecología Verde, 2020)

- 2. Residuos Comerciales:** Los residuos comerciales son aquellos generados en establecimientos como restaurantes, supermercados, mercados, cafeterías y tiendas de alimentos. Estos lugares producen una cantidad considerable de residuos orgánicos debido a sus actividades diarias, como la preparación y venta de alimentos. Entre los residuos comerciales más comunes se encuentran los desperdicios de alimentos. Estos incluyen restos de preparación y consumo de comidas, productos vencidos y alimentos en mal estado. Por ejemplo, en restaurantes y cafeterías, se generan grandes cantidades de cáscaras, peladuras, cortezas, restos de vegetales y frutas durante la preparación de alimentos. Los supermercados y mercados, por su parte, producen residuos orgánicos cuando los productos perecederos, como frutas y verduras, se echan a perder o no se venden antes de su fecha de caducidad. (Ecología Verde, 2020)

3. **Residuos Agrícolas:** Los residuos agrícolas se generan en actividades agrícolas y ganaderas, incluyendo la producción y procesamiento de cultivos y el manejo de ganado. Estos residuos comprenden restos de plantas, paja, tallos, hojas, estiércol y residuos animales. Por ejemplo, en los campos agrícolas se generan residuos de cosecha como restos de plantas y paja, mientras que en la ganadería se produce estiércol de vacas, cerdos y aves de corral. (LEANpio, 2022)
4. **Residuos Industriales:** Los residuos industriales se generan en procesos de producción y manufactura, especialmente en la industria alimentaria y otras que procesan materiales orgánicos. Estos residuos comprenden una variedad de subproductos que, si se gestionan adecuadamente, pueden ser reutilizados o convertidos en recursos valiosos. En la industria alimentaria, los residuos incluyen subproductos del procesamiento de alimentos, como cáscaras de nueces, pulpa de frutas y residuos de vegetales procesados. Por ejemplo, en la producción de jugos y conservas, se generan grandes cantidades de pulpa y cáscaras que pueden ser reutilizadas como ingredientes en productos alimenticios, compostadas para enriquecer el suelo, o utilizadas en la producción de biogás. (tierra, 2015)

2.1.1.2. Composición de los Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos se destacan por su composición nutritiva y compleja, lo cual es fundamental para entender cómo gestionarlos adecuadamente para sus usos y aplicaciones.

1. **Contenido de Humedad:** Los residuos orgánicos presentan un alto contenido de humedad, generalmente superior al 70%. Esta característica facilita su descomposición natural, ya que proporciona el ambiente húmedo necesario para la actividad de los microorganismos responsables del proceso de descomposición. La

- alta humedad también contribuye a la formación de lixiviados, líquidos ricos en nutrientes que se generan durante la descomposición y que pueden ser aprovechados en sistemas de fertilización. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)
2. **Materia Orgánica:** Estos residuos contienen una diversidad de componentes orgánicos esenciales como carbohidratos, proteínas, grasas y fibras. Estos constituyentes son descompuestos por microorganismos en procesos biológicos como la fermentación y el compostaje. La descomposición de la materia orgánica genera calor y gases, contribuyendo a la actividad biológica en el suelo y en los procesos de tratamiento de residuos. (tierra, 2015)
 3. **Nutrientes:** Los residuos orgánicos utilizados para compostaje en rellenos sanitarios contienen una variedad de nutrientes que pueden beneficiar significativamente el proceso de descomposición y la calidad del suelo. Estos residuos incluyen restos de cocina como cáscaras de frutas y vegetales, restos de café, y residuos de jardín como césped cortado y hojas secas. Estos materiales aportan nitrógeno, carbono, potasio, fósforo y otros micronutrientes esenciales. El nitrógeno, presente en cantidades variables según el tipo de residuo, es crucial para la síntesis de proteínas y el crecimiento vegetal. El carbono, principalmente en forma de celulosa y lignina, actúa como fuente de energía para los microorganismos descomponedores. El potasio y el fósforo, presentes en proporciones adecuadas, son fundamentales para la salud de las plantas, fortaleciendo sus raíces y mejorando la resistencia al estrés. Estos nutrientes no solo enriquecen el suelo, sino que también reducen la cantidad de residuos que terminan en los vertederos, promoviendo prácticas sostenibles de gestión de residuos. (FAO y EPA)

Tabla 2-1 Nutrientes de los Residuos Orgánicos

Residuo	Nitrógeno (%)	Potasio (%)	Fósforo (%)	Relación C/N	Función
Residuos de Cocina					
Restos de frutas y vegetales	0.5-1.5	Variable	Variable	12:1 a 25:1	Fuente de materia orgánica
Cáscaras de frutas	0.5-1.5	Variable	Variable	12:1 a 25:1	Aporta nutrientes y carbono al compost
Restos de café y filtros de café usados	2	Variable	Variable	20:01	Aporta nitrógeno y mejora la estructura del suelo
Bolsas de té y hojas de té usadas	4.15	Variable	Variable	20:01	Enriquece el compost con nitrógeno y otros nutrientes
Restos de alimentos cocidos	01-feb	Variable	Variable	15:1 a 20:1	Aporta materia orgánica y nitrógeno
Residuos de Jardín					
Césped cortado	02-mar	Variable	Variable	12:1 a 25:1	Alto contenido de nitrógeno, favorece la descomposición
Residuos de poda de plantas y flores frescas	0.5-2	Variable	Variable	15:1 a 30:1	Aporta nitrógeno y mejora la aireación del compost
Malezas verdes (antes de semillas)	01-feb	Variable	Variable	12:1 a 20:1	Aporta nitrógeno y materia orgánica al compost

Fuente: Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU., Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), manuales especializados en compostaje.

2.1.1.3. Propiedades Físicas de los Residuos Orgánicos

Las propiedades físicas de los residuos orgánicos abarcan una amplia gama de características que influyen significativamente en su manejo y aprovechamiento. Estas propiedades incluyen, entre otras, la densidad, la humedad, el tamaño de partícula, la porosidad y la textura. Comprender y caracterizar estas propiedades es esencial para diseñar sistemas eficaces de gestión de residuos, así como para optimizar procesos de aprovechamiento como el compostaje, la digestión anaeróbica y la producción de biogás. (WordPress, 2019)

2.1.1.4. Propiedades Químicas de los Residuos Orgánicos

Las propiedades químicas de los residuos orgánicos juegan un papel crucial en su manejo y aprovechamiento, ya que determinan su potencial para la producción de energía, la fertilización del suelo y otros procesos de valorización. Entre estas propiedades se encuentran la composición elemental, el contenido de nutrientes, la presencia de compuestos tóxicos, la acidez o alcalinidad (pH), relación carbono nitrógeno, entre otras. La composición elemental de los residuos orgánicos, que incluye los porcentajes de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), es fundamental para evaluar su potencial energético y su valor como fertilizante. Un alto contenido de carbono, por ejemplo, es indicativo de un buen material para la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica, mientras que el nitrógeno y el fósforo son esenciales para el uso de los residuos como abono orgánico. (REPSOL, 2020)

Tabla 2-2 Relación C/N de Residuos Organicos

Residuo Orgánico	Relación (C/N)
Hojas secas	50:01:00
Paja	80:01:00
Aserrín	400:01:00
Recortes de césped	15:01
Restos de frutas y vegetales	20:01
Café molido	20:01
Restos de alimentos cocidos	15:01
Cáscaras de huevo	12:01
Cáscaras de frutos secos	35:01:00

Fuente: Centro de Estudios Ambientales y Recursos Naturales. (s.f.). Guía técnica de compostaje: Relaciones carbono-nitrógeno en residuos orgánicos

2.1.1.5. Impacto Ambiental de los Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos tienen un impacto ambiental notable que puede ser tanto positivo como negativo, según su gestión y aplicación.

1. **Emisión de Gases de Efecto Invernadero:** Si no se manejan adecuadamente, los residuos orgánicos pueden ser una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La descomposición anaeróbica de los residuos en vertederos o condiciones de almacenamiento no controladas puede generar metano, un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el CO_2 . Sin embargo, cuando se gestionan de manera adecuada, como a través del compostaje aeróbico o la digestión anaeróbica controlada, se puede reducir drásticamente la producción de metano y capturar el biogás generado para su uso como fuente de energía renovable. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)
2. **Lixiviados y Calidad del Agua:** Durante la descomposición de los residuos orgánicos, se producen lixiviados, que son líquidos ricos en nutrientes y compuestos orgánicos que pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales. Los lixiviados contienen una variedad de contaminantes potenciales, incluyendo metales pesados, microorganismos patógenos y productos químicos derivados de la descomposición orgánica. La gestión inadecuada de los lixiviados puede resultar en la contaminación del agua y la degradación de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, mediante sistemas de recolección y tratamiento adecuados, los lixiviados pueden ser capturados y tratados para minimizar su impacto ambiental negativo. (ResearchGate, 2020)
3. **Uso de Recursos y Sostenibilidad:** La gestión adecuada de los residuos orgánicos puede contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental al reducir la dependencia de vertederos, conservar recursos naturales y cerrar el ciclo de nutrientes

en los sistemas agrícolas. El compostaje de residuos orgánicos no solo reduce la cantidad de residuos enviados a vertederos, sino que también produce compost rico en nutrientes que mejora la calidad del suelo y reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos. Además, la captura y utilización de biogás generado durante la digestión anaeróbica ayuda a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y proporciona una fuente de energía renovable. (MMAyA, 2018)

4. **Beneficios Ambientales de los Residuos Orgánicos:** El aprovechamiento de los residuos orgánicos se refiere al proceso de convertir estos desechos biodegradables en recursos útiles mediante métodos como el compostaje o la digestión anaeróbica, reduce la cantidad de residuos que terminan en vertederos, disminuyendo la contaminación del suelo, el agua y el aire asociada con la descomposición de residuos orgánicos. Además, el compostaje produce un material orgánico rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de plantas saludables, posee también los siguientes beneficios. (MMAyA, 2018)

- Menor cantidad de lixiviados generados y menor riesgo de contaminación de las aguas.
- Menor cantidad de gases efecto invernadero disminuyendo su impacto en relación al cambio climático.
- Se produce compost que puede servir como mejorador de suelos y abono orgánico y no produce sobrecarga química al suelo.
- Reemplazo de fertilizantes químicos por un abono orgánico

2.1.2. Tratamiento de Residuos Orgánicos

El tratamiento de los residuos sólidos es un proceso fundamental para gestionar adecuadamente los desechos y minimizar su impacto ambiental. Involucra una variedad de métodos y tecnologías diseñados para alterar las propiedades físicas, químicas o biológicas de los residuos con el fin de reducir su volumen, eliminar sustancias peligrosas y recuperar recursos útiles. A continuación, se detallan algunos de los principales métodos de tratamiento de residuos sólidos:

1. **Compostaje:** Es un proceso biológico en el cual los residuos orgánicos se descomponen mediante microorganismos en condiciones controladas de temperatura, humedad y oxigenación. El resultado es compost, un material rico en nutrientes que se puede utilizar como fertilizante en agricultura y jardinería. (MMAyA, 2018)

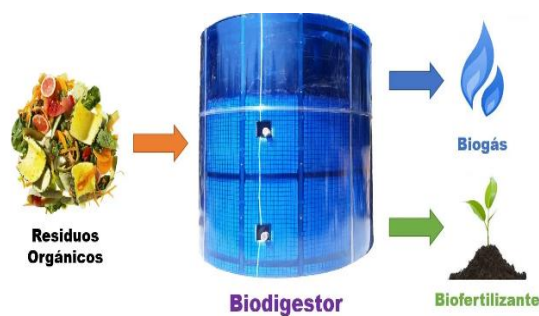
Figura 2-1 Compostaje de Residuos Organicos



Fuente: Composta en red. 2019

2. **Digestión Anaeróbica:** En este proceso, los residuos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y un residuo sólido digestato. El biogás se puede utilizar como fuente de energía renovable, mientras que el digestato puede ser usado como enmienda del suelo. (MMAyA, 2018)

Figura 2-2 Digestión Anaeróbica



Fuente: HEURA. 2020

3. **Lombricultura:** La lombricultura es una técnica de tratamiento de residuos orgánicos que utiliza lombrices para descomponer materiales biodegradables como restos de alimentos, estiércol, papel y residuos de jardín. Este proceso biológico, también conocido como vermicompostaje, implica la alimentación de lombrices con estos desechos, quienes los digieren y convierten en un fertilizante orgánico llamado vermicompost o humus de lombriz. La lombricultura es una forma eficiente y ambientalmente amigable de manejar residuos orgánicos, produciendo un compost de alta calidad que mejora la estructura del suelo y proporciona nutrientes esenciales para las plantas. (MMAyA, 2018)

Figura 2-3 Lombrices Rojas Californianas



Fuente: Zaid Alvares, técnicas de lombricultura. 2023

2.2.Compostaje

El compostaje es la mezcla de la materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporciona nutrientes. Por otro lado, definen al compostaje como “una biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica” (Mansilla, 2015)

Este proceso ocurre en presencia de humedad y genera elevadas temperaturas que permiten higienizar la mezcla, produciendo dióxido de carbono, agua y materia orgánica estabilizada. En ese sentido el compostaje es una serie de procesos biológicos, físicos y químicos, realizados por microorganismos que descomponen la materia orgánica estabilizándola. (BBAV, 2023)

El compost es un abono orgánico, obtenido a partir de la descomposición controlada de la materia orgánica. Es un producto estable, de olor agradable y con multitud de propiedades beneficiosas para los suelos y plantas que se consigue tras la biodegradación en presencia de oxígeno de los residuos orgánicos, tales como restos de jardín y residuos de cocina. (tierra, 2015).

2.2.1. *Proceso de compostaje.*

Este proceso se realiza bajo condiciones particulares de aireación y humedad controladas y dependen de la materia prima con la que se las elabora. Es necesario realizar tratamientos previos de dicho material para facilitar el proceso; los componentes de la materia de partida inciden en los cambios químicos y en las especies comprendidas en el proceso. (Agencia de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

Figura 2-4 Proceso de Compostaje

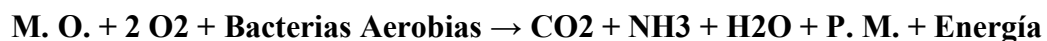


Fuente: (Georgina, 2017)

El compostaje es un proceso biológico controlado en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica, como restos de comida, hojas y otros, en un material rico en nutrientes conocido como compost.

Los procesos biológicos que se desarrollan en el compostaje en la mayoría son de tipo aeróbico y se pueden representar por la siguiente ecuación:

1. **Sistema Aerobio:** En este ambiente aeróbico, los microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos descomponen la materia orgánica, liberando calor como subproducto del proceso de descomposición. Este calor es importante para mantener la temperatura de la pila de compost dentro de un rango óptimo para la descomposición eficiente de los materiales. A continuación, se muestra la siguiente ecuación. (kahn, 2005)



Donde:

- (M.O.) Materia Orgánica: Representa la materia orgánica que está siendo descompuesta por las bacterias aerobias.

- O₂: Oxígeno molecular necesario para la respiración aerobia de las bacterias.
 - Bacterias Aerobias: Microorganismos que llevan a cabo la descomposición en presencia de oxígeno.
 - CO₂: Dióxido de carbono, un producto de desecho liberado durante la respiración aerobia.
 - NH₃: Amoníaco, un producto de desecho resultante de la degradación de compuestos nitrogenados.
 - H₂O: Agua, otro producto de desecho liberado durante la respiración aerobia. El agua se produce como resultado de la oxidación de los compuestos orgánicos y es esencial para el metabolismo celular.
 - (P.M.) Productos Metabólicos: Otros productos químicos y compuestos liberados durante el proceso de descomposición.
 - Energía: La energía liberada durante la descomposición de la materia orgánica, utilizada por las bacterias para su metabolismo y crecimiento.
- 2. Sistema Anaerobio:** Es similar a lo que ocurre en muchos vertederos en los que se depositan los restos orgánicos en ausencia de oxígeno. En este tipo de fermentación se producen gases como el metano, el amoníaco y el CO₂ y un residuo llamado digestato. Todo el proceso es articulado por la acción de microorganismos que trabajan sin necesidad de oxígeno. (CSR-Laboratorio, 2017)

Si el proceso se realiza en condiciones controladas y con la tecnología adecuada se puede producir metano que puede ser utilizado como combustible en calderas que calientan agua para producir vapor de agua que se turbinan para generar energía. El digestato se puede usar como compost. El inconveniente de este proceso

es que se necesita una tecnología costosa y es muy complicado llevar a cabo a pequeña escala. Además, se producen compuestos por reducción, como los mercaptanos que provocan malos olores. En esta ecuación se describe la descomposición anaerobia de la materia orgánica por bacterias anaerobias, resultando en la producción de productos como dióxido de carbono, amoníaco, agua, energía, sulfuro de hidrógeno y metano. (kahn, 2005)



Donde:

- M.O. (Materia Orgánica): Este es el sustrato inicial de la descomposición, que puede incluir una variedad de compuestos orgánicos.
- O₂ (Oxígeno): Su presencia aquí puede indicar una descomposición anaerobia incompleta o una contaminación de oxígeno.
- Bacterias Anaerobias: Estas son bacterias que llevan a cabo la descomposición en ausencia de oxígeno. Utilizan la materia orgánica como fuente de carbono y energía, descomponiéndola en compuestos más simples.
- CO₂ (Dióxido de Carbono): Un producto de desecho liberado durante la respiración anaerobia de las bacterias.
- NH₃ (Amoníaco): El amoníaco es una forma de nitrógeno que puede ser utilizada por otros organismos en el suelo.
- H₂O (Agua): Otro producto de desecho liberado durante la respiración anaerobia de las bacterias.
- Energía: La energía liberada durante la descomposición de la materia orgánica, utilizada por las bacterias para su metabolismo y crecimiento.

- H_2S (Sulfuro de Hidrógeno): Un producto que indica la presencia de procesos de descomposición anaerobia en ambientes ricos en azufre. El sulfuro de hidrógeno puede ser producido por bacterias sulfato-reductoras que utilizan el azufre como aceptor final de electrones.
- CH_4 (Metano): Otro producto que indica la presencia de procesos de descomposición anaerobia. El metano es un gas de efecto invernadero potente y puede ser producido por bacterias metanogénicas como resultado de la descomposición anaerobia de la materia orgánica.

2.2.2. Etapas del Compostaje

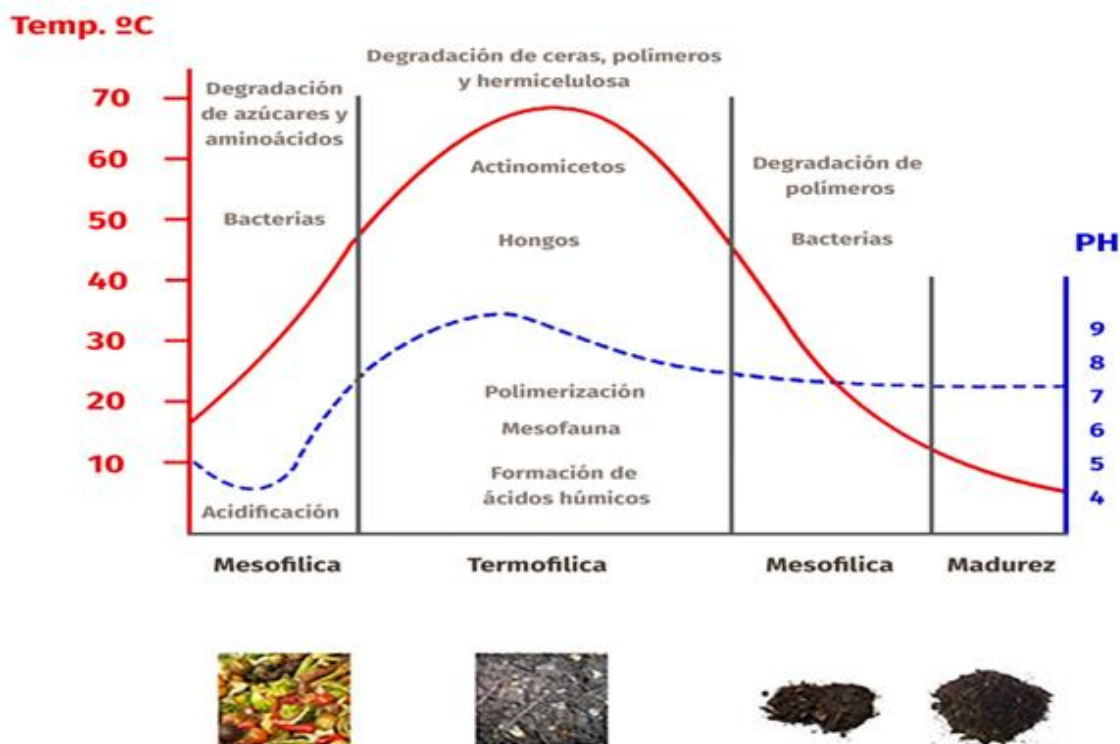
El compostaje es un proceso biológico natural en el cual microorganismos, como bacterias, hongos y actinomicetos, descomponen materiales orgánicos en un ambiente controlado y aeróbico. (Parion, 2019)

Las cuales se detallan a continuación:

1. **Mesófila:** En esta etapa, los microorganismos mesófilos comienzan a descomponer la materia orgánica recién agregada a la pila de compost. La temperatura aumenta gradualmente y la actividad microbiana comienza a acelerarse.
2. **Termofílica:** A medida que la temperatura de la pila de compost aumenta, los microorganismos termofílicos se vuelven predominantes. En esta etapa, la descomposición de la materia orgánica ocurre a una velocidad mucho más rápida, generando altas temperaturas en el núcleo de la pila. Estas altas temperaturas ayudan a eliminar patógenos y semillas de malezas, y aceleran la descomposición de la materia orgánica.

3. **Enfriamiento (Mesófila):** Una vez que la mayoría de la materia orgánica ha sido descompuesta y la actividad microbiana disminuye, la temperatura de la pila de compost comienza a disminuir. Los microorganismos mesófilos vuelven a ser dominantes y continúan descomponiendo la materia orgánica a un ritmo más lento.
4. **Maduración:** En esta etapa final, la temperatura de la pila de compost vuelve a la temperatura ambiente y la descomposición activa de la materia orgánica ha finalizado. Los microorganismos continúan descomponiendo lentamente los restos de materia orgánica, produciendo un compost estable y maduro.

Figura 2-5 Etapas del Compostaje



Fuente: (CSR-Laboratorio, 2017)

2.2.3. Factores que Influyen en el Proceso de Compostaje

Los factores que influyen en el proceso de compostaje son elementos clave que determinan la eficiencia y el resultado del proceso de descomposición de materia orgánica. Estos factores incluyen

2.2.3.1. Relación C/N

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es una medida que indica la proporción de carbono respecto al nitrógeno presente en un material orgánico. Es un factor crucial en el proceso de compostaje, ya que afecta la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica. Una relación C/N adecuada proporciona un equilibrio óptimo de carbono y nitrógeno para el crecimiento y metabolismo de los microorganismos descomponedores.

Una relación C/N baja promueve una descomposición más rápida, mientras que una relación C/N alta puede ralentizar el proceso de compostaje. Un compostaje exitoso generalmente tiene una relación C/N de aproximadamente 15-35:1, lo que resulta en la producción de compost de alta calidad y rico en nutrientes. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)

Tabla 2-3 Parámetros de la Relación C/N

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

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)

2.2.3.2. Contenido de Nutrientes (Nitrógeno. Fósforo y Potasio)

El contenido de nutrientes en el proceso de compostaje se refiere a la concentración de elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), presentes en el compost final. Durante el proceso de compostaje, la descomposición microbiana de la materia orgánica transforma los nutrientes contenidos en los materiales de partida en formas más disponibles para las plantas. (MMAyA, 2018)

Nitrógeno (N): Durante la descomposición de la materia orgánica en la pila de compost, se libera nitrógeno en forma de amoníaco y otros compuestos nitrogenados. La relación carbono/nitrógeno (C/N) en la pila de compost influye en la disponibilidad de nitrógeno, ya que una relación adecuada promueve una descomposición eficiente y la liberación de nitrógeno disponible para las plantas en el compost final.

Fósforo (P): El fósforo presente en la materia orgánica se mineraliza durante el compostaje, convirtiéndose en formas más disponibles para las plantas. La descomposición de compuestos orgánicos ricos en fósforo, como los ácidos nucleicos y los fosfolípidos, libera fósforo que puede ser absorbido por las plantas para el desarrollo de sistemas radiculares saludables y la promoción de la floración y la fructificación. (tierra, 2015)

Potasio (K): Durante el compostaje, el potasio contenido en los residuos vegetales y otros materiales orgánicos se descompone y se vuelve disponible en formas más solubles en agua. El potasio liberado durante el compostaje contribuye a la mejora de la resistencia de las plantas al estrés y al mantenimiento del equilibrio hídrico en las células vegetales, lo que resulta en plantas más vigorosas y saludables.

En resumen, el proceso de compostaje no solo descompone la materia orgánica en compost final, sino que también transforma y concentra los nutrientes esenciales para las plantas,

como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, en formas más disponibles y beneficiosas para el crecimiento de las plantas.

Un compost bien elaborado puede servir como una valiosa fuente de nutrientes para mejorar la fertilidad del suelo y promover el crecimiento saludable de las plantas en sistemas agrícolas y de jardinería. (MMAyA, 2012)

Tabla 2-4 Contenido de N, P, K en el Compost

Nutriente	% en compost
Nitrógeno	0,3 -1,5
Fosforo	0,1-1,0
Potasio	0,3-1,0

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)

2.2.3.3. Temperatura

La temperatura tiene un amplio rango de variación en función de la fase del proceso. El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 70°C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), para llegar nuevamente durante la fase de maduración a una temperatura ambiente.

Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización.

(MMAyA, 2012)

Tabla 2-5 Parámetros de Temperatura

Temperatura	Causas	Descripción	Soluciones
Bajas temperaturas (T° ambiente < 35°C)	Humedad insuficiente.	Las bajas temperaturas pueden darse por varios factores, como la falta de humedad, por lo que los microorganismos disminuyen la actividad metabólica y por tanto, la temperatura baja.	Humedecer el material o añadir material fresco con mayor porcentaje de humedad
	Material Insuficiente.	Insuficiente material o forma de la pila inadecuada para que alcance una temperatura adecuada.	Añadir más material a la pila de compostaje.
	Déficit de nitrógeno o baja C: N.	El material tiene una alta relación C: N y por lo tanto, los microorganismos no tienen el N suficiente para generar enzimas y proteínas y disminuyen o ralentizan su actividad.	Añadir material con alto contenido en nitrógeno como estiércol.
Altas temperaturas (T ambiente >70°C)	Ventilación y humedad insuficiente	La temperatura es demasiado alta y se inhibe el proceso de descomposición. Se mantiene actividad microbiana pero no la suficiente para activar a los microorganismos mesofílicos y facilitar la terminación del proceso.	Volteo y verificación de la humedad (55-60%). Adición de material con alto contenido en carbono de lenta degradación (madera, o pasto seco) para que ralentice el proceso.

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)

2.2.3.4. Concentración de Iones Hidrogeno (pH)

El pH, o potencial de hidrógeno, es un parámetro esencial en el proceso de compostaje que indica el nivel de acidez o alcalinidad del medio de compostaje. Esta medida se basa en una escala que va de 0 a 14, donde un pH de 7 representa neutralidad, valores por debajo de 7 indican acidez y valores por encima de 7 indican alcalinidad.

El pH de la mezcla de compostaje puede experimentar una bajada al inicio del proceso debido a la formación de ácidos orgánicos durante el proceso de degradación de las fracciones de materia orgánica más lábiles. Con posterioridad, el pH aumentará debido a la degradación de compuestos de naturaleza ácida y a la mineralización de compuestos nitrogenados hasta la forma de amoníaco, actuando también el proceso de amonificación como un importante sumidero de

protones y, por tanto, favoreciendo al aumento del pH. Debido a esta conducta y a su variación durante el proceso de compostaje, el pH se ha tomado como parámetro indicativo de la buena evolución del proceso. (Compostando Ciencia, 2013)

Tabla 2-6 Parámetros de pH en el Compost

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

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)

2.2.3.5. Salinidad (Conductividad Eléctrica C.E.)

La conductividad eléctrica es un parámetro crucial en el proceso de compostaje que indica la concentración de sales disueltas en el medio de compostaje, está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso.

La conductividad eléctrica tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes. Ocurre a veces un descenso de la conductividad eléctrica durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma.

El rango ideal de conductividad eléctrica en el compostaje varía dependiendo de las condiciones específicas y el tipo de compostaje que se esté realizando. Sin embargo, generalmente se considera que un rango de conductividad eléctrica de 2.0 a 4.5 dS/m (decisiemens por metro) es adecuado para el proceso de compostaje. Este rango asegura condiciones óptimas para la actividad microbiana y la descomposición eficiente de los materiales orgánicos sin afectar negativamente la calidad del compost fina. (Marquez, 2008)

Tabla 2-7 Rango de Conductividad Eléctrica

Rango de Conductividad Eléctrica (dS/m)	Interpretación
Menos de 2.0	Baja conductividad; posible falta de nutrientes o actividad microbiana limitada.
2.0 - 4.5	Rango ideal para el compostaje; óptimo para desarrollo microbiano y descomposición eficiente.
Más de 4.5	Alta conductividad; puede indicar acumulación de sales o nutrientes en exceso, afectando la calidad del compost.

Fuente: Guía técnica de compostaje: Parámetros de calidad del compost.

2.2.3.6. Aireación

Al ser el compostaje un proceso mayormente aerobio se debe de mantener una aireación adecuada que permita la respiración de los microorganismos, por otro lado, la aireación evita que el material se compacte. Un exceso de aire ocasiona el descenso de la temperatura y la pérdida de humedad por evaporación, ocasionando que el proceso se detenga. Una baja aireación impide la suficiente evaporación, generando un exceso de humedad y que el proceso sea anaeróbico. Las necesidades de oxígeno varían en función a la etapa del proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo en la fase termófila. (Urbano verde, 2015)

2.2.3.7. Humedad

La humedad en el compostaje se refiere al contenido de agua presente en la pila de compost. Este parámetro es crucial porque afecta la actividad microbiana y la descomposición de

la materia orgánica. Una humedad adecuada es esencial para mantener condiciones óptimas dentro de la pila de compost y promover una descomposición eficiente.

Cuando la humedad es demasiado baja, los microorganismos descomponedores pueden volverse inactivos, lo que ralentiza el proceso de descomposición. Por otro lado, un exceso de humedad puede saturar la pila de compost, reduciendo el oxígeno disponible y favoreciendo condiciones anaeróbicas que pueden generar olores desagradables y producir compost de baja calidad. (tierra, 2015)

Por lo tanto, es importante monitorear y controlar regularmente el contenido de humedad en la pila de compost para asegurar que se mantenga dentro de un rango óptimo, generalmente entre el 40% y el 60%. Esto se puede lograr mediante el ajuste de la cantidad de agua agregada a la pila y la gestión adecuada de la aireación y el drenaje. Mantener una humedad adecuada es fundamental para garantizar una descomposición eficiente y la producción de compost de alta calidad. (Agencia de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

Tabla 2-8 Parámetro de Humedad en el Compost

Humedad	Causa	Descripción	Soluciones
<40%	Humedad insuficiente	Puede detener el proceso de compostaje por falta de agua para los microorganismos	Se debe regular la humedad, ya sea proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua (restos de fruta y verduras, césped, purines u otros)
40% - 60% Rango ideal			
>60%	Oxígeno insuficiente	Material muy húmedo, el oxígeno queda desplazado. Puede dar lugar a zonas de anaerobiosis.	Volteo de la mezcla y/o adición de material con bajo contenido de humedad y con alto valor en carbono, como serrines, paja u hojas secas.

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)Ciclo de

2.2.4. Monitoreo del proceso de compostaje

El monitoreo del proceso de compostaje se refiere a la supervisión sistemática y continua de las condiciones y parámetros clave durante todas las etapas del proceso de descomposición de la materia orgánica. Esto incluye la observación y medición de factores como la temperatura, la humedad, la aireación y el olor dentro de la pila de compost.

El objetivo principal del monitoreo es asegurar que las condiciones en la pila de compost sean óptimas para promover una descomposición eficiente y la producción de compost de alta calidad. Al monitorear regularmente estos parámetros, los compostadores pueden identificar y corregir problemas potenciales a tiempo, como la compactación excesiva, la falta de aireación o un contenido de humedad inadecuado. (MMAyA, 2018)

En resumen, el monitoreo del proceso de compostaje es una práctica esencial que permite mantener el control sobre las condiciones del compostaje y garantizar la producción de compost de alta calidad de manera eficiente y sostenible. Los parámetros óptimos del proceso de compostaje se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2-9 Parámetros del Compostaje

Parámetro	Rango ideal del compost ideal maduro
C.N	10:1-15:1
Humedad	30%-40%
Tamaño de partícula	<1,6 cm
pH	6,5-8,5
Temperatura	Temperatura ambiente
Densidad	<700 kg/m ³
Materia orgánica	> 20%
Nitrógeno total	Cercana a 1.00

Fuente: (Manual de compostaje del agricultor experiencias en America Latina y el Caribe, 2013)

2.2.5. Criterios y test para indicar el grado de madures del compost

Para que los efectos de la aplicación del compost sean positivos, este debe ser lo suficientemente maduro, es decir estable, puesto que de lo contrario la materia orgánica poco estabilizada seguirá el proceso de descomposición en el suelo pudiendo provocar problemas. Para evitar estos posibles efectos negativos se hace necesaria la evaluación de la madurez de un compost.

Aunque teóricamente un solo parámetro podría indicar el grado de madurez del compost, en la práctica esto resulta insuficiente debido a la falta de contexto histórico de la muestra y a la inaplicabilidad en análisis de rutina. A pesar de la ausencia de un método simple y reproducible, se han propuesto múltiples criterios para abordar esta cuestión y estos se pueden agrupar en los siguientes tipos, test de tipo físico y test químicos. (MMAyA, 2018)

1. Test de tipo físico.

Estos son comúnmente empleados y, en términos generales, ofrecen una indicación aproximada del grado de madurez de un compost. En este examen, se consideran los siguientes aspectos. (Agencia de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

- Olor: Un compost maduro debe carecer de olores desagradables y exhibir un aroma similar al de la tierra húmeda.
- Color: A lo largo del proceso de compostaje, los materiales experimentan un proceso de oscurecimiento o melanización hasta alcanzar un producto de tonalidad oscura
- Toca el compost para evaluar su textura. Un compost maduro tiende a tener una textura suelta y friable, con una estructura similar a la del suelo.

2. Test de tipo químico.

Existe un gran número de test o análisis químicos que pueden ser utilizados, con un mayor grado de confianza que los físicos, como criterios indicadores del grado de madurez de los compost. Entre ellos se pueden destacar:

- Relación C/N (en fase sólida).

Este criterio ha sido tradicionalmente empleado para evaluar la estabilidad de un compost. Aunque la selección de muestras lo suficientemente uniformes puede ser un desafío, la determinación de este parámetro es relativamente simple y rápida. Por lo general, se considera que un compost ha alcanzado su madurez cuando su relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es inferior a 20 y preferiblemente cercana a 15, aunque en la práctica este valor puede ser más alto debido a que una gran parte del carbono orgánico, presente en formas resistentes como celulosas o ligninas, no es fácilmente accesible para los microorganismos. (Agencia de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

- pH

Además, la medición del pH podría ser útil como un indicador del progreso del proceso, ya que típicamente durante el compostaje el pH experimenta una ligera disminución, seguida de un aumento gradual a medida que el material se estabiliza, finalizando en un rango entre 7 y 8. Valores más bajos podrían señalar la ocurrencia de condiciones anaeróbicas y sugerir que el material aún no ha alcanzado su madurez. (Agencia de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014)

2.2.6. Aditivos para el Proceso de Compostaje

El uso de aditivos en el proceso de compostaje, es decir activadores e inoculantes sirven

para acelerar el mismo y su uso se justifica, debido a la gran variedad y calidad de los materiales usados para elaborar el compost, lo cual dificulta el llegar a los rangos ideales para iniciar el proceso y por lo tanto afecta en la calidad del producto final.

Los activadores ayudan a que el proceso de compostaje sea más rápido, haciendo que la temperatura sea adecuada para matar patógenos y evitando que gran parte del material sea oxidado por los microorganismos, lo cual evitará que se reduzca la cantidad de producto elaborado. Para evitar esto se tiene que reducir la relación C/N inicial mediante la adición de un activador que contiene nitrógeno extra en forma más reactiva, lo cual provocará que se reduzca la cantidad de materia orgánica oxidada para alcanzar la relación C/N final, aumentando por lo tanto la producción de compost. (SciEIO, 2016)

2.2.6.1. Microorganismos de Montaña

Estos son inoculantes microbianos que reestablecen el equilibrio microbiológico del suelo, mejorando sus condiciones físico químicas, biológicas y la estructura del suelo. Además, mejora la capacidad de infiltración del agua, ayuda a controlar las poblaciones de microorganismos patógenos e incrementa la biodiversidad microbiana, generando las condiciones necesarias para que los microorganismos benéficos nativos prosperen. (Redalyc, 2018)

La caracterización que presentan de los microorganismos de montaña como aceleradores biológicos para el compostaje se basa en varias características clave que los hacen especialmente efectivos en este proceso:

- **Adaptación a condiciones extremas:** Los microorganismos de montaña han desarrollado adaptaciones para sobrevivir en entornos de alta altitud y temperaturas frías. Su capacidad para prosperar en condiciones extremas los hace

ideales para el compostaje en climas fríos o en regiones donde las temperaturas pueden variar ampliamente. (Redalyc, 2018)

- **Eficiencia en la descomposición:** Estos microorganismos tienen la capacidad de descomponer una amplia gama de materiales orgánicos de manera eficiente y rápida. Su actividad enzimática les permite descomponer los residuos orgánicos en componentes más simples que pueden ser utilizados por otros microorganismos en el proceso de compostaje. (Microbiologia.met, 2017)
- **Versatilidad metabólica:** Los microorganismos de montaña son capaces de utilizar una variedad de sustratos orgánicos como fuente de energía. Esto les permite descomponer una amplia gama de materiales orgánicos, incluyendo aquellos que son difíciles de descomponer para otros microorganismos. (Redalyc, 2018)
- **Resistencia a condiciones adversas:** Debido a su origen en entornos hostiles, los microorganismos de montaña son resistentes a condiciones adversas como la sequía, la radiación ultravioleta y las fluctuaciones extremas de temperatura. Esta resistencia les permite mantener la actividad metabólica incluso en condiciones ambientales desafiantes durante el compostaje. (Viera, 2017)
- **Producción de metabolitos beneficiosos:** Al descomponer la materia orgánica, los microorganismos de montaña producen una variedad de metabolitos beneficiosos para el compostaje, como enzimas, ácidos orgánicos y compuestos bioactivos. Estos metabolitos pueden mejorar la calidad del compost y promover la actividad microbiana en el proceso. (Microbiologia.met, 2017)

En resumen, la caracterización de los microorganismos de montaña como aceleradores biológicos para el compostaje se basa en su adaptación a condiciones extremas, su eficiencia en la descomposición de materia orgánica, su versatilidad metabólica, su resistencia a condiciones adversas y su capacidad para producir metabolitos beneficiosos. Estas características los convierten en una opción valiosa para mejorar el proceso de compostaje y producir compost de alta calidad. (Redalyc, 2018)

Los microorganismos de montaña contienen un promedio de 80 especies de microorganismos de unos 10 géneros, que pertenecen básicamente a cuatro grupos. (Higa, 2013)

- **Bacterias fotosintéticas:** Utilizan la energía solar en forma de luz y calor, para sintetizar vitaminas y nutrientes. Cuando se establecen en el suelo, producen también un aumento en las poblaciones de otros microorganismos eficaces, como los fijadores de nitrógeno, los actinomicetos y las micorrizas.
- **Actinomicetos:** Son hongos benéficos, que controlan hongos y bacterias patógenas (causantes de enfermedades), y que dan mayor resistencia frente a estos a través del contacto con patógenos debilitados.
- **Bacterias productoras de ácido láctico:** El ácido láctico posee la propiedad de controlar la población de algunos microorganismos, como el hongo *Fusarium*. Además, mediante la fermentación de materia orgánica, elaboran nutrientes para las plantas.
- **Levaduras:** bacterias que utilizan sustancias que producen las raíces de las plantas y otros materiales orgánicos, para sintetizar vitaminas y activar otros microorganismos del suelo.

2.2.6.2. Principales fuentes de Microorganismos de Montaña.

Las principales fuentes de microorganismos benéficos se encuentran en los siguientes.

(Viera, 2017)

- **Mantillos:** La fuente primaria de microorganismos benéficos agrícolas se encuentra en el litter, mantillo o tierra de capote o primera película de tierra bajo la hojarasca y material desprendido de las selvas y bosques o de algún agro sistema poli estratificados, es decir, bajo sombrío de árboles. Esta primera capa de tierra es a la vez efecto y residencia de los microorganismos que, vehiculizados en el humus, convierten los residuos de vegetación y fauna en tierra fértil. Numerosas culturas antiguas han utilizado el mantillo como abono natural.

(CENTA, 2012)

- **Micorrizas:** Las micorrizas son asociaciones simbióticas entre hongos y raíces de plantas que mejoran la absorción de nutrientes, la resistencia a patógenos, se obtienen principalmente de suelos naturales donde estas asociaciones están presentes de forma natural. También pueden adquirirse a través de productos comerciales que contienen esporas de hongos micorrícicos. Existen varios tipos, como las micorrizas arbusculares, comunes en cultivos agrícolas, y las ectomicorrizas, comunes en árboles forestales. En el compostaje, las micorrizas pueden acelerar la descomposición de la materia orgánica y enriquecer el compost, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. (CENTA, 2012)
- **Caldos microbiales:** Los caldos microbiales se obtienen mediante varios métodos. La fermentación aeróbica implica mezclar materiales orgánicos como estiércol y residuos de cultivos con agua y melaza en un recipiente abierto o

semiabierto, agitando regularmente para oxigenar y promover el crecimiento de microorganismos aeróbicos. La fermentación anaeróbica utiliza los mismos materiales en un recipiente cerrado sin oxígeno, creando un ambiente adecuado para microorganismos anaeróbicos. Además, existen productos comerciales con concentrados de microorganismos beneficiosos que se diluyen en agua para preparar el caldo. Otra opción es recolectar muestras de suelo, compost maduro o estiércol y cultivarlas en un medio líquido nutritivo bajo condiciones controladas para aumentar la población microbiana. Estos métodos permiten obtener caldos microbiales ricos en microorganismos beneficiosos para mejorar la fertilidad del suelo. Se trata de la multiplicación por vía líquida de microorganismos benéficos, de los cuales los cuatro grupos más cultivados son: bacterias fotosintetizadoras, llamadas algas unicelulares, levaduras, lactobacilos, actinomicetos.

(Microbiologia.met, 2017)

Los microorganismos de montaña se pueden preservar durante 1 a 2 años, la preparación en medio sólido se lo realiza para reproducir los microorganismos de montaña. Su principal insumo es la hojarasca que se encuentra en suelo y se reconocen fácilmente por la formación de micelios que tiene, esta preparación se la realiza de forma anaeróbica es muy útil para las plantas, compost y suelo. (Ifoam, 2020)

2.2.6.3. Microorganismos de Montaña en medio Solido

Los microorganismos de montaña son colonias de hongos, bacterias y levaduras benéficas para el suelo, estos descomponen la materia orgánica y lo convierten en nutrientes asimilables para el desarrollo óptimo de la planta, generalmente son de color verde y anaranjados para constatar que están en descomposición, también se recomienda recolectar en bosques poco

frecuentados por los humanos para reducir la contaminación de este biofertilizante con hongos bacterias dañinas. (Santacruz, 2019)

Para obtener la base de este inóculo, debemos acudir a las zonas en las que se desarrollan, es decir a un ambiente natural, por ejemplo, los podemos encontrar en el suelo de montañas, bosques, parras de churqui y lugares sombreados donde en los últimos tres años no se han utilizado agroquímicos.

Reproducción de microorganismos de montaña: Después de recolectar los microorganismos de montaña en los terrenos adyacentes al relleno sanitario de Agua Chica, una vez obtenidos los microorganismos, procederemos a aplicar una serie de insumos para su reproducción. (INIFAP, 2022)

- 1 barril de plástico de 60 litros con tapadera y cincho metálico.
- 18 kilos de harina de arroz.
- 36 kilos inocuo de Microorganismos de Montaña
- 1 galón de melaza
- Agua limpia

Los pasos para la producción de Microorganismos de Montaña en estado sólido son los siguientes.

- Se comienza reduciendo la hojarasca a partes pequeñas con la ayuda de un tamizador, eliminando los pedazos de troncos, piedras u otro material extraño.
- Con el tamizado de hojarasca se agrega la harina de arroz y se mezcla hasta homogenizar toda masa.

- Se diluye con agua el galón de melaza y se humedece la masa homogénea que hemos trabajado, hacemos la prueba del puño (apretar con el puño) para saber si no tiene falta o exceso de agua.
- Se llena el barril y se compacta presionando la mezcla para eliminar la presencia de aire dentro recipiente, luego se tapa herméticamente.
- Se rotula con la fecha de reproducción y se tapa herméticamente.
- Tiempo aproximado para la cosecha es de 30 días.

2.2.6.4. Microorganismos de Montaña en medio Líquido

La reproducción de microorganismos de montaña en medio líquido, se realiza para incrementar la cantidad de microorganismos benéficos reproducidos en medio sólido. Estos biopreparados de microorganismos de montaña en medio líquido se elaboran a partir de microorganismos como bacteria ácido lácticas, fotosintéticas, levaduras y actinomicetos, las que al aplicarse al suelo producen vitaminas, ácidos orgánicos, quelatados y antioxidantes, los cuales son cultivos microbianos benéficos que favorecen a la salud de los suelos. Algunos beneficios de usar microorganismos de montaña son que las bacterias del ácido láctico suprimen los microorganismos nocivos y mejoran la descomposición de la materia orgánica. (INIFAP, 2022)

Activación de los microorganismos de montaña: Para la activación de los microorganismos de montaña se requiere de los siguientes insumos y materiales.

- 1 barril plástico de 140 litros con tapadera y cincho metálico 52,925 kg de Microorganismos de Montaña sólidos
- 1 saco vacío
- 5 galones de melaza
- Agua limpia

Para la activación de microorganismos de montaña líquido son los siguientes pasos:

- Se diluye con agua los 5 galones de melaza y se humedece la masa homogénea que hemos trabajado y se ubica en un saco.
- Se llena el barril con la melaza y agua limpia, se sumerge el saco con los microorganismos de montaña en su fase sólida se le introduce una piedra amarrada o un peso para que pueda sumergirse y no quede en la superficie.
- Luego se tapa herméticamente. Se rotula con la fecha de reproducción y se tapa herméticamente.
- Tiempo aproximado para la cosecha es de 15 días.

Tabla 2-10 Microorganismos de Montaña Líquidos

Número	Simbología	Unidad	Resultados
1	pH		4.5
2	Nitrógeno Total	mg/l	822.1
3	Fósforo	mg/kg	205.2
4	Potasio	mg/l	404.0
5	Boro	mg/l	1.33
6	Calcio	mg/l	40.32
7	Magnesio	mg/l	86.1
8	Azufre	mg/l	<0.001
9	Cobre	mg/l	<0.012
10	Hierro	mg/l	2.437
11	Zinc	mg/l	1.767
12	Manganeso	mg/l	2.039
13	Hongos y levaduras	UFC/100ml	20000

Fuente: Tercio Camacho, R. (2020). Agricultura ganadera de Costa Rica

2.3. Sistemas y técnicas para el compostaje.

Las diferencias de los métodos existentes se presentan en la fase de descomposición del proceso de compostaje, las técnicas para compostaje se clasifican en sistemas abiertos y cerrados. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)

Los sistemas abiertos son realizados al aire libre sin contenedores, y los cerrados en contenedores (o reactores) de forma aerobia o anaerobia. Lo importante para seleccionar el método adecuado, es evaluar primero las condiciones particulares de cada lugar.

2.3.1. *Sistemas abiertos*

Se compostan en formas de pilas dispuestas a voluntad o hileras, puede darse el caso que los materiales se coloquen en contenedores cerrados por dos o 3 lados, en estos sistemas no se controla el medio donde se realiza el proceso, entre los más importantes se puede mencionar:

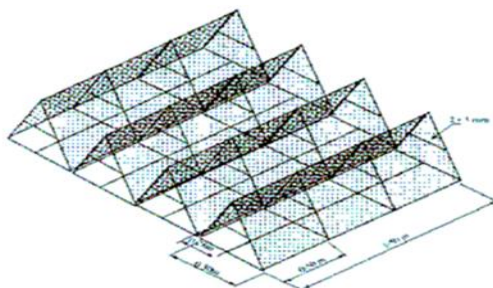
2.3.1.1. Pilas estáticas con aireación pasiva

Se considera que este sistema es muy apropiado realizando un análisis costo/eficacia de dicho sistema comparado con otros como aireación forzada o pilas con volteo. Para favorecer la ventilación natural de la pila, se emplean estructuras que permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior de la pila. (MMAyA, 2018)

Las pilas son ventiladas por convección natural. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila.

El compostaje en pilas simples es un proceso muy versátil y con escasas complicaciones. Se ha usado con éxito para compostar estiércol, restos de poda, fangos y residuos sólidos urbanos. El proceso logra buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantienen las condiciones aerobias y el contenido de humedad.

Figura 2-6 Estructura de la Pila Estática con Aireación Pasiva



Fuente: (Haug, 1993)

Figura 2-7 Pilas Estáticas con Aireación Pasiva



Fuente: (Haug, 1993)

2.3.1.2. Pilas estáticas con aireación forzada

Estos sistemas permiten tener un mayor control de la concentración de oxígeno y mantenerla en un intervalo apropiado (15-20 %) para favorecer la actividad metabólica de los microorganismos aerobios que desarrollan el proceso.

El aporte de oxígeno se realiza por varias vías, succión o insuflado, así como las variantes que incluyen a los dos tipos. El aporte de oxígeno puede realizarse de forma continua, a intervalos o ligados a un termostato que, llegada una determinada temperatura (aprox. 60°C) acciona el mecanismo de inyección de aire hasta que la temperatura desciende hasta el valor deseado. (MMAyA, 2018)

Una vez que se constituye la pila, no se toca, en general, hasta que la etapa activa de compostaje sea completa.

Figura 2-8 Pilas Estáticas con Aireación Forzada



Fuente: (Haug, 1993)

2.3.1.3. Pilas con volteo

Es uno de los sistemas más sencillos y más económicos. Esta técnica de compostaje se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación. (Ravines, 2022)

Después de cada volteo, la temperatura desciende del orden de 5 o 10 °C, subiendo de nuevo en caso que el proceso no haya terminado. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que deseamos realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 6 - 10 días. Normalmente se realizan controles automáticos de temperatura, humedad y oxígeno para determinar el momento óptimo para efectuar el volteo. Es muy usual que los volteos se lleven a cabo con una simple pala cargadora, recogiendo y soltando del material para posteriormente reconstruir la pila, tal y como se muestra en la figura. Sin embargo, para materializar esta técnica de compostaje, existe maquinaria específicamente diseñada para conseguir un mezclado del compost de máxima eficiencia. (Centellas, 2022)

Figura 2-9 Pala Cargadora Volteando la Pila de Compost



Fuente: (Andalucia,2015)

2.3.1.4. Combinación del sistema de pilas de aireación forzada y de volteo

Las hileras se construyen por encima de un canal de aireación, se voltean periódicamente y entre volteos los ventiladores inyectan o extraen aire. Como el sistema de aireación proporciona oxígeno y control de temperatura el volteo es menos frecuente, este sistema acelera el proceso de compostaje. (kahn, 2005)

2.3.2. *Sistemas cerrados*

Se caracterizan porque el material no está nunca en contacto directo con el exterior, y todas las entradas y salidas de gases y líquidos se realiza a través de un sistema de conductos y turbinas. Tecnológicamente se encuentran en esta categoría los sistemas de compostaje más sofisticados y complejos. Sus dos principales ventajas respecto a los anteriores son el excelente control de emisiones al medio y el afinado dominio de los parámetros del proceso, pero también ahorran espacio pues presentan una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada.

2.3.2.1. Reactores verticales

Son reactores de 4 a 10 m de altura que constan de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. A medida que se va extrayendo el material descompuesto, el material fresco va descendiendo.

El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia⁴ del residuo orgánico en el reactor acostumbra a ser de 2 semanas y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior de maduración. (MMAyA, 2018)

2.3.2.2. Reactores horizontales

El material se somete al proceso de descomposición en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). Los reactores, tienen forma de caja rectangular de 4m de altura; 5,5m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante sistemas hidráulicos y la aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de residencia dentro del reactor es normalmente de 2 semanas y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior de maduración.

El sistema mediante reactores requiere de menos espacio, pero de mucha más inversión por ser un método muy tecnificado y el consumo energético es alto. (MMAyA, 2018)

2.3.3. Selección del sistema para el proceso de compostaje

Para llevar a cabo el proceso de compostaje existen diferentes sistemas que se clasifican en sistemas abiertos y sistemas cerrados, para este proceso se tomó en cuenta los métodos del sistema abierto por su accesibilidad y bajo costo. (OPANatura, 2021)

Mediante un análisis cualitativo de los factores más importantes, se consideraron tres posibles métodos para la producción del compost. que se muestran a continuación.

2.3.3.1. Sistemas de estudio para la obtención de compost.

Tabla 2-11 Métodos de Estudio para la Obtención de Compost.

A	Pilas estáticas con aireación pasiva
B	Pilas estáticas con aireación forzada
C	Pilas con volteo

Fuente: Elaboración propia, 2023

Estos métodos representan diferentes enfoques para el compostaje y pueden tener diferentes ventajas y desventajas dependiendo de los recursos disponibles y los objetivos específicos del proceso de compostaje

A continuación, se describen los factores que se tomaran en cuenta para la selección del proceso.

- Descripción de los factores para la selección del proceso de compostaje.
- Disponibilidad de terreno: Este factor se refiere a la cantidad de espacio disponible para llevar a cabo el compostaje. Si se dispone de un terreno amplio, se pueden considerar métodos que requieran más espacio, como pilas estáticas con aireación pasiva. Por otro lado, si el espacio es limitado, pueden ser más adecuados métodos que ocupen menos espacio, como pilas con volteo.
- Suministro de materia prima: La cantidad de los materiales orgánicos disponibles para compostar influirán en la elección del método de compostaje. Si se cuenta con una gran cantidad de materia prima, se pueden considerar métodos que requieran pilas más grandes o una mayor cantidad de material, como pilas con aireación forzada. Por el contrario, si el suministro de materia prima es limitado,

puede ser preferible un método que requiera menos material, como pilas estáticas con aireación pasiva.

- **Mano de obra:** La cantidad de mano de obra disponible y su nivel de habilidad también deben tenerse en cuenta. Algunos métodos de compostaje, como pilas con volteo, pueden requerir una mayor cantidad de trabajo manual y experiencia, mientras que otros, como pilas estáticas con aireación pasiva, pueden ser más simples y requerir menos mano de obra.
- **Energía eléctrica:** Algunos métodos de compostaje, como pilas con aireación forzada, pueden requerir energía eléctrica para operar equipos como ventiladores o trituradoras. Si se dispone de una fuente confiable de energía eléctrica, estos métodos pueden ser una opción viable. Sin embargo, si la energía eléctrica es limitada o costosa, puede ser preferible optar por un método que no dependa tanto de la electricidad, como pilas estáticas con aireación pasiva.
- **Combustible:** Este factor se refiere a la disponibilidad y costo de los combustibles necesarios para operar equipos y maquinaria, especialmente si se utilizan métodos de compostaje que requieren energía, como pilas con aireación forzada. Si el combustible es costoso o escaso, puede ser preferible optar por métodos de compostaje que requieran menos o ninguna energía adicional.
- **Suministro de agua:** El agua es un componente crucial en el proceso de compostaje, ya que se necesita para mantener la humedad adecuada en las pilas de compost. Es importante considerar la disponibilidad y el costo del agua, así como la facilidad de acceso a fuentes de agua, como grifos o sistemas de riego. Si

el suministro de agua es limitado, puede ser necesario optar por métodos de compostaje que requieran menos agua o que sean más eficientes en su uso.

- **Materiales:** Este factor se refiere a la disponibilidad de los materiales necesarios para construir pilas de compost o equipos y maquinaria asociados con el proceso de compostaje. Es importante considerar la disponibilidad local de materiales como madera, alambre, plástico u otros materiales necesarios para la construcción y operación de las instalaciones de compostaje.
- **Equipos y Maquinaria:** La disponibilidad de equipos y maquinaria necesarios para el proceso de compostaje también es un factor importante a considerar. Esto incluye equipos como trituradoras, volteadoras de compost, ventiladores para aireación forzada, entre otros.

Tabla 2-12 Descripción de los factores para la selección del proceso de compostaje.

Factor	Descripción
1	Disponibilidad de terreno
2	Suministro de materia prima
3	Mano de obra
4	Energía eléctrica
5	Combustible
6	Suministro de agua
7	Materiales
8	Equipos y Maquinaria

Fuente: Elaboración propia, 2023

2.3.3.2. Matriz de enfrentamiento para la selección del proceso de compostaje.

La matriz de enfrentamiento es una herramienta que se utiliza para comparar y evaluar diferentes opciones o alternativas. En el contexto de la selección del proceso de compostaje, esta matriz de enfrentamiento nos ayudara a analizar y tomar decisiones sobre los diferentes métodos disponibles.

Tabla 2-13 Matriz de Enfrentamiento para la Selección del Proceso de Compostaje

Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	Valor asignado%
1	-	1	1	0	1	0	0	1	4	0,133
2	1	-	1	1	0	0	1	1	5	0,167
3	0	0	-	1	1	0	1	0	3	0,1
4	0	0	1	-	0	1	1	0	3	0,1
5	1	0	0	0	-	1	1	1	4	0,133
6	0	1	0	0	1	-	0	1	3	0,1
7	0	1	1	0	0	1	-	1	4	0,133
8	1	0	0	1	1	1	0	-	4	0,133
Total									30	1

Fuente: Elaboración propia,2023

Donde:

- Factor: Esta columna enumera los criterios que se están evaluando.
- 1, 2, 3, ..., 8: Son los factores para la selección del proceso
- Total: Esta columna muestra la suma de los valores asignados para cada criterio. Representa la puntuación total para cada criterio en relación con los demás.
- Valor asignado %: Esta columna muestra el porcentaje de contribución de cada criterio al total. Se calcula dividiendo la puntuación total del criterio entre el total general y multiplicando por 100. Esto ayuda a identificar qué criterios tienen un impacto más significativo en la evaluación global.

2.3.3.3. Evaluación de alternativas para el proceso de compostaje

A continuación, se presenta la Tabla 2.11, la cual muestra la evaluación de las alternativas para el proceso de compostaje.

Tabla 2-14 Evaluación de Alternativas para el Proceso de Compostaje

Factor	Valor asignado %	A		B		C	
		Calificación Ponderada (1 -10)	Valor Ponderado	Calificación Ponderada (1 -10)	Valor Ponderado	Calificación Ponderada (1 -10)	Valor Ponderado
1	13,33	7	0,93	8	1,07	8	1,07
2	16,66	8	1,33	8	1,33	9	1,5
3	10	8	0,8	7	0,7	8	0,8
4	6,89	9	0,62	9	0,62	7	0,48
5	13,3	8	1,06	7	0,93	8	1,06
6	10	7	0,7	8	0,8	7	0,7
7	13,3	9	1,2	7	0,93	8	1,06
8	16,33	8	1,31	8	1,31	9	1,47
Total	100		7,95		7,69		8,15

Fuente: Elaboración propia, 2023

Basándonos en la evaluación realizada, el método de pilas con volteo sobresale como la mejor alternativa para el proceso de compostaje. Con una calificación ponderada total de 8.15, supera a las otras opciones evaluadas en términos de disponibilidad de terreno, suministro de materia prima, mano de obra, energía eléctrica, combustible, suministro de agua, materiales, equipos y maquinaria.

Esto sugiere que el **método de pilas con volteo** es eficiente y adaptable, lo que lo convierte en la opción más sólida para llevar a cabo el proceso de compostaje de manera efectiva y con los recursos disponibles.

2.4. Área de Implementación del Proyecto

El lugar donde se llevó a cabo la investigación aplicada está ubicado en el relleno sanitario de Agua Chica del Municipio de Villazón

2.4.1. Ubicación geográfica

El Gobierno Autónomo Municipal de Villazón se encuentra ubicado en el extremo Sur del departamento de Potosí, en la frontera con la República de Argentina; en territorio argentino,

se encuentra la ciudad de La Quiaca y forma parte de la mancomunidad “Ruta de los Libertadores”

Figura 2-10 Ubicación Geográfica



Fuente: GOOGLE-EART, 2023

2.4.2. Límites territoriales

Los límites territoriales de Villazón, de acuerdo al mapa cartográfico de IGM son los siguientes:

- Limita al Norte con el Municipio de Tupiza
- Al Sud limita con la República de Argentina
- Al Este con el municipio de Yunchara, provincia Avilés del departamento de Tarija

2.4.3. Altitudes

- La capital de municipio se encuentra a una distancia de 347 km de la ciudad de Potosí, y a una Altura de 3.400 msnm.
- La primera sección municipal de Villazón se encuentra situada entre los paralelos 21°41'00'' y 22°06'30' de latitud sud con relación a la línea del Ecuador y entre los 65°10'00' y 66°04'30'' de Longitud oeste con relación al meridiano de Greenwich

2.4.4. Temperatura y Precipitación

La tabla 2-11 resume las temperaturas máximas y mínimas mensuales, así como la precipitación mensual registrada en Villazón durante el año 2023

Tabla 2-15 Datos Meteorológicos de la Temperatura

Mes	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Precipitación (mm)
Enero	20	8	59
Febrero	20	8	57
Marzo	20	7	53
Abril	19	5	47
Mayo	17	2	42
Junio	15	-0.6	0
Julio	15	-0.8	0
Agosto	17	1	27
Septiembre	19	4	25
Octubre	20	6	24
Noviembre	21	8	26
Diciembre	21	7	41

Fuente: hikersbay.com 2023

2.4.5. Viento

La tabla 2-12 resume las velocidades medias y máximas mensuales del viento registradas en Villazón durante el año 2023.

Tabla 2-16 Datos Metrológico de la Velocidad del Viento

Mes	Velocidad Media del Viento (km/h)	Velocidad Máxima del Viento (km/h)
Enero	10	20
Febrero	12	22
Marzo	11	21
Abril	10	20
Mayo	9	19
Junio	8	18
Julio	8	18
Agosto	9	19
Septiembre	10	20
Octubre	11	21
Noviembre	12	22
Diciembre	11	21

Fuente: hikersbay.com 2023

CAPÍTULO III

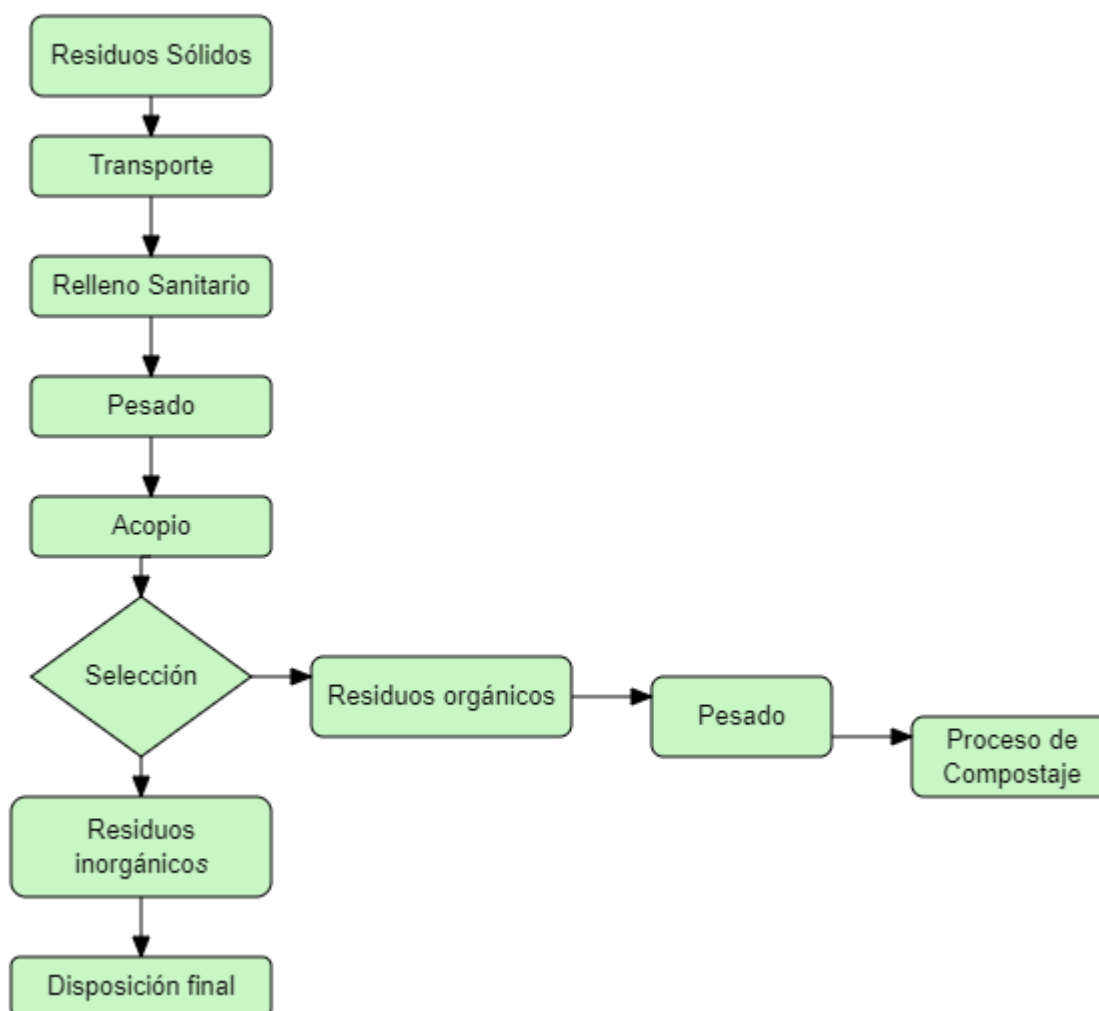
3. Parte experimental

3.1. Proceso Tecnológico Experimental

3.1.1. Diagrama de Bloques de los Residuos Sólidos

El proceso de tratamiento de residuos orgánicos comienza con la recolección y recepción de estos desechos, provenientes de diversas fuentes como hogares, restaurantes, mercados y residuos comerciales.

Figura 3-1 Diagrama de bloques de los Residuos Sólidos



Fuente: Elaboración propia.2023

3.1.1.1. Desarrollo del Proceso de los Residuos Sólidos

A continuación, se describe cada una de las etapas del proceso tecnológico experimental

- **Residuos Sólidos:** Son materiales descartados que provienen de diversas fuentes como el hogar, el comercio, la industria y las instituciones. Se clasifican en residuos orgánicos, que incluyen restos de alimentos y materiales biodegradables como desechos de jardinería, y residuos inorgánicos como plásticos, metales, vidrio, papel y cartón, que son materiales no biodegradables
- **Transporte:** El transporte de residuos sólidos en el Municipio de Villazón se realiza con cuatro carros recolectores que cubren toda el área urbana. Este proceso implica la recolección, carga y traslado de los residuos desde su lugar de origen hasta el relleno sanitario de Agua Chica, ubicado a 7 kilómetros del centro urbano
- **Relleno Sanitario:** El relleno sanitario de Villazón es una instalación diseñada para la disposición final segura y controlada de residuos sólidos. Actualmente, cuenta con 4 macro celdas para el tratamiento de residuos, de las cuales la macro celda número 3 está operativa y se encuentra al 70% de su capacidad. El proceso típico en el relleno sanitario incluye:
 - Compactación de los residuos para reducir el volumen.
 - Cobertura diaria con capas de tierra para minimizar olores y controlar la proliferación de vectores.
 - Monitoreo ambiental continuo para prevenir la contaminación del suelo y agua subterránea
- **Pesado:** En el relleno sanitario de Agua Chica en Villazón, el pesaje de los residuos sólidos se lleva a cabo al momento de su ingreso mediante una báscula estática para

camiones. Esta báscula tiene una capacidad de 60 toneladas y una precisión de 20 kilogramos, construida con materiales combinados de acero y concreto y con dimensiones de 15 metros de longitud. Funciona con una alimentación eléctrica de 220 voltios y frecuencia de 50/60 Hz. Todos los residuos que entran al relleno sanitario son pesados y registrados meticulosamente. Este proceso proporciona datos precisos sobre la cantidad de residuos sólidos generados, esencial para la planificación y gestión eficiente de los recursos del relleno sanitario.

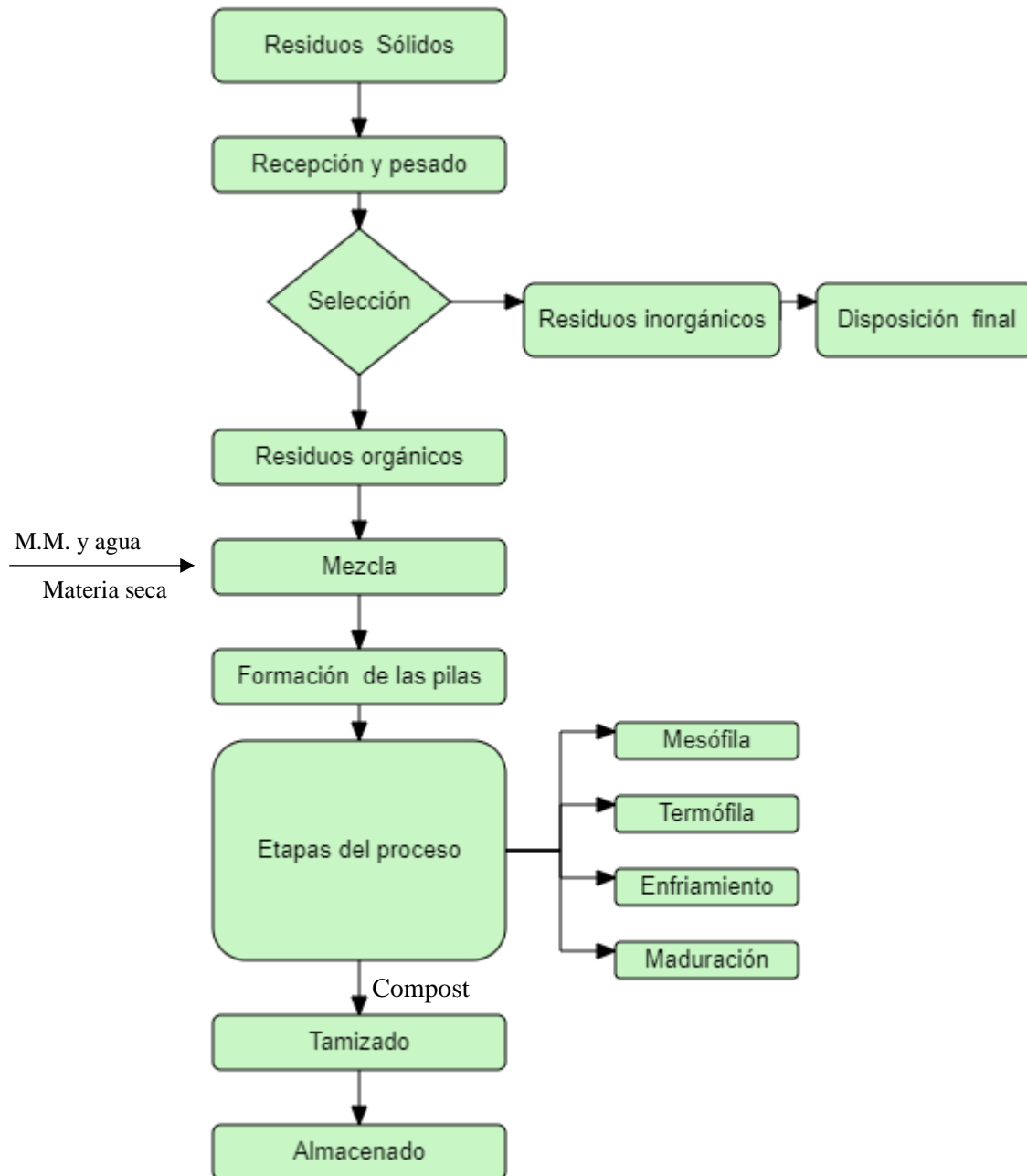
- Separación: En el relleno sanitario de Agua Chica, se reciben residuos que llegan previamente separados, facilitado por pequeños carritos instalados en los carros recolectores. Estos carritos están diseñados específicamente para la recolección de residuos orgánicos. Además, cuando la aduana procede a la destrucción de mercadería de contrabando, se realiza una separación de manera manual de residuos sólidos y orgánicos. Este proceso asegura que los residuos orgánicos sean manejados de manera diferenciada desde su origen, promoviendo prácticas de gestión de residuos más efectivas. La separación específica de residuos orgánicos también facilita su posterior tratamiento adecuado, como el compostaje, mientras que los residuos sólidos restantes son dirigidos hacia las operaciones regulares del relleno sanitario para su disposición final controlada en la macro celda.
- Residuos Orgánicos: Los residuos orgánicos generados en el municipio de Villazón provienen de fuentes domiciliarias, comerciales e industriales. Estos residuos son recolectados y trasladados para su disposición final de manera controlada y eficiente.
- Proceso de compostaje: Después de la recepción, selección y acopio de los residuos orgánicos, se procede a su aprovechamiento mediante compostaje. Este proceso comienza

con la mezcla de la materia orgánica con agua y algún aditivo, facilitando la descomposición biológica. Esta mezcla se mantiene en condiciones controladas de temperatura y humedad para asegurar una degradación eficiente y la producción de compost de alta calidad

3.1.2. Diagrama de Bloques del Compostaje

El proceso de compostaje implica la recolección de residuos orgánicos, la formación de pilas compostables, la inoculación con microorganismos para descomponerlos, y el control de parámetros como pH, humedad y temperatura para asegurar la calidad del compost.

Figura 3-2 Diagrama de Bloques del Compostaje



Fuente: Elaboración propia.2023

3.1.2.1. Desarrollo del Proceso de Compostaje

A continuación, se detalla el proceso de compostaje

- **Recepción y Pesado:** Los residuos ingresan al relleno sanitario en camiones recolectores y vehículos de la aduana. Al llegar, los camiones se pesan con su carga completa. Luego, los camiones vacíos se pesan nuevamente, y la diferencia entre ambos pesos proporciona el peso neto de los residuos.

Ilustración 3-2 Recepción de Residuos



Ilustración 3-1 Pesado de Residuos en la Bascula



Fuente: Elaboración propia. 2023

Ilustración 3-4 Residuos del Municipio de Villazón



Ilustración 3-3 Residuos proporcionado por la Aduana



Fuente: Elaboración propia. 2023

- **Selección:** Los residuos orgánicos que llegan en recipientes como cajas, bolsas y yutes, los cuales son no biodegradables, representan un desafío para el proceso de compostaje debido a que no se descomponen naturalmente y pueden afectar la calidad del compost final. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo una selección manual de estos materiales antes

de iniciar el compostaje. Este proceso se realiza en colaboración con el personal de la Entidad Municipal de Aseo de Villazón, quienes se encargan de separar adecuadamente los materiales no deseados para garantizar un compostaje eficiente y de alta calidad.

Ilustración 3-5 Selección Manual de los Residuos Orgánicos



Fuente: Elaboración propia. 2023

- **Pesado:** Después de separar los residuos orgánicos de los inorgánicos, los residuos orgánicos se pesan nuevamente. Este peso se registra para proporcionar información precisa, lo cual es esencial para realizar cálculos posteriores y determinar la cantidad de materia necesaria para obtener compost de alta calidad
- **Mezcla:** Una vez pesados, los residuos orgánicos se mezclan cuidadosamente con agua y microorganismos de montaña líquidos, materia seca (hojas secas o restos de poda). Esta mezcla es esencial para optimizar el proceso de descomposición, asegurando un equilibrio adecuado de carbono y nitrógeno. La mezcla homogénea ayuda a mantener condiciones ideales de humedad y aireación, facilitando la actividad microbiana y acelerando la descomposición de la materia orgánica.

Ilustración 3-6 Mezcla de Residuos Orgánicos con los M.M. y la Materia Seca

Fuente: Elaboración propia.2023

- Pila de compostaje: Las pilas de compostaje son estructuras cruciales en el proceso de compostaje y están diseñadas con dimensiones específicas para optimizar la descomposición de la materia orgánica. Cada pila tiene aproximadamente 2 metros de largo, 2 metros de ancho y 2 metros de alto, alcanzando un peso total de alrededor de 2 toneladas. La composición de cada pila incluye los siguientes componentes:
- **Materia Orgánica:** Restos de alimentos, podas de jardín y otros desechos biodegradables.
 - **Materia Seca:** Hojas secas, paja, cartón y otros materiales ricos en carbono que ayudan a balancear la relación carbono/nitrógeno.
 - **Microorganismos de Montaña Líquidos:** Soluciones ricas en microorganismos que aceleran la descomposición y mejoran la calidad del compost.
 - **Agua:** Añadida para mantener un nivel de humedad adecuado, esencial para la actividad microbiana.

Ilustración 3-7 Formación de las Pilas de Compostaje

Fuente: Elaboración propia. 2023

- **Mezcla y Homogenización:** Para asegurar que todos los materiales se descompongan de manera uniforme, las pilas son mezcladas cuidadosamente. Esto se realiza utilizando una mini pala cargadora, que permite una mezcla homogénea y eficiente de todos los componentes.

Ilustración 3-8 Mini Pala Cargadora Mezclando los Residuos Orgánicos

Fuente: Elaboración propia.2023

- **Mantenimiento y Monitoreo:** Las pilas se mantienen y monitorean constantemente, volteándolas regularmente para asegurar una buena aireación y controlando la temperatura y la humedad. Este manejo cuidadoso garantiza que la descomposición se realice de manera eficiente y sin producir malos olores.

Ilustración 3-9 Volteo de las pilas de Compostaje

Fuente: Elaboración propia.2023

- **Control de parámetros:** En el proceso de compostaje, el control de parámetros como el porcentaje de humedad, el pH y la temperatura es crucial para asegurar condiciones óptimas que favorezcan la descomposición de los materiales orgánicos. El porcentaje de humedad se mide con un valiómetro para garantizar que esté dentro del rango adecuado, proporcionando suficiente agua para la actividad microbiana sin saturar el compost. El pH, también evaluado con el valiómetro, se controla para mantener un ambiente favorable a los microorganismos descomponedores. La temperatura, registrada con un termómetro infrarrojo, indica la actividad microbiana y ayuda a monitorear la fase termófila del compostaje, donde se logran temperaturas altas que facilitan la descomposición y eliminación de patógenos. Además, el volteo de las pilas con una pala mini cargadora asegura una adecuada mezcla y aireación del compost, promoviendo condiciones aeróbicas ideales para los microorganismos. Estos controles permiten optimizar el proceso de compostaje, asegurando la calidad del compost.

Ilustración 3-10 Termómetro Infrarrojo utilizado para el Control de Temperatura



Fuente: Elaboración Propia.2023

Ilustración 3-11 Valiometro utilizado para el Control de humedad y pH



Fuente: Elaboración propia.2023

- Prueba de maduración del compost: Para comprobar la maduración del compost se utilizó el método del cuarteo. Se deben colocar los residuos sobre un plástico grande, con la finalidad de no combinar los residuos con tierra y alterar el resultado. Con la ayuda de la pala separamos los residuos de diferentes partes de la pila. El montón de residuos sólidos

se manipula con pala, hasta homogeneizarlos el montón se divide en cuatro partes y se escogen las dos partes opuestas para formar un nuevo montón más pequeño.

La muestra menor se vuelve a mezclar y se divide en cuatro partes nuevamente, luego se escogen dos opuestas y se forma un montón que pasaremos aun frasco de vidrio y se llenan un poco más de la mitad se llena con agua limpia se coloca la tapa rotulamos y dejamos reposar por un periodo de 10 a 15 días.

Pasado este tiempo revisamos los frascos y si estos no contienen olor a fermentado no presenta solidos suspendidos entonces está listo para su cosecha caso contrario después de 10 días repartimos la prueba hasta el resultado esperado

Ilustración 3-12 Prueba de Maduración



Fuente: Elaboración propia. 2023

- Cosecha del compost: La etapa de cosecha del compost comienza después de realizar la prueba de maduración, la cual verifica que el compost esté completamente descompuesto y listo para su uso. En esta fase, se lleva a cabo el proceso de cribado, que consiste en separar el compost de la materia seca y de los residuos que no se han descompuesto completamente. Este cribado ayuda a obtener un compost de textura

fina y libre de materiales no deseados. Posteriormente, se procede a pesar el compost obtenido, embolsarlo y almacenarlo adecuadamente. El peso del compost embolsado se registra para llevar un control preciso de la producción. Finalmente, el compost almacenado está listo para ser utilizado como enmienda orgánica en agricultura, jardinería u otros usos, contribuyendo así a mejorar la fertilidad del suelo y promover prácticas agrícolas sostenibles.

Ilustración 3-13 Cosecha del Compost

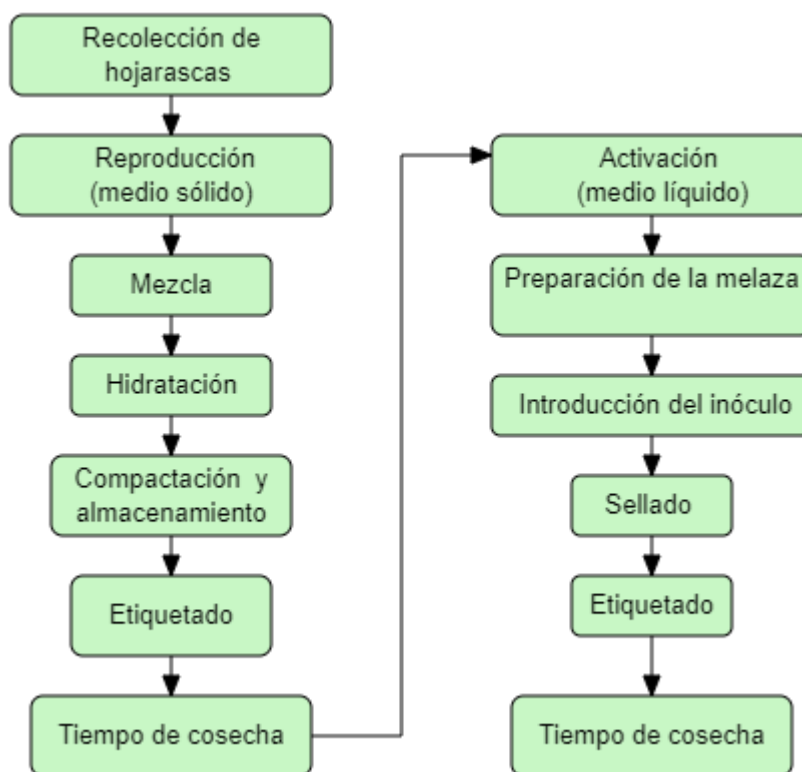


Fuente: Elaboración propia.2023

3.1.3. Diagrama de Bloques de los Microorganismos de Montaña.

La elaboración de los Microorganismos de Montaña incluye dos fases: en la primera, se reproducen en un medio anaerobio (sin oxígeno), creando condiciones óptimas para su proliferación. En la segunda etapa, se activan con una fuente energética específica que impulsa su actividad metabólica, preparándolos para su función en el compostaje.

Figura 3-3 Diagrama de bloques de los Microorganismos de Montaña



Fuente: Elaboración propia.2023

3.1.3.1.Desarrollo del proceso de los Microorganismos de Montaña

Para obtener la base del inóculo de microorganismos de montaña, es esencial recolectarlos de su ambiente natural. Un lugar adecuado para su recolección podría ser los terrenos adyacentes al relleno sanitario de Agua Chica.

Reproducción de Microorganismos de Montaña en Medio Sólido: Después de recolectar los microorganismos de montaña, se procede a su reproducción mediante la siguiente metodología:

- **Preparación de la Hojarasca:** La hojarasca proporciona una estructura y soporte físico crucial para los microorganismos. Reducirla a partes pequeñas aumenta la superficie de contacto, facilitando la colonización por los microorganismos. Para esto, se utiliza un tamizador que elimina materiales extraños como troncos y piedras, asegurando así una mezcla uniforme.
- **Mezcla Inicial:** La harina de arroz actúa como una fuente rica de carbohidratos, un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos. Se agrega la harina de arroz a la hojarasca tamizada y se mezcla hasta obtener una masa homogénea, asegurando una distribución uniforme de los nutrientes.
- **Hidratación:** La melaza actúa como una fuente adicional de carbohidratos y energía. La dilución de la melaza en agua garantiza una distribución uniforme de los nutrientes. Se diluye la melaza en agua y se usa esta solución para humedecer la masa homogénea. Para verificar la humedad adecuada, se realiza la prueba del puño: al apretar con el puño, la masa debe mantener su forma sin liberar agua en exceso.
- **Compactación y Almacenamiento:** Compactar la mezcla elimina el aire, creando un ambiente anaeróbico favorable para ciertos microorganismos benéficos. Se llena el barril con la mezcla, compactándola para eliminar el aire y luego se tapa herméticamente.

- **Etiquetado:** El etiquetado permite el seguimiento del proceso de fermentación y asegura que se mantenga un registro preciso de las fechas. Se rotula el barril con la fecha de reproducción.
- **Tiempo de Cosecha:** El tiempo permite que los microorganismos se reproduzcan y colonicen completamente el sustrato, convirtiéndolo en un inóculo efectivo. Se espera aproximadamente 30 días para completar este proceso.

Activación de Microorganismos de Montaña en Medio Líquido

Este proceso se utiliza para aumentar la cantidad de microorganismos benéficos ya reproducidos en medio sólido. Los biopreparados líquidos contienen bacterias ácido lácticas, fotosintéticas, levaduras y actinomicetos, que al aplicarse al suelo producen vitaminas, ácidos orgánicos, quelatados y antioxidantes, mejorando la salud del suelo

- **Preparación de la Melaza:** La melaza proporciona una fuente rica de carbohidratos y energía para los microorganismos durante la fase líquida. Se diluyen 5 galones de melaza en agua para preparar la solución.
- **Introducción del Inóculo:** Los microorganismos sólidos se sumergen en la solución de melaza, facilitando su transferencia al medio líquido. Se humedece la masa homogénea con la solución de melaza, se coloca en un saco y se sumerge en el barril lleno con la mezcla de melaza y agua. Se añade un peso para asegurar que el saco quede completamente sumergido.
- **Sellado:** El sellado hermético del barril impide la entrada de oxígeno, creando un ambiente anaeróbico óptimo para la reproducción de ciertos microorganismos. Se tapa herméticamente el barril

- Etiquetado: Etiquetar el barril permite el seguimiento preciso del proceso de fermentación, asegurando un registro exacto de las fechas. Se rotula con la fecha de preparación.
- Tiempo de Cosecha: Se espera aproximadamente 15 días para permitir la reproducción y colonización completa de los microorganismos en el medio líquido, convirtiéndolo en un bio-preparado efectivo.

Estos procedimientos permiten la obtención y multiplicación eficiente de microorganismos de montaña, que desempeñan un papel crucial en la mejora del compostaje y la salud del suelo, al suprimir microorganismos nocivos y acelerar la descomposición de la materia orgánica.

3.3.1. Equipos y Materiales

Los equipos a usar durante la ejecución de la fase experimental del proyecto de investigación son:

1. Equipos

A continuación, se detallan los equipos empleados en el proceso de compostaje.

Tabla 3-1 Equipos para el Compostaje

Equipo	Características
Mini pala cargadora	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizada para mezclar y voltear pilas de compost. - Dimensiones adecuadas para espacios reducidos. - Potencia suficiente para manejar materiales pesados. - Facilita la homogenización de la mezcla.
Báscula para vehículos	<ul style="list-style-type: none"> - Estática, adecuada para pesar camiones. - Capacidad de 60 toneladas. - Precisión de 20 kilogramos. - Construida con material mixto de acero y concreto. - Dimensiones: 15 metros de largo. - Alimentación: 22V, 50/60 Hz.

Fuente: Elaboración propia. 2023

2. Instrumentos

A continuación, se detallan los instrumentos empleados en el proceso de compostaje.

Tabla 3-2 Instrumentos para el Compostaje

Instrumento	Características
Valiometro	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizado para medir el volumen de materiales a granel o líquidos. - Precisión ajustable según la necesidad. - Ampliamente utilizado en procesos industriales y comerciales. - Disponible en diferentes capacidades de medición.
Termómetro infrarrojo	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizado para medir la temperatura sin contacto físico. - Ideal para superficies o alimentos a distancia. - Rango de medición amplio y respuesta rápida. - Pantalla digital para lectura precisa.
Romana	<ul style="list-style-type: none"> - Instrumento de pesaje manual. - Diseñada para pesar objetos pequeños a medianos. - Capacidad varía según el modelo, comúnmente utilizada hasta 200 kilogramos. - Ideal para uso en almacenes, mercados y comercios minoristas.

Fuente: Elaboración propia. 2023

3. Materiales

A continuación, se detallan los materiales empleados en el proceso de compostaje

Tabla 3-3 Materiales para el Compostaje

Cantidad	Material	Unidad	Características
12	Carteles de madera	unidades	Fabricados en madera resistente. Dimensiones estándar para señalización o construcción. Superficie adecuada para escritura o pintura.
5	Palas	unidades	Herramientas de mano para cavar, mover tierra o materiales. Variedad de tamaños y materiales (acero o plástico reforzado). Mango ergonómico para comodidad de uso.
2	Barriles de plástico	unidades	Fabricados en plástico resistente y duradero. Con tapa para mantener los contenidos seguros. Capacidades de 60 y 140 litros respectivamente.
6	Recipientes de 100 litros	unidades	Utilizados para almacenamiento y transporte de líquidos o materiales a granel. Fabricados en plástico resistente. Capacidad estándar de 100 litros.
1	Guincha métrica	unidades	Instrumento de medición de longitud. Carcasa resistente y cinta retráctil para fácil manejo. Precisión en la medición de varios metros.
1	Manguera de ½ pulgada	metros	Manguera resistente para riego o uso general. Fabricada en material duradero y resistente a la intemperie. Longitud de 46 metros y diámetro de ½ pulgada.
2	Cernidor	unidades	Herramienta para tamizar o separar materiales finos. Construcción en metal o plástico con mallas ajustables. Ideal para la preparación de suelos
48	Bolsas de polipropileno	unidades	Resistentes bolsas para almacenamiento o transporte. Fabricadas en polipropileno de alta resistencia.
12	Frascos de vidrio	unidades	Envases de vidrio para almacenar muestras. Tapas herméticas.

Fuente: Elaboración propia.2023

3.4. Diseño Estadístico de Experimentos

3.4.1. *Diseño aleatorizado.*

Este tipo de experimentos permite, el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable.

Las variables de influencia en el proceso de elaboración del compost son:

- ✓ Temperatura,
- ✓ pH
- ✓ Humedad

La combinación de estas variables influye directamente en el proceso de compostaje.

3.4.2. *Modelo lineal.*

El modelo estadístico para un diseño completamente al azar es:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Dato correspondiente al j-enésimo tratamiento del i-enésimo

μ = Es el efecto medio global

α_i = Es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel i factor

ϵ_{ij} = Error aleatorio

Hipótesis

H0= La variedad no genera diferencias en el rendimiento del compost

H1= Al menos una variedad genera diferencias en el rendimiento del compost

3.4.3. *Diseño Experimental*

Este diseño experimental 3^2 indica un experimento con dos factores, cada uno con tres niveles. constará de tres tratamientos diferentes, cada uno de los cuales implicará una variación en la aplicación de los microorganismos de montaña líquidos. Además, se llevarán a cabo tres repeticiones de cada tratamiento para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Como punto de referencia, se incluirá también un grupo de control, que consistirá en muestras de compostaje sin ningún tratamiento adicional (testigo).

La elección de este diseño experimental permitirá una evaluación exhaustiva del impacto de los microorganismos de montaña líquidos en el proceso de compostaje. Al utilizar un enfoque completamente al azar, se podrá determinar de manera precisa y objetiva cómo cada tratamiento afecta el tiempo necesario para completar el compostaje.

Además, al incluir múltiples repeticiones y un grupo de control, se garantizará la validez y la robustez de los resultados obtenidos, lo que permitirá realizar conclusiones sólidas y confiables."

Para la obtención del compost se aplican los siguientes tratamientos:

TI= 3% de M.M. + 2% F.E. + 95% H₂O

TII= 7 % de M.M. + 4% F.E. +89% H₂O

TIII= 11% de M.M. + 6% F.E. + 83 % H₂O

T= Testigo (sin tratamiento)

Donde:

TI= Tratamiento 1

TII=Tratamiento 2

TIII=Tratamiento 3

T=Testigo

M.M.=Microorganismos de montaña

F.E.=Fuente energética

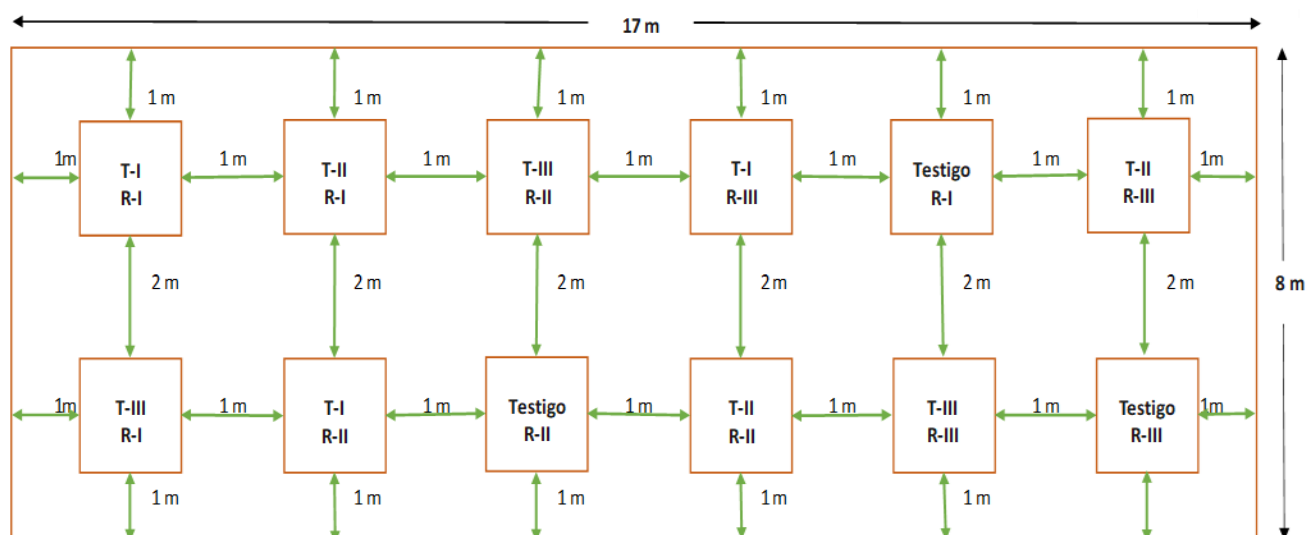
H₂O=Agua

Cada tratamiento representa una combinación específica de ingredientes, con diferentes proporciones de microorganismos de montaña líquidos, fuente energética y agua. Estas variaciones se aplican con el fin de evaluar su impacto en el proceso de compostaje y determinar cuál es la combinación más efectiva para la obtención de compost de calidad en menor tiempo.

Croquis del diseño experimental.

El croquis del diseño experimental para la elaboración del compost es:

Figura 3-4 Croquis del Diseño Experimental



Fuente: Elaboración propia

Donde:

TI-RI = Tratamiento 1 - Repetición 1

TI-RII = Tratamiento 1 - Repetición 2

TI-RIII = Tratamiento 1 - Repetición 3

TII-RI = Tratamiento 2 - Repetición 1

TII-RII = Tratamiento 2 - Repetición 2

TII-RIII = Tratamiento 2 - Repetición 3

TIII-RI = Tratamiento 3 - Repetición 1

TIII-RII = Tratamiento 3 - Repetición 2

TIII-RIII = Tratamiento 3 - Repetición 3

T-RI= Testigo - Repetición 1

T-RII= Testigo - Repetición 2

T-RIII=Testigo - Repetición 3

3.5. Descripción de la Materia Prima (Residuos Orgánicos)

Los Residuos Orgánicos presentan las siguientes características:

3.5.1. *Propiedades físicas*

- **Textura y Tamaño:** Los residuos orgánicos pueden presentar una diversidad de texturas y tamaños, que van desde partículas finas como los residuos de café molido, hasta materiales más grandes y fibrosos como ramas y hojas. Esta variabilidad en la textura y tamaño impacta directamente en cómo se pueden manejar y procesar los residuos, afectando desde la eficiencia del compostaje hasta la selección de equipos y tecnologías adecuadas para su tratamiento.
- **Densidad:** Los residuos orgánicos tienden a tener una densidad baja a media, principalmente debido a su alto contenido de agua. Esta característica los hace más livianos en comparación con otros tipos de residuos, lo cual influye en los costos de transporte y manejo. La baja densidad también facilita su mezcla y homogeneización durante el compostaje y otros procesos de tratamiento, asegurando una distribución uniforme de nutrientes y microorganismos en el material.
- **Porosidad:** La porosidad de los residuos orgánicos es otra propiedad física importante, ya que afecta la capacidad del material para retener agua y aire en el suelo o en los sistemas de compostaje. Una buena porosidad permite una adecuada circulación de aire y agua en el suelo, promoviendo condiciones favorables para el crecimiento de las raíces y la actividad microbiana. En sistemas de compostaje, la porosidad facilita la oxigenación necesaria para los microorganismos aeróbicos responsables de la descomposición de la materia orgánica.

- **Capacidad de Retención de Agua:** Los residuos orgánicos tienen una notable capacidad para retener agua debido a su estructura porosa y alto contenido de materia orgánica. Esta capacidad de retención de agua es beneficiosa tanto en el suelo agrícola como en el compostaje, donde ayuda a mantener la humedad necesaria para el crecimiento de las plantas y para el desarrollo de los microorganismos responsables del proceso de descomposición.
- **Resistencia a la Compactación:** Algunos residuos orgánicos, especialmente aquellos que contienen materiales fibrosos como ramas y tallos, pueden ofrecer resistencia a la compactación del suelo. Esto es beneficioso para mantener la estructura del suelo y prevenir la erosión, proporcionando un entorno favorable para el desarrollo de las raíces y mejorando la aireación del suelo.

3.5.2. *Propiedades químicas*

Las propiedades químicas de los residuos orgánicos juegan un papel fundamental en su manejo y utilización efectiva en diferentes procesos ambientales.

- **pH:** Los residuos orgánicos generalmente presentan un pH que varía de neutro a ligeramente ácido. Este rango de pH es óptimo para muchos procesos biológicos, incluyendo el compostaje y la descomposición microbiana en el suelo. Un pH adecuado promueve condiciones favorables para la actividad microbiana beneficiosa, que es crucial para la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes esenciales para las plantas.
- **Contenido de Carbono y Nitrógeno (C/N):** La relación carbono/nitrógeno es un factor clave en el compostaje y otros procesos de descomposición orgánica. Un equilibrio adecuado entre carbono y nitrógeno es esencial para asegurar una

descomposición efectiva y eficiente de los residuos orgánicos. Idealmente, se busca una relación C/N que favorezca la actividad de microorganismos descomponedores. Los materiales con una relación C/N alta, como la paja y los residuos de madera, pueden ser complementados con materiales más ricos en nitrógeno, como restos de alimentos o estiércol, para alcanzar esta relación óptima.

- **Contenido de Nutrientes:** Los residuos orgánicos son una fuente importante de nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo, potasio y otros micronutrientes. Estos nutrientes están presentes en formas orgánicas que son gradualmente liberadas durante la descomposición de los residuos. Esta liberación controlada y continua proporciona un suministro constante de nutrientes que beneficia el crecimiento de las plantas y mejora la fertilidad del suelo a largo plazo.
- **Actividad Microbiana:** Las propiedades químicas de los residuos orgánicos también influyen en la actividad microbiana en el suelo. Los nutrientes y el pH adecuados estimulan la actividad de microorganismos descomponedores, que son responsables de la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de nutrientes. Esta actividad microbiana es crucial para la salud del suelo y la ciclización de nutrientes en los ecosistemas agrícolas y naturales

3.6. Descripción del Producto (Compost)

La caracterización del compost obtenido de residuos orgánicos involucra evaluar varias propiedades físicas, químicas y biológicas para asegurar su calidad y efectividad como fertilizante orgánico. Aquí te describo los aspectos principales de esta caracterización:

➤ **Aspectos Físicos:**

- Textura: Se evalúa la estructura del compost para determinar su capacidad de retención de agua y aireación.
- Color: Se observa el color del compost, que puede variar desde marrón oscuro a negro, dependiendo de los materiales de partida y el proceso de descomposición.
- Olor: Se verifica que el compost tenga un olor terroso agradable, indicativo de una descomposición completa y ausencia de olores desagradables.

➤ **Aspectos Químicos:**

- pH: Se mide el pH del compost para asegurar que esté dentro del rango adecuado para el crecimiento de las plantas, generalmente entre 6.0 y 8.0.
- Nutrientes: Se analiza la concentración de nutrientes importantes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y otros micronutrientes. Estos nutrientes son cruciales para el crecimiento saludable de las plantas.
- Materia Orgánica: Se determina el contenido de materia orgánica, que es importante para mejorar la estructura del suelo y aumentar su capacidad de retención de agua.

➤ **Aspectos Biológicos:**

- Actividad Microbiana: Se evalúa la presencia y actividad de microorganismos beneficiosos en el compost. Una alta actividad microbiana indica un compost bien madurado y activo.
- Germinación de Semillas: Se realiza una prueba de germinación para verificar la presencia de compuestos fitotóxicos. Un compost de calidad no debe inhibir el crecimiento de las semillas.

- Seguridad y Estabilidad: Contaminantes: Se realiza un análisis para detectar metales pesados y otros contaminantes que puedan estar presentes en el compost.
- Estabilidad: Se evalúa la estabilidad del compost mediante pruebas de respiración o métodos similares para verificar que no se descomponga rápidamente una vez aplicado al suelo.

La caracterización del compost es crucial para asegurar que cumple con los estándares de calidad necesarios para su uso como fertilizante orgánico. Estos análisis garantizan que el compost sea seguro, efectivo y beneficioso para mejorar la salud del suelo y el rendimiento de los cultivos.

CAPÍTULO IV

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Resultados del análisis de la materia prima

La siguiente tabla presenta los resultados del análisis de la materia prima, en este caso, los residuos orgánicos.

Tabla 4-1 Resultado del Análisis de la Materia Prima

Propiedad	Descripción
Composición	Restos de alimentos (frutas, verduras, cáscaras, etc.), podas de jardín, residuos de cocina, residuos de mercado, estiércol animal, etc.
Textura	Variada (partículas pequeñas a medianas dependiendo de la descomposición).
Color	Oscila entre marrón oscuro y negro debido a la descomposición de la materia orgánica.
Olor	Terroso E indicativo de un proceso de compostaje efectivo.
pH	Ligeramente ácido a neutro (6.0 - 7.5), ideal para la mayoría de las plantas.
Nutrientes	Cualitativamente, presenta un alto contenido de nitrógeno (N), moderado en fósforo (P) y potasio (K), junto con otros micronutrientes esenciales para las plantas.
Materia Orgánica	Alto contenido de materia orgánica, mejorando la estructura del suelo y la retención de agua.
Actividad Microbiana	Alta actividad microbiana, indicativa de un compost bien madurado y activo.
Germinación de Semillas	No debe inhibir la germinación de semillas, indicando la ausencia de compuestos fitotóxicos.
Contaminantes	Libre de metales pesados y otros contaminantes, seguro para su uso en agricultura y jardinería.

Fuente: Elaboración propia. 2023

El compost a base de residuos orgánicos está compuesto principalmente por restos de alimentos, podas de jardín, residuos de cocina y mercado. Su textura varía de pequeñas a medianas partículas, con un color que va de marrón oscuro a negro debido a la descomposición.

El pH es ligeramente ácido a neutro (6.0 - 7.5), ideal para plantas. Cualitativamente, contiene alto contenido de nitrógeno, moderado en fósforo y potasio, y otros micronutrientes esenciales. Rico en materia orgánica, mejora la estructura del suelo y retiene agua.

4.2. Resultados del análisis de los microorganismos de montaña

Los resultados del análisis químico y biológico de los microorganismos de montaña líquidos utilizados para el compostaje, se muestran en la siguiente tabla

Tabla 4-2 Resultado del Análisis Químico y Biológico de los Microorganismos de Montaña

Numero	Tipo de análisis	Simbología	Unidad	Resultados
1	pH	pH		4,72
2	Conductividad Eléctrica	C.E.	mmho/cm	5,06
3	Materia Orgánica	M.O.	%	46
4	Humedad %	H%	%	99,62
5	Nitratos (como NO ₃)	NO ₃	mg/Kg o ppm	61,92
6	Nitritos (como NO ₂)	NO ₂	mg/Kg o ppm	0,26
7	Amoniaco	NH ₃	mg/Kg o ppm	0,02
8	Turbiedad	NTU	NTU	256
9	Nitrógeno total	Nt	%	0,8
10	Fosforo	P	mg/Kg o ppm	152,2
11	cenizas	SF%	%	19
12	Solidos volátiles	SV%	%	81
13	Potasio	K	mg/Kg o ppm	27,2
14	Calcio	Ca	mg/Kg o ppm	309
15	Sodio	Na	mg/Kg o ppm	118
16	Magnesio	Mg	mg/Kg o ppm	65,57
17	Mohos	UFC/g	UFC/g	4,00E+04
18	Levaduras	UFC/g	UFC/g	1,00E+04
19	C/N			33,35

Fuente: RIMH. 2023

Este análisis muestra que los microorganismos de montaña en medio líquido tienen un entorno ácido y altamente salino, con una cantidad significativa de materia orgánica y nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo. La elevada relación C/N es indicativa de un medio con un alto contenido de carbono, lo cual puede ser beneficioso para la descomposición de la materia orgánica durante el compostaje

4.3.Resultados del compost

La siguiente tabla muestra los resultados del análisis del producto final, el compost elaborado a partir de residuos orgánicos.

Tabla 4-3 Resultado del Análisis del Compost

PARAMETRO	RESULTADO
Nitrógeno total	1.37%
Fosforo total	0.28%
Potasio total	0.90%
pH	7.53%
C.E.	2.10mS/cm
Materia orgánica	65.33%
Relación C/N	7,62

Fuente: Elaboración propia.2023

El compost elaborado a partir de residuos orgánicos muestra resultados favorables en su análisis. Con un contenido de nitrógeno total de 1.37%, fósforo total de 0.28%, y potasio total de 0.90%, ofrece una composición nutritiva para el crecimiento vegetal. El pH ligeramente alcalino de 7.53 y una alta materia orgánica del 65.33% promueven condiciones óptimas para las plantas, mejorando la estructura del suelo y la retención de agua. Además, la relación C/N de 7.62 indica una descomposición efectiva de los materiales orgánicos, beneficiando la fertilidad del suelo y asegurando su adecuación para aplicaciones agrícolas y de jardinería.

4.4.Rendimiento de compost

A partir del diseño completamente al azar planteado se determina la influencia de las mezclas de microorganismos de montaña presentes en los tratamientos con respecto a las variables respuesta rendimiento y tiempo.

Tabla 4-4 Rendimiento de los Tratamientos Aplicados

Tratamiento	Repetición	Tiempo (días)	Producción (Kg)	Rendimiento (%)
T-I	I	115	838	41,9
	II	115	835	41,75
	III	113	830	41,5
T-II	I	105	845	42,25
	II	106	846	42,3
	III	106	850	42,5
T-III	I	80	885	44,25
	II	82	880	44
	III	80	881	44,05
Testigo	I	120	826	41,3
	II	120	826	41,3
	III	120	826	41,3

Fuente: Elaboración propia, 2023

Durante el proceso experimental de producción de compost, se encontró que el tratamiento más efectivo fue el T-III R-I, que alcanzó su punto óptimo en el día 80 con un rendimiento del 44.25%. En comparación, la muestra de control (testigo) tomó más tiempo, alcanzando su punto máximo en 120 días con un rendimiento del 41.3%.

Los resultados muestran claramente que los tratamientos con mejor rendimiento en las mezclas fueron los del T-III, con rendimientos del 44.25%, 44%, y 44.05%, respectivamente, en un período de aproximadamente 80 días.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4-1, se observa que el tratamiento T-III fue el más exitoso, logrando una producción total de 2646 kg de compost. Esto resalta el potencial del tratamiento T-III, que demostró ser el más efectivo en términos de rendimiento y tiempo.

4.5. Análisis de varianza

4.5.1. Factor de corrección (C)

El factor de corrección (C) se calcula para ajustar los resultados de medición, considerando errores sistemáticos. En este caso, el valor calculado de C es considerablemente alto (8615685), lo cual indica una corrección efectiva de los errores en las mediciones. Este alto valor de C puede mejorar la precisión de los resultados del compostaje al reducir el efecto de los errores sistemáticos, asegurando mediciones más precisas de nutrientes y otros parámetros clave.

Si el valor de C fuera menor, podría indicar que los errores sistemáticos no están siendo corregidos adecuadamente en las mediciones. Esto podría resultar en una menor precisión de los resultados del compostaje, afectando la evaluación de su calidad y composición. Por lo tanto, un valor menor de C podría requerir ajustes adicionales en las técnicas de medición para mejorar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos.

Ecuación 4-1 Factor de Corrección

$$C = \frac{\text{Gram total}^2}{\# \text{ de experimentos}}$$

$$C = \frac{10168^2}{12} = 8615685$$

4.5.2. Suma de cuadrados totales (SCT)

La SCT es fundamental para comprender la extensión de la variación en los datos, permitiendo evaluar cómo los factores específicos y el error contribuyen a la variabilidad total observada en el compostaje. Se detalla a continuación:

Ecuación 4-2 Suma de cuadrados totales

$$SCT = (a^2 + b^2 + \dots x^2) - C$$

$$SCT = (838^2 + 835^2 + \dots 826^2) - C = 8621224 - C = 5539$$

4.5.3. Suma de cuadrados de los tratamientos (SCV)

La SCV proporciona una medida clara de cómo los tratamientos específicos afectan la variable medida en el experimento, permitiendo así identificar cuáles factores son más influyentes y efectivos en el estudio las cuales se detallan a continuación:

Ecuación 4-3 Suma de cuadrado de los tratamientos

$$SCV = \left(\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}{\# \text{ de repeticiones}} \right) - C$$

$$SCV = \left(\frac{2503^2 + 2541^2 + 2646^2 + 2478^2}{3} \right) - C = 5478,3$$

4.5.4. Suma de cuadrados del error (SCE)

Una SCE baja indica que los tratamientos están explicando la mayor parte de la variabilidad observada, lo cual es positivo ya que indica que los tratamientos tienen un efecto significativo y consistente en la variable medida.

Ecuación 4-4 Suma de cuadrados del error

$$SCE = SCT - SCV$$

$$SCE = 5539 - 5478,3 = 60,7$$

4.5.5. Grados de libertad (gl)

Los grados de libertad proporcionan un marco estadístico sólido para evaluar la importancia de los tratamientos analizados, asegurando así la fiabilidad y validez de las conclusiones derivadas del estudio, para lo cual se procede al cálculo de los grados de libertad para el numero de tratamiento y experimentos, mismos que se detallan a continuación:

Ecuación 4-5 Grados de libertad

$$gl = \# \text{ de tramientos} - 1$$

$$gl = 4 - 1 = 3$$

$$gl = \# \text{ de los experimentos} - 1$$

$$gl = 12 - 1 = 11$$

$$gl = gl \text{ del error} - gl \text{ de la variedad}$$

$$gl = 11 - 3 = 8$$

4.5.6. Cuadrados medios (CM)

Los Cuadrados Medios son esenciales en el ANOVA para analizar la distribución de la variabilidad y determinar la significancia estadística de los efectos de los tratamientos. Por ejemplo, el Cuadrado Medio entre grupos (1826.1 en este caso) y el Cuadrado Medio dentro de los grupos (7.51) son utilizados para evaluar si las diferencias observadas entre los tratamientos son estadísticamente significativas. Las cuales se detallan a continuación:

Ecuación 4-6 Suma de cuadrado

$$CM = \frac{SC}{gl}$$

Cuadrado medio de los experimentos.

$$CM = \frac{5478,3}{3} = 1826,1$$

Cuadrado medio del error.

$$CM = \frac{60,7}{8} = 7,51$$

4.5.7. F calculada (Fc)

La F calculada es esencial en el ANOVA para evaluar la significancia estadística de los efectos de los tratamientos en un experimento, proporcionando una herramienta crucial para determinar la presencia de diferencias significativas entre los grupos analizados y se detalla a continuación:

Ecuación 4-7 F calculada

$$Fc = \frac{CM \text{ de los trat.}}{CM \text{ del error}}$$

$$F_c = \frac{1826,1}{7,51} = 243,15$$

F tablas (Ft) este dato se encuentra tabulado ver Anexo 3

Ft= 4,066

4.5.8. Resultados del Análisis de Varianza

De acuerdo a los cálculos realizados, se obtuvieron los siguientes resultados del análisis de varianza, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 4-5 Análisis de Varianza

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculado	F de tablas
Variedad	3	5478,3	1826,1	243,15	4,066*
Error	8	60,7	7,51		
Total	11	5539			

Fuente: Elaboración propia,2023

4.5.9. Prueba de tukey

En la prueba realizada se obtuvo lo siguiente:

Ecuación 4-8 Prueba de Tukey

$$T = q \times \sqrt{\frac{CME}{r}}$$

Donde:

T= Tukey

q= Dato de tablas

CME= Cuadrado medio del error

r= Numero de repeticiones

$$T = 4,04 \times \sqrt{\frac{7,51}{3}} = 6,39$$

La Tabla 4-6 detalla el promedio del rendimiento obtenido en cada uno de los tres tratamientos. Esta información nos brinda una comprensión más completa de cómo se desempeñan individualmente los tratamientos en términos de rendimiento. Al analizar estos promedios, podemos identificar tendencias significativas y tomar decisiones fundamentadas basadas en el desempeño relativo de cada tratamiento.

En resumen, la tabla nos proporciona una visión detallada que facilita la interpretación y la toma de decisiones en relación con los resultados obtenidos en el experimento.

Tabla- 4-6 Rendimiento por tratamiento

Tratamientos	Repetición I (Kg)	Repetición II (Kg)	Repetición III (Kg)	\sum <i>Tratamientos</i> (Kg)	Promedio trat. (Kg)
TI	838	835	830	2503	834,33
TII	845	846	850	2541	847
TIII	885	880	881	2646	882
Testigo	826	826	826	2478	826
Gram total				10168	

Fuente: Elaboración propia,2023

Con el valor de T calculado previamente y los promedios de cada tratamiento, se procede a realizar las comparaciones entre los tratamientos.

La diferencia entre el tratamiento 3 (TIII) y el Testigo (T) arroja valores de 882-826 que da como resultado 56, con el valor calculado de tukey (T), hacemos una comparación $56 > 6,39$ y se observa que existe una diferencia significativa entre estos tratamientos.

Asimismo, la diferencia entre el Tratamiento II (TII) y el Testigo (T) con valores de 847-826 da como resultado 21 comparado con el valor de tukey (T), $21 > 6,39$, lo que también señala una diferencia significativa. Pero entre los TI y Testigo I con valores de $834,33 - 826 = 8,33$ comparado con el valor de T, $8,33 > 6,39$ continúa existiendo una diferencia significativa.

4.6. Control de los parámetros en el proceso de compostaje al diagrama

4.6.1. Control de temperatura.

Durante los días que se realizó la parte experimental se registraron bajas temperaturas, esto a causa del descenso de temperatura ocasionado por los cambios climáticos.

4.6.1.1. Temperatura máxima

La tabla muestra las temperaturas máximas registradas para cada repetición de los diferentes tratamientos, así como para el grupo de control (Testigo)

Tabla 4-7 Temperaturas Máximas de los Tratamientos

Tratamientos	Repetición I (°C)	Repetición II (°C)	Repetición III (°C)
TI	58,3	58,2	57
TII	58,8	57	58,2
TIII	65	64	62,3
Testigo	56	56	56

Fuente: Elaboración propia, 2023

Análisis de varianza de la temperatura máxima en el compostaje

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 4-8 Análisis de Varianza de la Temperatura Máxima

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculado	F de tablas
Variedad	3	102,127	34,042	42,201	4,066*
Error	8	6,453	0,807		
Total	11	108,58			

Fuente: Elaboración propia, 2023

Prueba de tukey para la temperatura máxima

Tabla 4-9 Prueba de Tukey para la Temperatura Máxima de los Tratamientos

tukey= 0,050			
Orden original		Orden clasificado	
TI	B	TIII	A
TII	B	TII	B
TIII	A	TI	B
Testigo	B	Testigo	B

Fuente: Elaboración propia,2023

4.6.1.2.Temperatura promedio

Los datos recolectados durante el proceso de compostaje revelaron variaciones en las temperaturas en cada uno de los tratamientos. En la Tabla 4-10 se detalla la temperatura promedio registrada para cada tratamiento, presentada a continuación:

Tabla 4-10 Temperaturas Promedio de los Tratamientos

Tratamiento	Repetición I (°C)	Repetición II (°C)	Repetición III (°C)
TI	29	29	29,72
TII	31,3	31,4	29,64
TIII	36,1	35,3	35,8
Testigo	27,56	27,56	27,56

Fuente: Elaboración propia,2023

Tabla 4-11 Análisis de la Varianza de la Temperatura Promedio de los Tratamientos

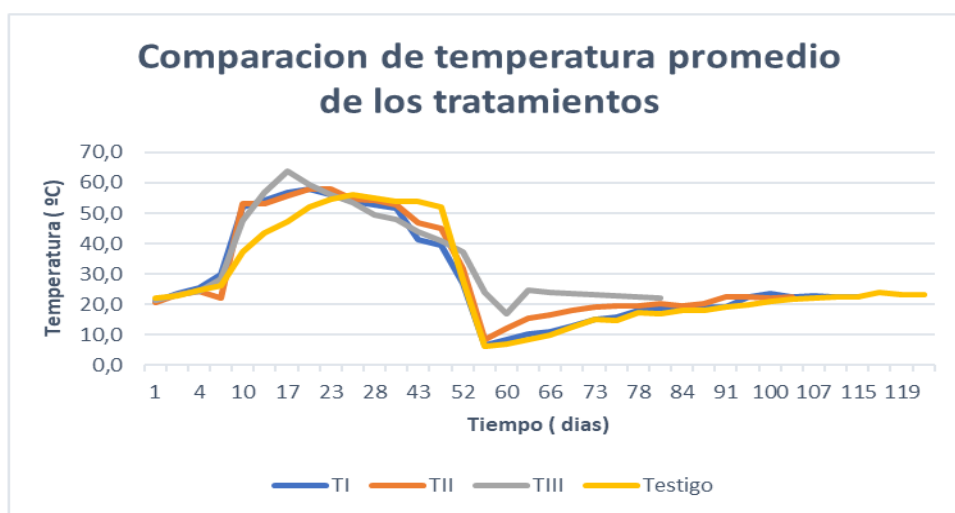
Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculado	F de tablas
Variedad	3	111,798	37,266	113,501	4,066*
Error	8	2,627	0,328		
Total	11	114,425			

Fuente: Elaboración propia,2023

Tabla 4-12 Prueba de Tukey de la Temperatura Promedio de los Tratamientos

tukey $\alpha= 0,050$			
Orden original		Orden clasificado	
TI	C	TIII	A
TII	B	TII	B
TIII	A	TI	C
Testigo	D	Testigo	D

Fuente: Elaboración propia,2023

Figura 4-1 Comparación de Temperaturas Promedio de cada Tratamiento

Fuente: Elaboración propia,2023

4.6.2. Control del pH en los tratamientos

4.6.2.1. pH máximo

Durante el proceso de compostaje, se observaron valores alcalinos en los diferentes tratamientos. Estos datos son fundamentales para entender la evolución de las condiciones químicas a lo largo del compostaje y su influencia en la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica

Esta tabla ofrece una visión detallada de cómo varían los valores de pH entre los diferentes tratamientos y repeticiones.

Tabla 4-13 pH Máximo de los Tratamientos

Tratamiento	Repetición I	Repetición II	Repetición III
TI	7,7	7,8	7,7
TII	7,9	7,8	7,8
TIII	7,6	7,7	7,7
Testigo	7,8	7,8	7,8

Fuente: Elaboración propia,2023

Tabla 4-14 Análisis de Varianza del pH Máximo de los Tratamientos

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculado	F de tablas
Variedad	3	0,049	0.016	6.556	4,066*
Error	8	0,02	0,003		
Total	11	0,069			

Fuente: Elaboración propia,2023

Tabla 4-15 Prueba de Tukey del pH Máximo de los Tratamientos

tukey $\alpha= 0,050$			
Orden original		Orden clasificado	
TI	AB	TIII	A
TII	A	TII	AB
TIII	B	TI	AB
Testigo	AB	TIV	B

Fuente: Elaboración propia.2023

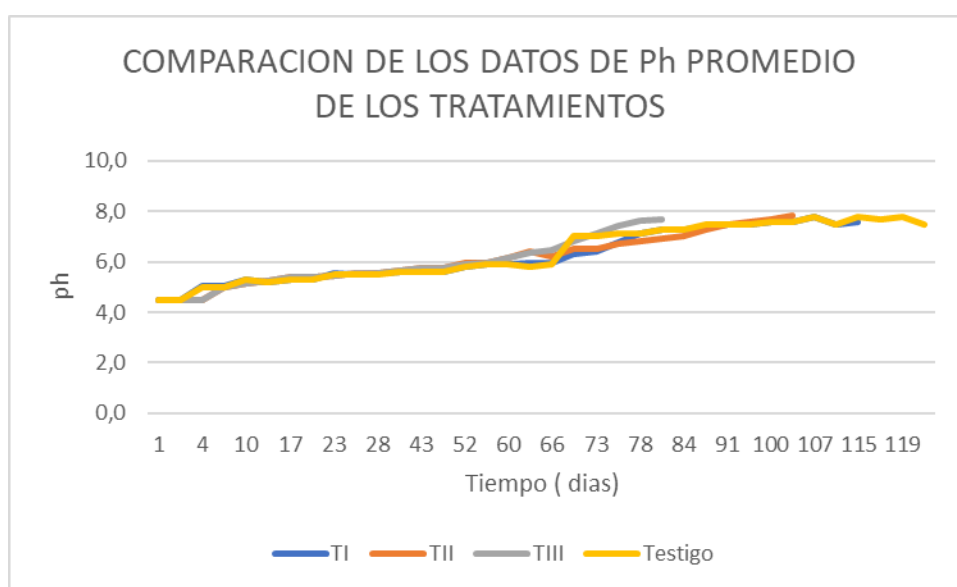
4.6.2.2.pH promedio

Los tratamientos presentaron una variabilidad en los valores promedio de pH, que oscilaron entre 5.86 y 6.35, como se detalla en la Tabla 4-14 a continuación. Esta variación en los niveles de pH refleja la diversidad en las condiciones químicas durante el proceso de compostaje en cada tratamiento.

Tabla 4-16 pH Promedio de los Tratamientos

Tratamiento	Repetición I	Repetición II	Repetición III
TI	6,22	6,2	6,2
TII	6,06	6,05	6,07
TIII	5,87	5,88	5,86
Testigo	6,35	6,35	6,35

Fuente: Elaboración propia.2023

Figura 4-2 Comparación de pH Promedio de los Tratamientos

Fuente: Elaboración propia,2023

4.6.3. Control de la Humedad

4.6.3.1. Humedad máxima

Durante el proceso de compostaje, nos encontramos con desafíos significativos que afectaron su progreso, principalmente relacionados con condiciones climáticas adversas. Las bruscas caídas de temperatura interrumpieron el proceso de descomposición, impidiendo así la aplicación regular del riego necesario para un desarrollo óptimo del compost. Esta situación resultó en una recolección mínima de datos, lo cual se refleja en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17 Humedad Máxima de los Tratamientos

Tratamiento	Repetición I (%)	Repetición II (%)	Repetición III (%)
TI	44	42	42
TII	42	44	43,3
TIII	42,5	40	42,2
Testigo	42,4	42,4	42,4

Fuente: Elaboración propia.2023

Tabla 4-18 Análisis de Varianza de la Humedad máxima de los tratamientos

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculado	F de tablas
ad	3	3,75	1,2	1,1	4,0
Error	8	8,45	1,0		
Total	11	53			

Fuente: Elaboración propia.2023

Tabla 4-19 Prueba de tukey de la Humedad Máxima de los Tratamientos

tukey $\alpha= 0,050$			
Orden original		Orden clasificado	
TI	A	TIII	A
TII	A	TII	A
TIII	A	TI	A
Testigo	A	Testigo	A

Fuente: Elaboración propia.2023

4.7. Balance de materia

4.7.1. Balance de materia de los Microorganismos de Montaña.

4.7.1.1. Balance del tamizado

Durante el proceso de tamizado, se logra eliminar aproximadamente el 60% de las hojarascas de churqui recolectadas. Este proceso separa las hojas en partículas de menor tamaño, como polvo, y en partículas de mayor tamaño, como ramas y piedras.

$$P = H * P_p$$

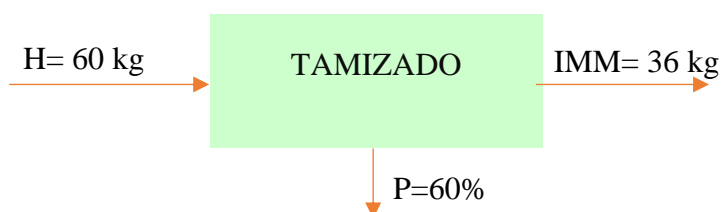
Donde:

H= Hojarascas de churqui

IMM= Inóculo de Microorganismos de Montaña

P= Perdida de churqui

P_p= Porcentaje de perdida



Balance de la pérdida del churqui

$$P = 60 \text{ kg} * 0,40$$

$$P = 24 \text{ kg}$$

Balance de IMM

$$H = P + IMM$$

$$IMM = H - P$$

$$IMM = 60 \text{ kg} - 24 \text{ kg}$$

$$IMM = 36 \text{ kg de inocuo de M.M.}$$

El cálculo estimado del tamizado de inóculo de Microorganismos de Montaña es 36 kg.

4.7.1.2. Balance de materia de los Microorganismos de Montaña Sólidos.

Para la pérdida de mezcla se consideró el 1%, también para la reproducción de Microorganismos Montaña se tomó como pérdida el 1% que incluye el polvo y solidos dispersos.

HA= Harina de arroz

MMS= Microorganismos de Montaña Solidos

IMM= Inóculo de Microorganismos de Montaña

PM= Perdida de mezcla

MH₂O= Masa de agua

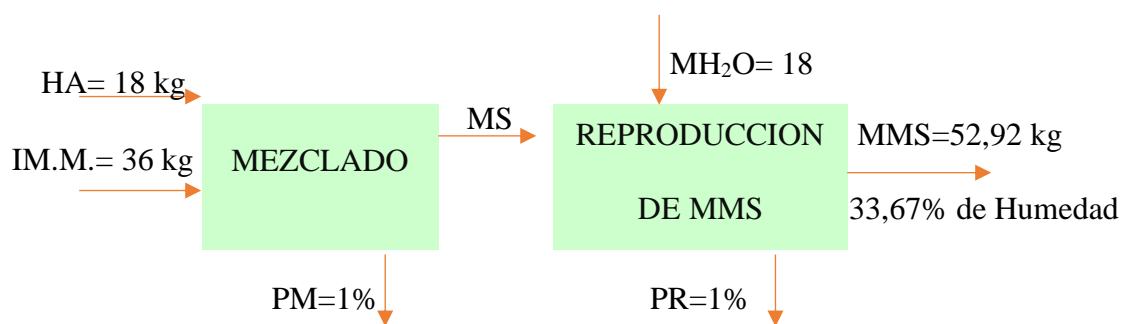
MS= Masa seca

M= Melaza

H₂O= Agua

H= Humedad

Pp= Porcentaje de perdida



$$MS = HA + IMM$$

$$MS = 18 \text{ kg} + 36 \text{ kg}$$

$$MS = 54 \text{ kg} * 0,99$$

$MS = 53,46$ kg de masa seca

Balance para la producción de MMS

$$MH_2O = M + H_2O$$

$$MH_2O = 3,7854 + 14,2146$$

$$MH_2O = 18 \text{ l de agua}$$

$$H = \left(\frac{MH_2O}{MS} \right) * 100$$

$$H = \left(\frac{18}{53,46} \right) * 100$$

$$H = 33,67\%$$

$$MMS = MS * Pp$$

$$MMS = 53,46 * 0,99$$

$$MMS = 52,93 \text{ kg de MMS}$$

Con la mezcla de proteínas, inóculo y una fuente energética se obtuvo un valor de 52,93 kg de MMS con una humedad del 33,67% las cuales serán utilizadas como sustrato.

4.7.1.3. Balance de materia de la activación de Microorganismos de Montaña líquidos.

En esta fase utilizamos el valor calculado de los MMS y tomamos como pérdida de un 10 % que se repartirá entre la disolución de los sólidos y pérdidas externas del manejo de los materiales.

EMMS= Entrada de Microorganismos de Montaña sólidos

PMMS= Pérdidas de los Microorganismos de Montaña sólidos

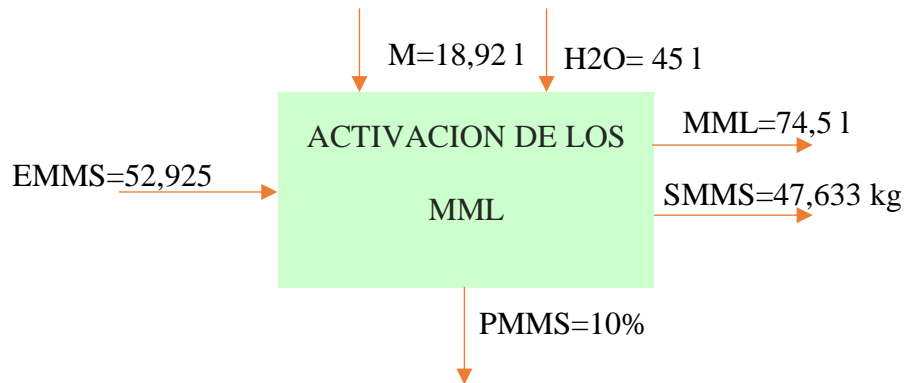
SMMS= Salida de los Microorganismos de Montaña sólidos

M= Melaza

H₂O= Agua

MML= Microorganismos de Montaña líquidos

Pp=Porcentaje de perdida



$$SMMS = EMMS * Pp$$

$$SMMS = 52,925 \text{ kg} * 0,90$$

$$SMMS = 47,633 \text{ kg de MMS}$$

Balance de perdida

$$EMMS = PMMS - SMMS$$

$$PMMS = EMMS - SMMS$$

$$PMMS = 52,925 \text{ kg} - 47,633 \text{ kg}$$

$$PMMS = 5,293 \text{ kg}$$

Balance de los MML

$$MML = M + H2O + PMMS$$

$$MML = 18,92 + 45 + 5,293$$

$$MML = 69,213 \text{ L de MML}$$

Se produjeron 69,213 litros de microorganismos de montaña líquidos (MML), los cuales se distribuirán en dosis de 3 litros, 7 litros y 11 litros para cada tratamiento y sus respectivas repeticiones

4.7.2. Balance de materia del proceso de compostaje.

Para el balance de materia del proceso se tomaron los valores promedios de los diferentes tratamientos y del testigo.

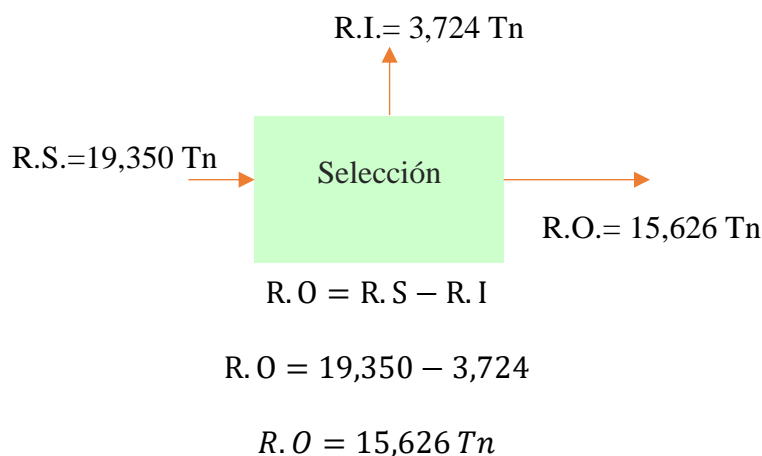
4.7.2.1. Balance de los residuos orgánicos

Los residuos orgánicos recolectados por el camión de la basura y la mercancía de contrabando proporcionada por la aduana fueron recepcionados y pesados, dando un total de 19,350 toneladas de residuos sólidos.

R. S= Residuos solidos

R.O.=Residuos orgánicos

R. I=Residuos inorgánicos



Los resultados del balance muestran un total de 15,626 toneladas. Estas serán distribuidas entre las 12 pilas de compostaje, asignando 1300 kg a cada una.

4.7.2.2. Balance de materia para el Tratamiento I

MO= Materia Orgánica

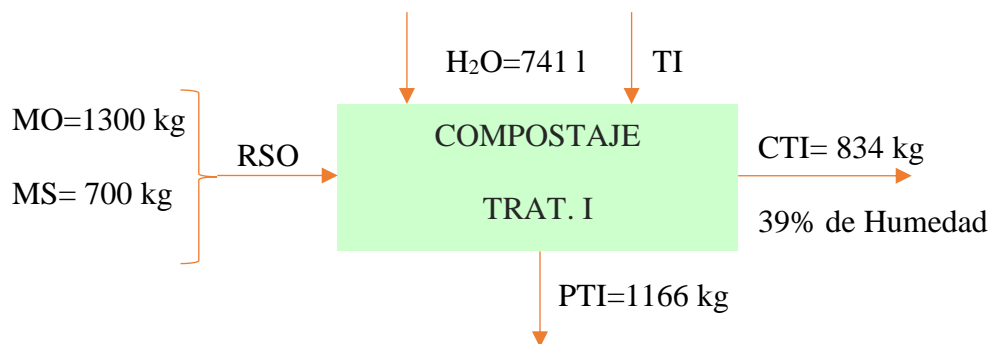
MS=Materia Seca

RSO= Residuos Sólidos Orgánicos

TI= Tratamiento I

PTI= Perdida del Tratamiento I

CTI= Compost del Tratamiento I



$$TI = MML + M + H2O$$

$$TI = 3l + 2l + 95l$$

$$TI = 100 \text{ l del trat. I}$$

$$RSO = MO + MS$$

$$RSO = 1300 \text{ kg} + 700 \text{ kg}$$

$$RSO = 2000 \text{ kg de RSO}$$

$$MS = RSO - TI$$

$$MS = 2000 \text{ kg} - 100 \text{ kg}$$

$$MS = 1900 \text{ kg de masa seca}$$

$$H = \left(\frac{MH2O}{MS} \right) * 100$$

$$MH2O = \left(\frac{H * MS}{100} \right)$$

$$MH2O = \left(\frac{39 * 1900}{100} \right)$$

$$MH2O = 741 \text{ l de agua}$$

Balance de la perdida

$$PTI = RSO * Pp$$

$$PTI = 2000 \text{ kg} * 0,583$$

$$PTI = 1166 \text{ kg}$$

Balance de la obtención de compost del T-I

$$RSO = PTI - CTI$$

$$CTI = RSO - PTI$$

$$RSO = 2000 \text{ kg} - 1166 \text{ kg}$$

$CTI = 834 \text{ kg de compost}$

4.7.2.3. Balance de materia para el Tratamiento II

MO= Materia Orgánica

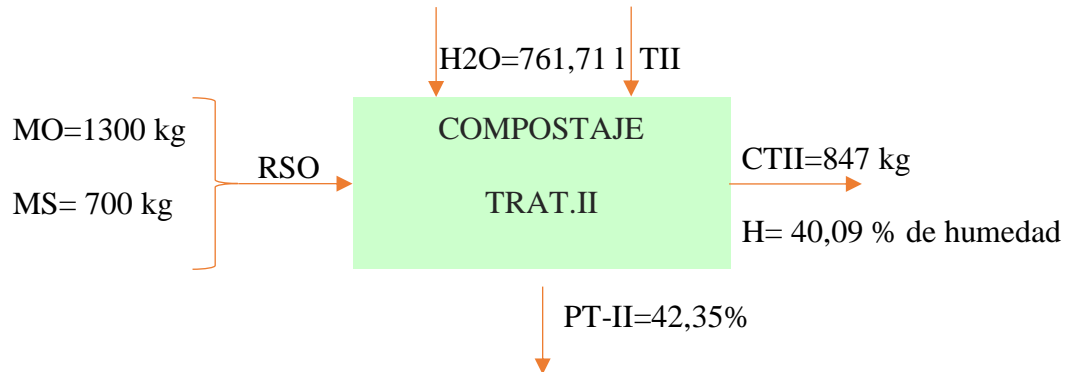
MS=Materia Seca

RSO= Residuos Sólidos Orgánicos

TII= Tratamiento II

PTII= Perdida del Tratamiento II

CTII= Compost del Tratamiento II



$$TII = MML + M + H2O$$

$$TII = 7l + 4l + 89l$$

$$TII = 100 \text{ l del trat. II}$$

$$RSO = MO + MS$$

$$RSO = 1300 \text{ kg} + 700 \text{ kg}$$

$$RSO = 2000 \text{ kg de RSO}$$

$$MS = RSO - TII$$

$$MS = 2000 \text{ kg} - 100 \text{ kg}$$

$$MS = 1900 \text{ kg de masa seca}$$

$$H = \left(\frac{MH2OTII}{MS} \right) * 100$$

$$MH2OTII = \left(\frac{HTII * MS}{100} \right)$$

$$MH2OTII = \left(\frac{40,09 * 1900}{100} \right)$$

$$MH2OTII = 761,7 \text{ l de agua}$$

Balance de la perdida

$$PTII = RSO * Pp$$

$$PTII = 2000 \text{ kg} * 0,5765$$

$$PTII = 1153kg$$

Balance de la obtención de compost del T-II

$$RSO = PTII - CTII$$

$$CTII = RSO - PTII$$

$$RSO = 2000 kg - 1153kg$$

$$CTII = 847 kg \text{ de compost}$$

4.7.2.4. Balance de materia para el Tratamiento III

MO= Materia Orgánica

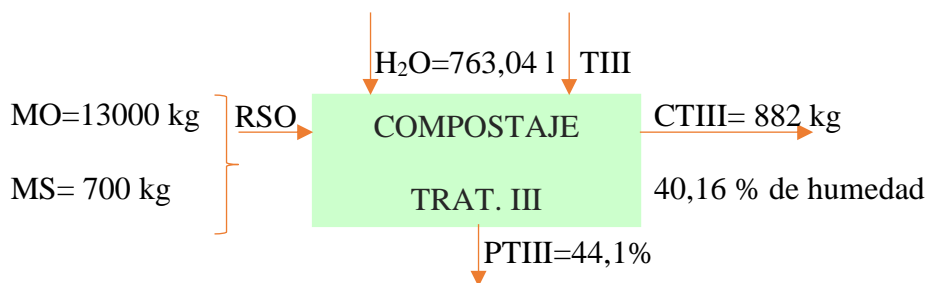
MS=Materia Seca

RSO= Residuos Sólidos Orgánicos

TIII= Tratamiento III

PTIII= Perdida del Tratamiento III

CTIII= Compost del Tratamiento III



$$TIII = MML + M + H2O$$

$$TIII = 11l + 6l + 83l$$

$$TIII = 100 l \text{ del trat. III}$$

$$RSO = MO + MS$$

$$RSO = 1300 kg + 700 kg$$

$$RSO = 2000 kg \text{ de RSO}$$

$$MS = RSO - TIII$$

$$MS = 2000 \text{ kg} - 100 \text{ kg}$$

$$MS = 1900 \text{ kg de masa seca}$$

$$HTIII = \left(\frac{MH2OTIII}{MS} \right) * 100$$

$$MH2OTIII = \left(\frac{HTIII * MS}{100} \right)$$

$$MH2OTIII = \left(\frac{40,16 * 1900}{100} \right)$$

$$MH2OTIII = 763,04 \text{ l de agua}$$

Balance de la perdida

$$PTIII = RSO * Pp$$

$$PTI = 2000 \text{ kg} * 0,559$$

$$PTI = 1118 \text{ kg}$$

Balance de la obtención de compost del T-III

$$RSO = PTIII - CTIII$$

$$CTIII = RSO - PTIII$$

$$RSO = 2000 \text{ kg} - 1118 \text{ kg}$$

$$CTIII = 882 \text{ kg de compost}$$

4.7.2.5. Balance de materia para el Testigo

MO= Materia Orgánica

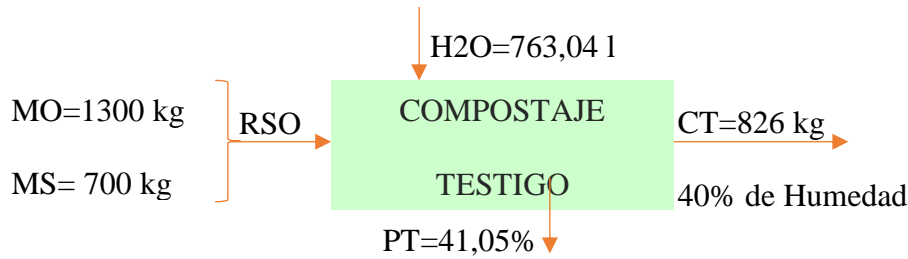
MS=Materia Seca

RSO= Residuos Sólidos Orgánicos

T= Testigo

PT= Perdida del Testigo

CT= Compost del Testigo



$$RSO = MO + MS$$

$$RSO = 1300 \text{ kg} + 700 \text{ kg}$$

$$RSO = 2000 \text{ kg de RSO}$$

$$HT = \left(\frac{MH2OT}{MS} \right) * 100$$

$$MH2OT = \left(\frac{HT * MS}{100} \right)$$

$$MH2OT = \left(\frac{40 * 1900}{100} \right)$$

$$MH2O = 800 \text{ l de agua}$$

Balance de la perdida

$$PT = RSO * Pp$$

$$PT = 2000 \text{ kg} * 0,5895$$

$$PT = 1174 \text{ kg}$$

Balance de la obtención de compost del T

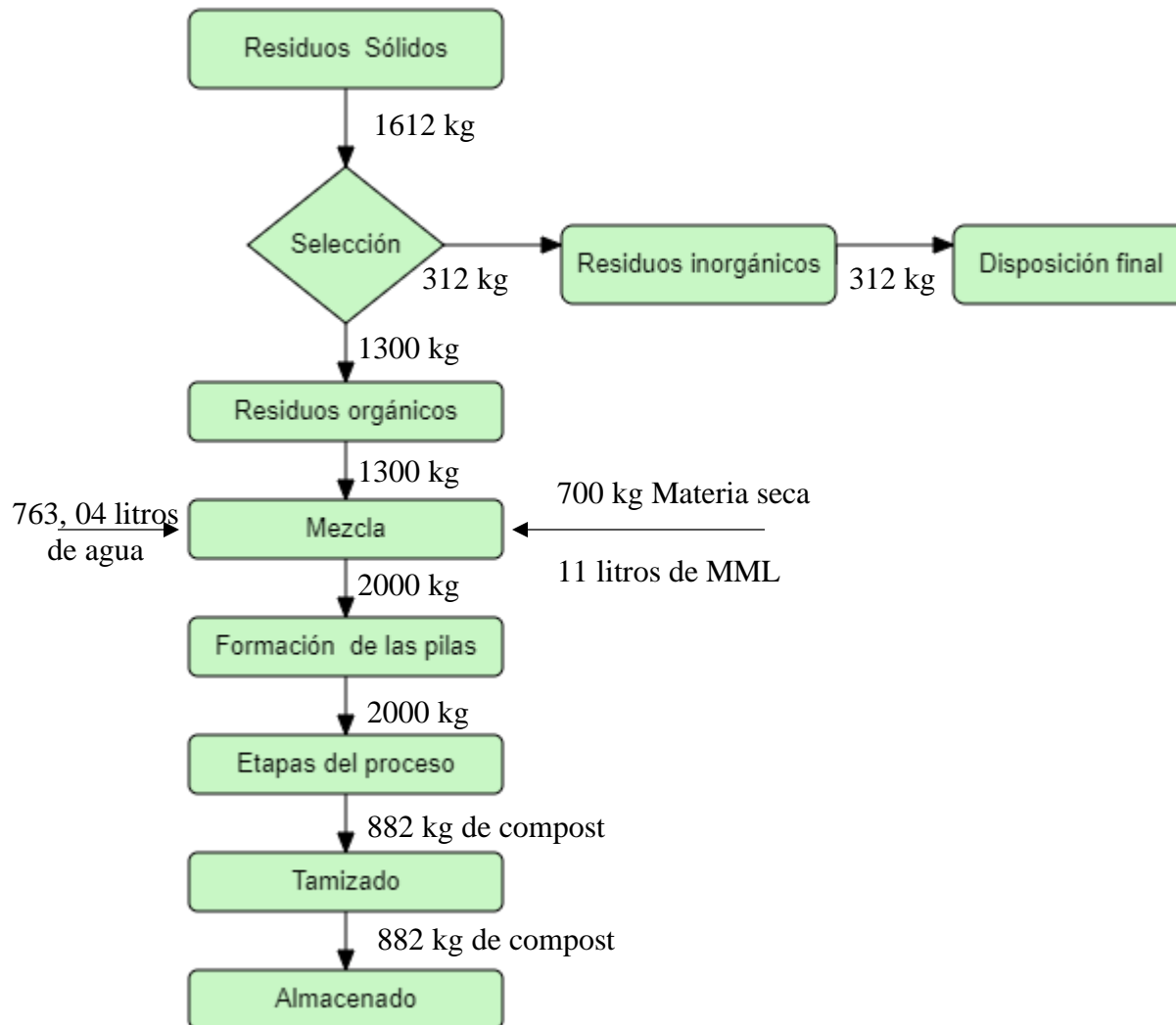
$$RSO = PT - CT$$

$$CT = RSO - PT$$

$$RSO = 2000 \text{ kg} - 1174 \text{ kg}$$

$$CTI = \mathbf{826} \text{ kg de compost}$$

Figura 4-3 Diagrama del Balance general para el Proceso de Compostaje a partir de Residuos Organicos



Fuente: Elaboración propia.2023

CAPÍTULO V

5. Costos del proyecto de investigación

5.1. Determinación de costos de producción

A fin de conocer los costos involucrados en la realización del presente proyecto de investigación se detalla a continuación los insumos, equipos, materiales, análisis, mano de obra y otros empleados en la obtención del compost.

5.1.1. Detalle del costo para la elaboración de microorganismos de montaña.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	Harina de arroz	Kg	25	12,5	312,5
2	Melaza	Gal	8	7	56
3	Hojasca de montaña	Kg	50	1	50
Total				Bs.418,5	

Fuente: Elaboración propia.2023

5.1.2. Detalle del costo de materiales.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	Tambo de 140	L	1	150	220
2	Tambo 60	L	1	220	120
3	Manguera	m	46	5	230
4	Valdés		5	20	100
5	Saquillos		48	5	240
6	Frascos de vidrio		12	4	48
7	Carteles		12	6	72
Total				Bs. 1060	

Fuente: Elaboración propia,2023

5.1.3. Detalle del costo de análisis de laboratorio de los microorganismos de montaña.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	pH		1	8,5	8,5
2	Conductividad eléctrica	mmho/cm	1	17	17
3	Materia Orgánica	%	1	25,5	25,5
4	humedad %	%	1	25,5	25,5
5	Nitratos (como NO3)	mg/Kg o ppm	1	50,9	50,9
6	Nitritos (como NO2)	mg/Kg o ppm	1	50,9	50,9
7	Amoniaco	mg/Kg o ppm	1	30	30
8	Turbiedad	NTU	1	20	20
9	Nitrógeno total	%	1	40	40
10	Fosforo	mg/Kg o ppm	1	34	34
11	cenizas	%	1	85	85
12	Solidos volátiles	%	1	85	85
13	Potasio	mg/Kg o ppm	1	34	34
14	Calcio	mg/Kg o ppm	1	21	21
15	Sodio	mg/Kg o ppm	1	34	34
16	Magnesio	mg/Kg o ppm	1	21	21
17	Mohos	UFC/g	1	200	200
18	Levaduras	UFC/g	1	200	200
19	C/N		1	48	48
Total				Bs. 1030	

Fuente: Elaboración propia,2023

5.1.4. Detalle del costo de análisis de laboratorio del compost.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	pH	análisis	1	29	29
2	Conductividad eléctrica	análisis	1	29	29
3	Materia Orgánica	análisis	1	48	48
4	Nitrógeno total	análisis	1	59	59
5	Fosforo Total	análisis	1	48	48
6	Potasio Total	análisis	1	45	45
7	Relación C/N	análisis	1	48	48
Total					Bs. 306

Fuente: Elaboración propia,2023

5.1.5. Detalle del costo de otros servicios

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	Transporte	Pasaje	20	30	600
2	Mano de obra	Jornal	6	50	300
3	Internet	Mes	6	169	1014
4	Impresión	Hoja	1800	0,2	360
5	Anillados	Anillado	9	4	36
6	Empastados	Empastado	3	50	150
Total					Bs. 2460

Fuente: Elaboración propia.2023

5.1.6. Detalle de los costos totales

Costos totales	Total Bs.
Costos para la elaboración de M.M.	418,5
Costo de materiales.	1060
Costos de análisis de laboratorio de los M.M.	1030
Costos de análisis de laboratorio del compost.	360
Costos de otros servicios	2460
COSTOS TOTALES	Bs. 5328,5

Fuente: Elaboración propia,2023

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En el presente estudio, se demostró de manera efectiva la reducción significativa del tiempo de compostaje de residuos orgánicos en el Municipio de Villazón mediante el uso de microorganismos de montaña. Este avance permitió disminuir el periodo de compostaje de 120 días a 80 días, destacando la eficacia de esta técnica para acelerar y optimizar el proceso. Estos resultados no solo representan un avance en términos de eficiencia operativa, sino también un paso adelante hacia prácticas sostenibles de gestión de residuos en el Municipio.

Se realizó la reproducción y activación exitosa de los microorganismos de montaña, además de llevar a cabo los estudios químicos y biológicos de estos como aceleradores biológicos en el proceso de compostaje

Los resultados mostraron un impacto significativo en el producto final, el compost. Un hallazgo notable fue la conductividad eléctrica de 5.06 mmho/cm de los microorganismos, lo que indica una concentración elevada de sales que podría afectar la actividad y salud de estos microorganismos. En el compost final, el análisis realizado por el Laboratorio de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho reveló una conductividad eléctrica de 2.10 mmho/cm, sugiriendo la presencia de un posible problema salino. Además, el compost presentó un pH de 7.53, clasificado como moderadamente alcalino.

El análisis de los microorganismos de montaña también mostró un contenido de materia orgánica del 46%, un nitrógeno total del 0.800%, un fósforo de 15.20 ppm y un potasio de 27.0 ppm. Estos valores son favorables para el compostaje. Un alto contenido de materia orgánica es crucial para la descomposición eficiente, ya que proporciona la base para la actividad

microbiana. El nitrógeno total del 0.800% es adecuado para mantener el equilibrio necesario para la síntesis de proteínas microbianas.

Además, se observó un recuento de placa de mohos de 40,000 UFC/g y de levaduras de 10,000 UFC/g en los microorganismos de montaña líquidos utilizados. Estos resultados indican una actividad microbiana saludable y eficaz, con mohos descomponiendo materiales orgánicos complejos y levaduras procesando azúcares simples, contribuyendo así a la aceleración del compostaje.

Los análisis químicos de los microorganismos de montaña mostraron una relación C/N de 33.35, lo cual indica un material inicial con un contenido de carbono relativamente alto en comparación con el nitrógeno, sugiriendo que estos microorganismos pueden contribuir a un proceso de descomposición equilibrado. Al finalizar el proceso de compostaje, el compost resultante presentó una relación C/N de 27.62, lo que indica una mineralización lenta según el método de Granulometría. Esto es positivo, ya que sugiere una liberación gradual de nutrientes, lo que es beneficioso para el suelo a largo plazo.

Al comparar el tratamiento más efectivo (TIII-RI) con la muestra testigo, se observó un rendimiento del 44.25% en 80 días, produciendo un total de 885 kg de compost. En contraste, la muestra testigo, que no recibió la incorporación de microorganismos de montaña, alcanzó un rendimiento del 41.3% en 120 días, con un total de 826 kg de compost

6.2.Recomendaciones

Se recomienda identificar alternativas para promover el uso del compost y valorizarlo, considerando sus valiosas propiedades nutritivas como abono orgánico derivado de residuos sólidos orgánicos. El compost tiene un potencial significativo para generar recursos económicos y contribuir a prácticas sostenibles de manejo de residuos.

Los resultados obtenidos subrayan la importancia de controlar los niveles de salinidad y pH durante el proceso de compostaje para asegurar la calidad y efectividad del compost como enmienda del suelo. En general, los valores obtenidos son óptimos para acelerar el proceso de compostaje, aunque se debe prestar atención a la gestión de la salinidad para evitar posibles efectos adversos como reducción de la actividad microbiana, acumulación de sales y alteración en el pH.

Para asegurar la calidad del compost, es fundamental contar con un área de trabajo equipada con acceso a una fuente de agua potable. Esto garantiza un suministro constante de agua, crucial para mantener activos los microorganismos durante el proceso de compostaje y evitar interrupciones que puedan afectar su actividad. Además, el control adecuado de la humedad mediante el suministro de agua facilita una descomposición eficiente y la producción de compost de alta calidad.

