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

TESIS DE GRADO

EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN PILAS DE COMPOSTAJE CON Y SIN AIREACIÓN FORZADA EN LA PLANTA DE COMPOSTAJE DE MALLASA, LA PAZ

Por:

Juan Miguel Huanca Condori

EL ALTO – BOLIVIA

Octubre, 2024

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

EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN PILAS DE COMPOSTAJE CON Y SIN AIREACIÓN FORZADA EN LA PLANTA DE COMPOSTAJE DE MALLASA, LA PAZ

Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo

Juan Miguel Huanca Condori

Asesores:

Ph.D. M.Sc. Lic. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza .....

Lic. Ing. Daniel Condori Guarachi .....

Tribunal Revisor:

M.Sc. Lic. Ing. Diego Orlando Tola Aguilar .....

M.Sc. Lic. Ing. Pastor Condori Mamani .....

Lic. Ing. Teófilo Serrano Canaviri .....

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador .....

DEDICATORIA:

Con el amor y cariño a mis queridos Padres: Dn. Miguel Huanca Flores y Dña. María Ascencia Condori Pajxi, por el constante apoyo, esfuerzo y comprensión, por los valores que me inculcaron: de responsabilidad, honestidad y respeto hacia el prójimo para que mi persona sea un hombre de bien y de buenos principios morales.

A mis queridos hermanos: Gregorio Huanca Condori, Pedro Huanca Condori, Zacarías Huanca Condori, Corina Huanca Condori y Freddy Huanca Condori por brindarme su apoyo moral, e incondicional en todo momento, a Dios por darme una oportunidad, para seguir adelante sin dar un paso atrás y continuar con mi objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo y sincero agradecimiento a Dios por concederme la vida y la oportunidad por haberme guiado por el camino correcto hasta la conclusión de mi carrera profesional.

A la Universidad Pública de el Alto (UPEA) por abrirme sus puertas y poder permitirme mi formación profesional como Ingeniero Agrónomo.

A la carrera de Ingeniería Agronómica y al plantel de catedráticos por la enseñanza impartida durante mi formación profesional.

Mis más sinceros agradecimientos a mis asesores: Ph.D. M.Sc. Lic. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza y Lic. Ing. Daniel Condori Guarachi, por el apoyo en la planificación, conducción, observación, recomendación y orientación profesional durante la ejecución y redacción del presente trabajo de investigación.

A mis tribunales revisores: Lic. Ing. Diego Orlando Tola Aguilar, Lic. Ing. Pastor Condori Mamani, Lic. Ing. Teófilo Serrano Canaviri por sus acertadas recomendaciones y sugerencias durante la realización y redacción del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros y compañeras de la carrera de Ingeniería Agronómica de la (UPEA), por haberme brindado su apoyo y colaboración durante la ejecución del presente trabajo de investigación, y principalmente a Marisabel Santusa Jahuira Garzofino una persona muy especial en mi vida, que estuvo ahí brindándome su apoyo incondicional y moral cuando más lo necesitaba principalmente una persona que fue un gran apoyo para mí, gracias a ti es que continúe con más fuerza para terminar mi tesis.

También agradecerle a una amiga ya colega ing. Miriam Maria Quispe Gómez, por estar ahí de igual manera apoyándome dándome palabras de aliento para seguir y no rendirme ante cualquier cosa, siempre han sido de gran ayuda las palabras y concejos que me diste gracias amiga.

Mi más sincero agradecimiento al Lic. Ing. Diego Orlando Tola Aguilar por el inmenso apoyo, recomendaciones sugerencias durante la realización del presente trabajo de investigación.

Mi más sincero agradecimiento al Lic. Ing. Javier Limachi Chambi por el gran apoyo, moral y sus recomendaciones, sugerencias durante el trabajo de investigación, el cual ayudo mucho para que pueda avanzar y terminar lo más antes posible con la tesis.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS i
ÍNDICE DE CUADROS iv
ÍNDICE DE FIGURAS v
ÍNDICE DE ANEXOS vi
ABREVIATURAS vii
RESUMEN viii
ABSTRACT ix

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Antecedentes 2
1.2. Planteamiento del problema 2
1.3. Justificación 3
1.4. Objetivos 3
1.4.1. Objetivo general 3
1.4.2. Objetivos específicos 3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 4
2.1. Problemática de los residuos sólidos 4
2.2. Compostaje 5
2.3. Fasces del proceso de compostaje 6
2.3.1. Fase mesófila 6
2.3.2. Fase termófila 6
2.3.3. Fase de enfriamiento 7
2.3.4. Fase de maduración 7
2.4. Parámetros de control del proceso de compostaje 8

2.4.1. Humedad 8
2.4.2. Temperatura 8
2.4.3. Relación Carbono/Nitrógeno 8
2.4.4. pH 9
2.4.5. Aireación 9
3. MATERIALES Y MÉTODOS 10
3.1. Localización 10
3.1.1. Ubicación Geográfica 10
3.1.2. Características Edafoclimáticas 11
3.1.2.1. Fisiografía y suelos 11
3.1.2.2. Condiciones climáticas 11
3.2. Materiales 11
3.2.1. Material de estudio 11
3.2.1.1. Fracción fermentable de residuos orgánicos urbanos 11
3.2.1.2. Agente estructurante 12
3.2.1.3. Activador (residuos de matadero: contenido ruminal) 12
3.2.2. Material de escritorio 12
3.2.3. Material de campo 13
3.3. Metodología 13
3.3.1. Flujo de procesos en la Planta de Compostaje 13
3.3.1.1. Pesaje, registro, descarga y selección de impropios 15
3.3.1.2. Chipeado 18
3.3.1.3. Dosificación de la mezcla 19
3.3.1.4. Proceso de pre-compostaje 24
3.3.1.5. Proceso de compostaje 25
3.3.1.6. Proceso de maduración 27

3.3.1.7. Proceso de afino 27
3.3.2. Variables de respuesta 28
3.3.2.1. Temperatura y humedad durante el proceso de compostaje 28
3.3.2.2. Variación del volumen durante el proceso de compostaje 28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 29
4.1. Cantidad de materiales procesados 29
4.2. Contenido de impropios 30
4.3. Resultados del control de temperatura 30
4.4. Resultados del control de humedad 31
4.5. Resultados durante el proceso de dosificación 32
4.6. Resultados durante el proceso de pre-compostaje 33
4.7. Resultados durante el proceso de compostaje 34
4.8. Balance general del proceso 36
4.9. Resultados de calidad del producto final 36
4.10. Costos operativos y administrativos de la planta de compostaje 39
4.10.1. Costos operativos de la maquinaria 39
4.10.2. Consumo de agua en el proceso de compostaje 39
4.10.3. Consumo de energía eléctrica 40
4.10.4. Resumen de costos operativos y administrativos 40
5. CONCLUSIONES 41
6. RECOMENDACIONES 42
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43
8. ANEXOS 47

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Materiales aptos para procesamiento y no tratables 16

Cuadro 2. Materiales considerados impropios 18

Cuadro 3. Densidad media de los residuos orgánicos utilizados 20

Cuadro 4. Características químicas de los residuos orgánicos 20

Cuadro 5. Valores de relación C/N de los residuos utilizados en la dosificación 21

Cuadro 6. Valores de relación C.N de los residuos utilizados en la dosificación 22

Cuadro 7. Registro de datos en pilas de dosificación (D1 y D2) 32

Cuadro 8. Registro de datos en pilas de dosificación (D3 y D4) 33

Cuadro 9. Registro de datos de las pilas conformadas en el área de pre compostaje. .. 34

Cuadro 10. Registro de datos de las pilas conformadas en el área de compostaje. 35

Cuadro 11. Balance general del proceso 36

Cuadro 12. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del compost obtenido 36

Cuadro 13. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos según normativas internacionales 37

Cuadro 14. Costo de operación de maquinaria durante el proceso 39

Cuadro 15. Consumo de agua para riego en las diferentes áreas de trabajo 39

Cuadro 16. Consumo de energía eléctrica 40

Cuadro 17. Costos administrativos y de operación 40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de residuos sólidos urbanos 5
Figura 2. Fases del proceso de compostaje 7
Figura 3. Ubicación de la Planta de Compostaje 10
Figura 4. Vista general de la Planta de Compostaje de Mallasa 14
Figura 5. Distribución de los componentes de la Planta de Compostaje 14
Figura 6. Flujo de procesos en la Planta de Compostaje 15
Figura 7. Pesaje y descarga de insumos en el patio de recepción 15
Figura 8. Determinación de la densidad de las muestras de residuos 19
Figura 9. Proceso inicial de dosificación de la mezcla 23
Figura 10. Proceso secuencial de dosificación de la mezcla 23
Figura 11. Proceso de pre-compostaje en galpón 24
Figura 12. Proceso de compostaje en plataforma con aireación forzada 26
Figura 13. Monitoreo de temperatura y volumen en pilas de compostaje 26
Figura 14. Poceros de afino, cernido y embolsado de compost 28
Figura 15. Cantidad de residuos que ingresaron a la Planta 29
Figura 16. Proporción de residuos que ingresaron a la Planta, por tipo 29
Figura 17. Proporción de impropios obtenidos según fuente. 30
Figura 18. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje 31
Figura 19. Evolución del contenido de humedad durante el proceso de compostaje. . 31
Figura 20. Reducción de volúmenes en pilas de dosificación D1 y D2 32
Figura 21. Reducción de volúmenes en pilas de dosificación D3 y D4 33
Figura 22. Reducción de volúmenes en pilas de pre-compostaje 34
Figura 23. Reducción de volúmenes en pilas de compostaje 35

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis (Laboratorio PURUMA 47

Anexo 2. Resultados de análisis (Laboratorio UMSA). 50

ABREVIATURAS

msnm	Metros sobre el nivel del mar
C/N	Relación Carbono Nitrógeno
°C	Temperatura en grados Celsius
t/d	Tonelada por día
m	Metros
kg	Kilogramos
m^3	Metros cúbicos
h	Horas
PC	Pila de compost
F	Factor de estudio
GAMLP	Gobierno Autónomo Municipal de La Paz
RSU	Fracción orgánica fermentable de residuos sólidos urbanos

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Planta de Compostaje a Escala Piloto, operada por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) en predios del Ex Relleno Sanitario de Mallasa con el objetivo de evaluar variables físicas durante el proceso de descomposición controlada de residuos orgánicos en pilas sometidas a aireación forzada y sin aplicación de aire.

El proceso de compostaje inició con la recepción y clasificación de la fracción orgánica fermentable de residuos sólidos urbanos (RSU) conformada principalmente por restos de frutas acopiados en mercados de la ciudad de La Paz, residuos de flores (procedentes del cementerio general), residuos de césped o pasto y ramas picadas provenientes de poda de jardines y áreas verdes privadas y públicas (“chips”) que funcionó como estructurante de la masa a compostar, además del contenido ruminal o rumen generado en el matadero Municipal de Achachicala como activador microbiano. Dichos materiales fueron mezclados en distintas proporciones para dosificar una mezcla con la cual se conformaron pilas de 11,5 m de largo, 3,7 m de ancho y 2,3 m de alto.

El proceso microbiológico resultó en una elevación significativa de la temperatura sobrepasando los 70°C en el pico de la fase termófila en pilas con aireación forzada. Donde no se insufló aire la temperatura fue entre 5 a 10 grados inferior, aunque no perjudicó el proceso. En ambos casos, luego que la acción microbiana agotó los sustratos fácilmente fermentables, se registró un descenso gradual hasta equilibrarse con la temperatura ambiental (fase de madurez y posterior enfriamiento). Luego de evaluada la reducción de volumen de los residuos tratados en las diferentes etapas del proceso, el rendimiento en pilas aeróbicas fue del 40,8%. Los resultados del análisis de laboratorio indicaron una buena calidad e inocuidad del producto obtenido y su potencial para utilización agrícola, restauración de área degradas u otros usos ambientales.

ABSTRACT

This research work was carried out at the Pilot Scale Composting Plant, operated by the Municipal Autonomous Government of La Paz (GAMLP) on the premises of the former Mallasa Sanitary Landfill with the objective of evaluating physical variables during the controlled decomposition process of organic waste in piles subjected to forced aeration and without the application of air.

The composting process began with the reception and classification of the fermentable organic fraction of urban solid waste (USW) composed mainly of fruit remains collected in markets in the city of La Paz, flower waste (from the general cemetery), grass or pasture waste and chopped branches from pruning of private and public gardens and green areas ("chips") that functioned as a structuring agent for the mass to be composted, in addition to the ruminal content or rumen generated in the Municipal slaughterhouse of Achachicala as a microbial activator. These materials were mixed in different proportions to produce a mixture that was used to form piles measuring 11.5 m long, 3.7 m wide and 2.3 m high.

The microbiological process resulted in a significant rise in temperature, exceeding 70°C at the peak of the thermophilic phase in piles with forced aeration. Where air was not blown in, the temperature was 5 to 10 degrees lower, although this did not harm the process. In both cases, after the microbial action had exhausted the easily fermentable substrates, a gradual decrease was recorded until it was balanced with the ambient temperature (maturity phase and subsequent cooling). After evaluating the reduction in volume of the treated waste at the different stages of the process, the yield in aerobic piles was 40.8%. The results of the laboratory analysis indicated a good quality and safety of the product obtained and its potential for agricultural use, restoration of degraded areas or other environmental uses.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de plantas de tratamiento de residuos sólidos en Bolivia son una realidad y parte fundamental de las estrategias que se vienen adoptando para minimizar los potenciales impactos ambientales derivados del manejo y disposición de residuos sólidos en el marco de la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos, de 28 de octubre de 2015 y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia, que prioriza la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura.

En la actualidad se cuenta con una Guía de Diseño para Plantas de Compostaje como arte del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000, donde se encuentran lineamientos y secuencia de cálculo para dimensionar plantas con capacidad de tratamiento de hasta 100 t/d de residuos orgánicos, así como el detalle de las infraestructuras necesarias para los procesos de transformación (Roman, Martínez et al. 2013). No obstante, el ajuste de diversos aspectos metodológicos debe realizarse en función a las características de los residuos generados y las condiciones locales propias de cada municipio.

La obtención de abonos orgánicos estables a partir de residuos sólidos (fracción fermentable) constituye una práctica importante para el aprovechamiento de los recursos contenidos en los desechos generados tanto por las actividades agrícolas, industriales, así como los generados en núcleos de población, los mismos que cuando no son gestionados adecuadamente provocan impactos negativos como emanación de olores, desprendimiento de gases de efecto invernadero (GEI), además de facilitar la proliferación de vectores de diferentes enfermedades como insectos (zancudos, moscas, cucarachas), roedores y otros (Zamora, Mendez *et al*., 2013). En este sentido, el compostaje constituye un proceso biológico controlado que permite la transformación de la materia orgánica en un producto estable denominado compost a través de la descomposición aeróbica.

Según Fernandez, Gomez et al. (2004), el compost es considerado como un sustrato en la cadena trófica del suelo, promociona la actividad biológica de los microorganismos del suelo y favorece su diversidad. El compost es un excelente insumo para la conservación de los suelos.

A pesar de sus bondades el producto resultante del proceso de compostaje no debe contender sustancias tóxicas u organismos patógenos que puedan afectar la salud de las plantas, animales, humanos y la calidad ambiental en general (Restrepo y Rodriguez, 2002).

Según Uribe (2003), la calidad del compost final depende de varios factores los cuales deben contralarse durante el proceso de fermentación y maduración, entre los parámetros más importantes están la temperatura, humedad, relación Carbono/Nitrógeno, presencia de oxígeno, pH y otros.

1.1. Antecedentes

Desde el Gobierno Central y gobiernos subnacionales se vienen impulsando políticas orientadas al aprovechamiento de los residuos sólidos con el objetivo de minimizar dichos impactos y fomentar la conciencia ciudadana (Zamora, Mendez et al. 2013). No obstante, las soluciones para el tratamiento de ciertas fracciones (especialmente la orgánica) contenidas en los residuos requieren aún bastante investigación, sobre todo en lo referido a las particularidades de técnicas biológicas como el “compostaje”. Asimismo, es necesario contemplar la factibilidad de aspectos técnicos constructivos de las plantas de tratamiento y una variedad de tópicos requeridos para brindar soluciones integrales a la problemática. En tal sentido, tales investigaciones serán la base de futuros lineamientos que garanticen la inocuidad de los productos obtenidos para el medio ambiente y la salud pública, además de su factibilidad en el contexto nacional.

1.2. Planteamiento del problema

La cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que generan ciudades como La Paz o El Ato superan fácilmente las mil toneladas diarias, constituyendo una de las problemáticas más acuciantes que deben resolver los Gobiernos Municipales tanto por los riesgos a la salud pública como impactos ambientales asociados a una inadecuada gestión. Se estima que entre el 50 y 60% de los residuos sólidos generados en las 9 ciudades Capitales de Bolivia es de origen orgánico y susceptible de tratamiento mediante técnica biológicas como el compostaje.

1.3. Justificación

La presente investigación se justica en vista de la necesidad de ajustar lineamientos y establecer protocolos para el procesamiento ambientalmente seguro de los materiales orgánicos residuales generados por núcleos de población, mediante la técnica biológica del compostaje, basado en sus características físico-químicas y otros parámetros, además de verificar la eficiencia de aspectos constructivos y operacionales de los sistemas de tratamiento existentes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar las variables físicas en pilas de compostaje con y sin aireación forzada en la Planta de Compostaje de Mallasa, La Paz.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia del proceso de compostaje mediante la reducción del volumen de pilas aeróbicas.
- Evaluar el comportamiento de las temperaturas y humedad en pilas de compostaje.
- Determinar el rendimiento del proceso
- Determinar la calidad del producto final obtenido (compost)
- Determinar los costos relacionados con el proceso.

.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Problemática de los residuos sólidos

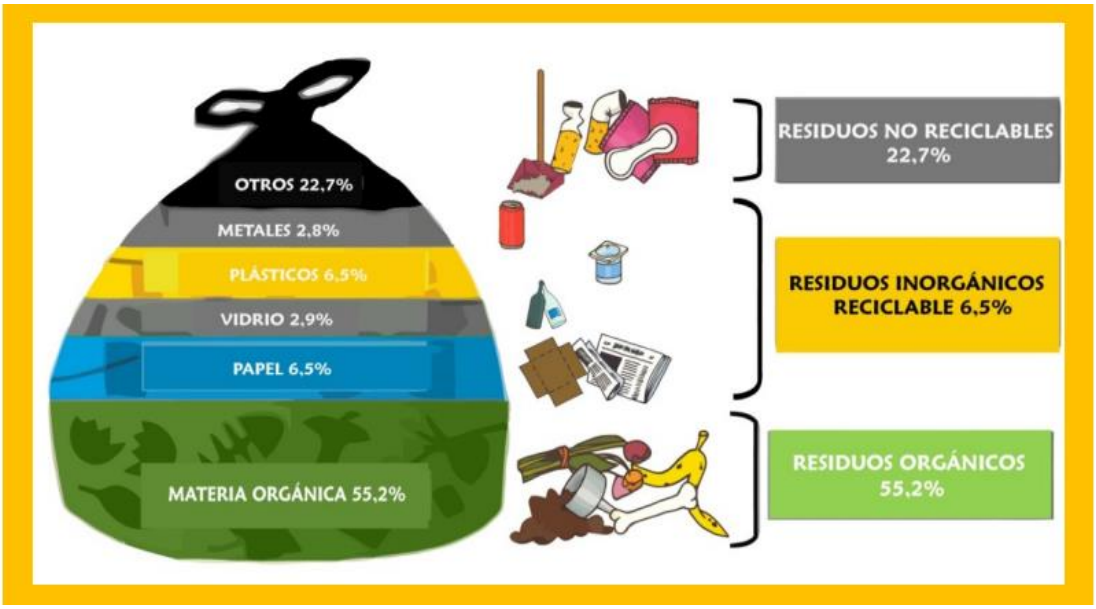
El incremento en la generación de residuos sólidos, que incluye aquellos derivados de actividades agrícolas, industriales, desechos domésticos, humanos y animales, se ha convertido en un problema importante que causa contaminación ambiental a nivel mundial. Ante estos desafíos, la valorización de los residuos desde un enfoque integral y tecnológico puede coadyuvar a resolver la problemática (Bomfim *et al.*, 2022).

En Bolivia se generan aproximadamente 4782 toneladas de residuos sólidos diariamente, de los cuales el 87% se genera en área urbana y el 13% en área rural. La generación per-cápita de residuos sólidos varia en un rango de 0,20 kg/habitante/día en áreas rurales a 0,53 kg/habitante/día, en áreas urbanas, con lo cual se alcanza un promedio nacional de 0,50 kg/habitante/día (E.M.A.V.I. 2011, 2015).

El análisis de la composición media de residuos sólidos que genera una familia boliviana, muestra que hasta un 77% de los residuos podrían ser aprovechados (55% residuos orgánicos y 22% residuos inorgánicos reciclables) y el 23% restante corresponden a residuos no aprovechables .(E.M.A.V.I. 2011, 2015).

En áreas rurales y suburbanas es común que los residuos sean vertidos de forma no controlada en fosas, terrenos baldíos e inclusive en cuerpos de agua. Del total de sitios de disposición final municipal, el 90,8% son botaderos a cielo abierto, el 6,1% controlados y apenas 3,1% son estructuras de ingeniería o rellenos sanitarios (E.M.A.V.I. 2011, 2015).

.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS, 2010. Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

Figura 1. Composición de residuos sólidos urbanos

2.2. Compostaje

El compostaje constituye una tecnología de bajo costo para la estabilización de residuos orgánicos transformándolo en un producto inocuo denominado “compost”. Constituye una técnica viable para el tratamiento de la fracción orgánica fermentable de los residuos sólidos. El proceso es facilitado por la separación de los componentes que se realiza en las fuentes de generación (separación en origen) por lo que debe estar asociado a un sistema de gestión integral (Campos *et. al*., 2021).

Los residuos que se utilizan como materiales de partida en el proceso de compostaje deben ser de naturaleza muy diversa. La disponibilidad de substratos orgánicos en estado sólido y su heterogeneidad favorece el desencadenamiento de un proceso bio - oxidativo controlado en el que intervienen múltiples microorganismos. El proceso implica necesariamente el paso por una etapa donde la temperatura se eleva temporalmente (termófila) para finalmente obtener productos de biodegradación como agua, dióxido de carbono, minerales, así como el "compost”, material estabilizado similar a la turba.

Conforme fue mencionado, el compostaje es un proceso que exige la presencia de niveles adecuados de oxígeno (aeróbico) el cual es consumido por los microrganismos durante su

actividad metabólica. Cuando las condiciones son adecuadas, los microbios utilizan las fuentes sencillas de C y N rompiendo los enlaces y liberando su energía, generando calor. La elevación paulatina de la temperatura en la masa en compostaje lleva a la colonización por otras especies cada vez más tolerantes que reemplazan a las iniciales. La temperatura puede elevarse linealmente en los primeros días hasta alcanzar rangos que pueden superar los 60 o 70ºC (fase termofílica o termófila) tendiendo a descender gradualmente a medida que se agota el sustrato

El compostaje involucra procesos metabólicos complejos realizados por diferentes microorganismos que aprovechan inicialmente fuentes o moléculas sencillas. El nitrógeno (N) y carbono (C) contenido en ellas pasan a conformar la biomasa microbiana. Luego son atacadas las moléculas más complejas quedando finalmente un sustrato sólido más estable pero aún susceptible de transformación (Aguilera, 2006).

Cuando los materiales de partida son sometidos a la acción de los microorganismos se exponen nuevas superficies y compuestos solubles, como azúcares, producen ácidos orgánicos por lo que los valores de acidez pueden bajar llevando la masa aun pH de cerca de 4, 0 o 4,5). Según Roman, Martínez et al. (2013), con una adecuada humedad, provisión de oxígeno y temperatura, se asegura una transformación de los restos orgánicos en un material homogéneo y con nutrientes en formas asimilables por las plantas.

2.3. Fasces del proceso de compostaje

2.3.1. Fase mesófila

Una vez que ase acondicionan materiales orgánicos frescos y heterogéneos son atacados por los microorganismos mesófilos quienes utilizan las fuentes sencillas de carbono y nitrógeno, creciendo y multiplicándose. Esta actividad puede provocar un incremento de la temperatura hasta los 40 a 45 ºC en pocos días (Roman, Martines et al.,2013).

2.3.2. Fase termófila

Esta fase es crítica en el proceso pues los microorganismos iniciales son reemplazados por aquellos tolerantes a mayores temperaturas (de 60 a 70 ºC), en su mayoría se trata de bacterias (bacterias termófilas) y algunos actinomicetos, que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina (Roman, Martines et al. 2013). Debido a que la mayor parte de microbios patógenos no tolera estos

rangos de temperatura, se promueve la higienización o saneamiento de los residuos, se inviabilizan además semillas de hierbas invasoras.

2.3.3. Fase de enfriamiento

Cuando las fuentes de carbono y, en especial de nitrógeno han sido agotadas en el material orgánico, la temperatura desciende nuevamente. Como consecuencia de ello bacterias y hongos mesófilos recolonizan la masa y reinician su actividad, degradando sustratos restantes descendiendo levemente el pH. El indicador de que esta fase se ha alcanzado e la imposibilidad de un nuevo aumento de temperatura (Roman, Martínez et al. 2013).

2.3.4. Fase de maduración

Es un período que puede extenderse por meses a temperatura ambiente donde se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de los precurosres de sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos).

La evolución de las distintas fases se muestra en la siguiente Figura.

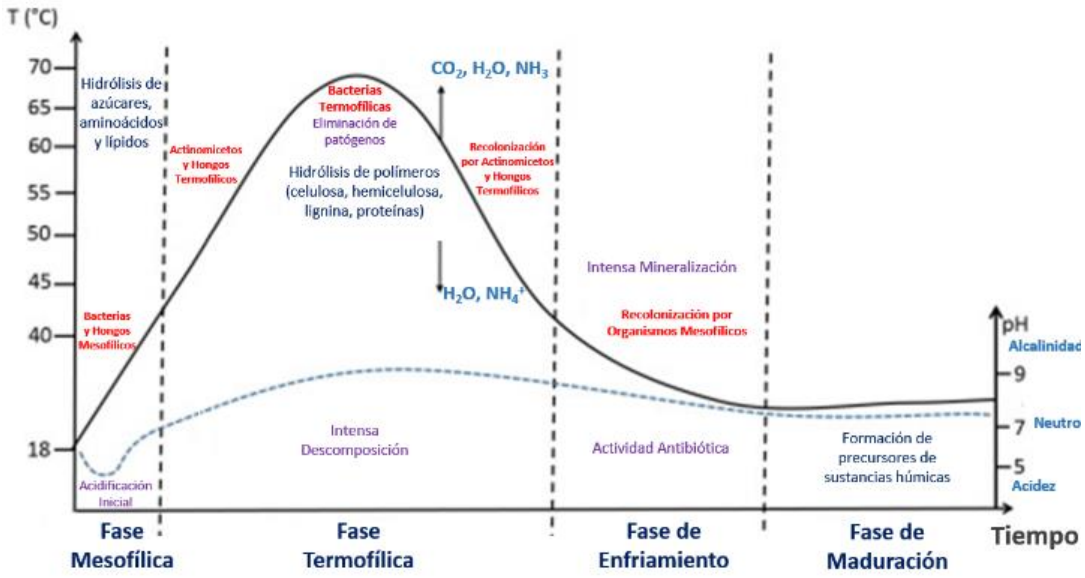


Figura 2. Fases del proceso de compostaje

2.4. Parámetros de control del proceso de compostaje

2.4.1. Humedad

El proceso de compostaje requiere una humedad mínima del 40%, dado que los microorganismos involucrados requieren un medio acuoso para su desarrollo y nutrición, Valores excesivos de humedad pueden afectar el intercambio gaseoso en la masa a compostar pues el agua pasa a ocupar los espacios porosos lo cual genera un ambiente anaeróbico (sin oxígeno) que ocasionaría la putrefacción de la materia orgánica y generación de gases nocivos.

2.4.2. Temperatura

El monitoreo de la temperatura es esencial para garantizar la sanitización de la masa con respecto a la presencia de microorganismos patógenos, semillas de malezas, esporas de hongos y algunas fitotoxinas que posteriormente significarían un problema al adicionar el compost como enmienda agrícola. Este control permitirá determinar el momento justo en que la masa debe ser aireada (por volteo o aireación forzada) para estimular el proceso (Mitma, 2015).

2.4.3. Relación Carbono/Nitrógeno

En términos generales, los microorganismos requieren treinta partes de carbono por cada parte de nitrógeno. El carbono se utiliza como fuente de energía siendo 10 partes incorporadas al protoplasma celular y 20 partes eliminadas como dióxido de carbono. En forma práctica, la relación Carbono/Nitrógeno permite conocer la velocidad de descomposición y determinar el tiempo de compostaje, siempre y cuando las condiciones de humedad, aireación y temperatura sean las óptimas (Roman, Martines et al. 2013).

Para obtener un compost de buena calidad es importante que exista una relación equilibrada entre ambos elementos. Teóricamente, una relación carbono/nitrógeno de 25-35 es la adecuada, pero esta variará en función de las materias primas que conforman el compost. Si la relación es mayor a 35 no existe suficiente nitrógeno para el crecimiento microbiano por lo cual disminuirá la actividad biológica y por ende se retrasará el proceso. En cambio, si es menor a 30 el nitrógeno se encontrará en exceso por lo que puede perderse como amoniaco (NH_3), lo que traerá como consecuencia generación de olores e desagradables (Roman, Martines et al. 2013).

2.4.4. pH

El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4,5 a 8,5). En los primeros estadios del proceso, el pH baja (la masa se acidifica) por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoniaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro. El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0 a 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce en el rango de pH de 5,5 a 8,0 (Mitma 2015).

2.4.5. Aireación

Para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios. Las pilas de compostaje presentan porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus espacios libres: la parte más externa contiene casi tanto oxígeno como el aire (18 a 20%); hacia el interior el contenido de oxígeno va disminuyendo, mientras que el de dióxido de carbono va aumentando, hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0,5 y 2%.

Una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlingmaier, 1996). El exceso de ventilación podría provocar el enfriamiento de la masa y una alta desecación con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).

La aireación es una variable de operación muy importante y en caso de ser automatizada requiere de inversión en equipos costosos e infraestructura especifica (Kulcu and Yaldiz 2004).

Durante el proceso de maduración no deben hacerse aportaciones adicionales de oxígeno, ya que una excesiva aireación podría dar lugar a un consumo de los compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos (Tomati, Madejon et al., 2000).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Planta de Compostaje situada en en el Ex Relleno Sanitario de Mallasa que queda ubicada al Sur de la Ciudad de La Paz en la Localidad de Mallasa, perteneciente al Municipio de La Paz - Provincia Murillo. Se encuentra a una distancia aproximada de 14 km del centro urbano (Google Earth, 2022). La altitud aproximada es de3251 m s nm y las coordenadas geográficas 16º 34’ 44,98” de Latitud Sur 68º 04’43,38” y de Longitud Oeste).

.

Figura 3. Ubicación de la Planta de Compostaje

3.1.2. Características Edafoclimáticas

3.1.2.1. Fisiografía y suelos

La zona presenta un paisaje de gran complejidad con rasgos evidentes de procesos erosivos conocidos como “Bad Lands” La Paz. En la morfogénesis destaca la desglaciación con deposición de morrenas y acontecimientos fluviales, coluviales y aluviales. Algunos de ellos inciden en la susceptibilidad a deslizamientos, derrumbes y otros procesos erosivos.

El material geológico y la singularidad topográfica de la zona incluyen suelos con horizontes poco diferenciados, escasamente desarrollados sobre materiales finos (limos y arcillas) con presencia de gravas producto de la erosión diferencial.

3.1.2.2. Condiciones climáticas

Según GAMLP (2004) la región de Mallasa hace parte del Valle de La Paz con un régimen de precipitación media de 596 mm anuales. La temperatura máxima es de 20,3°C y una temperatura mínima de 12,3 °C con un promedio anual de 15,4 °C.

3.2. Materiales

3.2.1. Material de estudio

La Planta de Compostaje de Mallasa fue diseñada exclusivamente para el tratamiento de diferentes residuos orgánicos generados en la ciudad de La Paz, los cuales fueron transportados hasta los predios para su tratamiento. La descripción de estos materiales se presenta a continuación.

3.2.1.1. Fracción fermentable de residuos orgánicos urbanos

Consiste en la fracción orgánica de rápida descomposición (fermentable) de los residuos sólidos generados en los puntos de recojo selectivo (“selección en origen”) instalados en la ciudad de La Paz por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP). Mayoritariamente están conformados por restos de frutas descartadas por pérdida de su valor comercial, también fueron acopiados los residuos de flores procedentes del cementerio general de la ciudad y otros residuos orgánicos domiciliarios.

3.2.1.2. Agente estructurante

Los residuos orgánicos fueron mezclados con restos de poda generados durante el mantenimiento de áreas verdes (parques, jardineras), tala y poda de arbolado urbano y los generados en el Parque Zoológico Municipal Vesty Pakos Sofro. Se incluyen también otros residuos provenientes de jardines domiciliarios o particulares (troncos delgados, ramas, césped o pasto). Todos los materiales fueron picados en forma de “chips” o fragmentos de 2 hasta 5 pulgadas de longitud para funcionar como agente estructurante y proporcionar la aireación necesaria en la mezcla.

3.2.1.3. Activador (residuos de matadero: contenido ruminal)

Se han incluido como ingrediente en el proceso de tratamiento; los residuos provenientes del Matadero Municipal de Achachicala, específicamente el contenido ruminal de bovinos, es decir el material que, al momento del sacrificio de los animales, no alcanzó a ser digerido y que constituye un residuo de difícil gestión por su abundante carga microbiana y otras sustancias de la fermentación ruminal que lo hacen altamente putrescible. Sin embargo, por sus características químicas y biológicas se ha establecido que coadyuvará para activar y acelerar el proceso, siempre que sea adecuadamente dosificado durante la preparación de la mezcla a compostar. Cabe aclarar que ha sido procesado exclusivamente el contenido ruminal y eventualmente estiércol (mezclado o no con orina) proveniente del área de espera previa al sacrificio (corral). Otros residuos generados por el matadero se consideran impropios para el proceso.

3.2.2. Material de escritorio

Se utilizaron los siguientes materiales de escritorio:

- Laptop, programas y aplicaciones
- Bolígrafos, lápices, goma de borrar
- Cuaderno y planillas de registro
- Dispositivo de almacenamiento (USB)
- Cámara fotográfica
- Calculadora

3.2.3. Material de campo

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Ropa de trabajo (casco, botas, guantes, overol, barbijo)
- Herramientas (pala, pico, rastrillo, carretilla, barreno)
- Flexómetro, cinta métrica, regla de madera
- Sondas termométricas (manual y automática)
- Baldes
- Bolsas de yute y bolsas plásticas para muestreo

3.3. Metodología

Debido a tratarse de una Planta instalada y en plena operación, la presente investigación se adecuó a los lineamientos establecidos por el GAMLP para el procesamiento de los residuos mediante compostaje, los cuales fueron seguidos estrictamente a fin de garantizar la calidad e inocuidad de los productos a obtener, así como para evitar y/o minimizar posibles riesgos asociados a la seguridad de los operadores y potenciales impactos al medio ambiente. En tal sentido, todos la información presentada y datos recolectados son descriptivos, comparativos y cuyo propósito fue evaluar el comportamiento de las variables objeto de estudio.

3.3.1. Flujo de procesos en la Planta de Compostaje

La investigación se realizó secuencialmente en las distintas áreas que componen la Planta:

- Área de recepción y clasificación
- Área de dosificación
- Área de pre-compostaje
- Área de compostaje
- Área de maduración
- Área de afino

Las mencionadas áreas están dispuestas según un diseño “modular” lo cual permite optimizar las operaciones de la Planta e impulsar sus funcionalidades de una manera lógica e intuitiva, en tal sentido, los materiales que ingresan a la Planta siguen dicha secuencia para su tratamiento y estabilización biológica mediante la técnica del compostaje. Se

cuenta además con un sector de pesaje y aéreas accesorias que brindan de manera eficiente, condiciones de accesibilidad y circulación de vehículos y maquinaria pesada requerida. Según los volúmenes a tratar y características de la infraestructura existente, la Planta fue diseñada para el procesamiento de 30 toneladas por día de la mezcla o masa a compostar (capacidad máxima). En las siguientes fotografías se muestra una vista general y la distribución de las áreas mencionadas.

Figura 4. Vista general de la Planta de Compostaje de Mallasa

Figura 5. Distribución de los componentes de la Planta de Compostaje

Las etapas del proceso, de acuerdo al orden en que se presentan y las formas de interacción entre las operaciones se discuten a continuación siguiendo el flujo presentado en la siguiente Figura.

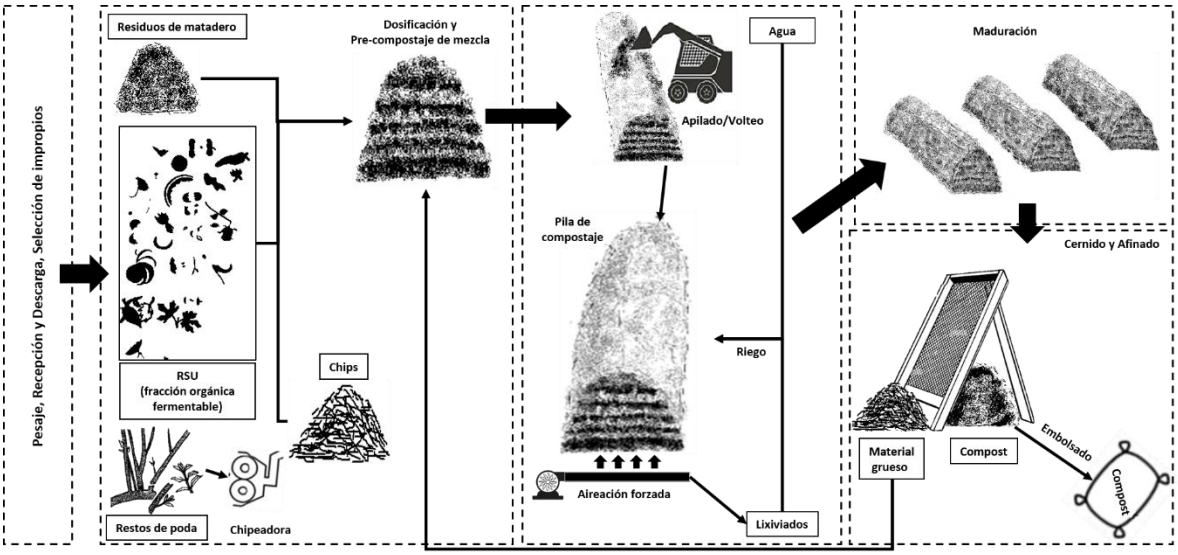


Figura 6. Flujo de procesos en la Planta de Compostaje

La descripción de cada etapa se presenta a continuación.

3.3.1.1. Pesaje, registro, descarga y selección de impropios

Todos los residuos que ingresaron a la Planta fueron pesados en una báscula estática para camiones (volqueta) que registró el peso del equipo cargado y vacío a la salida. De esta manera se obtuvo el peso neto o bruto (con impropios). Inmediatamente después del pesaje, los residuos se descargaron en el patio de recepción de insumos (ver siguiente fotografía).

Figura 7. Pesaje y descarga de insumos en el patio de recepción

Luego de la descarga se procedió a la clasificación o “selección de impropios” o “rechazos” es decir de aquellas fracciones “no tratables” en la Planta y que por alguna razón no han sufrido una separación en origen (plásticos, metales, vidrio, etc.). El proceso (visual y manual) fue ejecutado con la ayuda de operarios del GAMLP que procedieron a separar los impropios, en la medida de lo posible, de la fracción orgánica, en adelante denominados “insumos”. Se procedió de la misma manera con los otros residuos (residuos de matadero, restos de poda y otros).

En los siguientes cuadros se presentan los distintos materiales orgánicos que se procesaron en la Planta y los materiales impropios o “no tratables” que pueden encontrarse entremezclados con ellos y que debieron ser retirados a fin de no perjudicar las etapas posteriores del proceso.

Cuadro 1. Materiales aptos para procesamiento y no tratables

Tipo de residuo	Observación
Residuos orgánicos fermentables o biodegradables producidos en actividades domésticas (domicilios) y comerciales (ferias, mercados) de la ciudad de La Paz: • Frutas, verduras y otros desperdicios “verdes” de alimentos de origen vegetal (cáscaras o mondas), productos enteros mal estado (desechados sin envase). • Desperdicios de cocina provenientes de la preparación y sobras de alimentos. • Restos del consumo de otros alimentos como bolsas de té, borra de café y similares. • Residuos fermentables de agroindustrias de origen vegetal.	En ésta categoría se consideran impropios: • Carne cruda • Recortes de carnicería, friales • Huesos • Sebos, grasas o similares • Aceite vegetal de cocina utilizado • Aceites animales

Tipo de residuo	Observación
• Rumen o contenido ruminal de vacuno y estiércoles generados en matadero	En ésta categoría se consideran impropios: • Vísceras y otros recortes de faenado (eviscerado) • Carne cruda o restos con efluentes sanguíneos. • Huesos • Cuernos, pezuñas • Recortes de cuero, pelo • Sebos, grasas o similares • Residuos pastosos, fango o similares
Residuos de poda de áreas verdes, vías públicas (arborización urbana) parques o jardines: • Follaje • Troncos y ramas • Raíces • Hierba cortada (césped o “pasto”) • Paja, rastrojos vegetales • Viruta, aserrín	En ésta categoría se consideran impropios: • Trozos de madera tratada (madera con esmalte, barniz, pintura o con piezas metálicas) • Tierra, piedras, gravas u otros escombros generados en parques o jardines.
Otros materiales de origen orgánico: • Trozos de papel y cartón de embalaje fragmentados • Servilletas de papel	En ésta categoría se consideran impropios: • Papel aluminizado • Papel sanitario • Toallas higiénicas, pañales o similares

Cuadro 2. Materiales considerados impropios

Material	Impropios
Vidrio y cerámica	• Botellas, frascos o envases enteros o astillados • Vidrio plano astillado • Focos, lámparas enteros o astillados • Trozos de cerámica, esmaltada o similar
Plástico	• Botellas o envases de PET (Tereftalato de Polietileno), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno) y PVC (Policloruro de Vinilo), PEAD (Polietileno de alta densidad), celofán u otros polímeros • Otros plásticos mixtos o plásticos duros enteros o fragmentados
Papel y cartón	• Papel aluminizado • Papel sanitario • Toallas higiénicas, pañales, barbijos o similares
Madera	• Trozos de madera tratada (con esmalte, barniz, pintura o con piezas metálicas)
Metales	• Latas o envases de cinc, aluminio • Alambres, clavos, tachuelas • Pilas, baterías • Otra chatarra férrica y no férrica
Otros	• Cuero en calzados, textiles, prendas, accesorios y otros • Goma y caucho en calzados, parches, bandas, ligas y otros

Los impropios seleccionados fueron pesados en la báscula y dispuestos en contenedores móviles para su envío y disposición final en el Relleno Sanitario en actual operación.

Los materiales orgánicos fermentables, ya seleccionados, permanecieron por un máximo de 48 horas en el área de recepción. Este almacenamiento temporal fue minimizado, en la medida de lo posible, por cuestiones sanitarias (generación de malos olores, vectores), aspectos estéticos (impacto visual) y para garantizar un constante abastecimiento de materia prima para el sistema de compostaje (frecuencia de procesamiento).

3.3.1.2. Chipeado

El chipeado consiste en la reducción de tamaño de los restos de poda, específicamente de aquellos leñosos (troncos), cortezas o ramas muy lignificadas, los mismos fueron picados o astillados mecánicamente mediante una trituradora (chipeadora forestal o astilladora) con

capacidad de corte de hasta 5 pulgadas (13 cm). Debido al tipo de material, se alimentó la tolva con material leñoso (rotor chipeador de 20" x ¼") con capacidad de producir hasta 13 m^3 por hora de material. Una vez finalizada la operación se homogeneizó la mezcla de chips, viruta y césped (de acuerdo a la disponibilidad) con la ayuda de la pala frontal de cargador BOBCAT para su traslado al área de dosificación.

Durante el chipeado y en la medida de lo posible, se separaron aquellos troncos, ramas y follaje de las siguientes especies: *Eucaliptus globulus*, (eucalipto); *Cupressus macrocarpa* (ciprés común) y *Pinus radiata* (pino). Los mismos que no deben ser utilizados en la preparación de la mezcla debido a su elevado contenido de resinas y aceites que perjudican la acción microbiana.

Es importante aclarar que el material chipeado es un componente esencial de la mezcla y aunque una fracción importante se degrada biológicamente durante el proceso de compostaje, al finalizar el mismo, gran parte fue reaprovechada, retornando para una nueva dosificación.

3.3.1.3. Dosificación de la mezcla

La dosificación representa en sí, el inicio del proceso de compostaje de los residuos orgánicos, contempla la preparación de la mezcla o masa a compostar.

A fin de establecer las características de los componentes para la dosificación se procedió a determinar la densidad de los residuos. Para ello se tomaron muestras en un recipiente de volumen conocido siendo posteriormente pesadas (ver siguiente fotografía).

Figura 8. Determinación de la densidad de las muestras de residuos

Los valores de densidad encontrados se presentan en el siguiente cuadro aclarando que corresponden a los diferentes tipos de residuos acopiados en el área de recepción por lo que estos valores sufren modificaciones durante la conformación de las pilas debido al adensamiento que sufren por efectos del apilado.

Cuadro 3. Densidad media de los residuos orgánicos utilizados

Material	Denominación genérica	Densidad media (kg/m³)
Residuos de poda y otros	"Chip"	294
	"Flores"	167
	"Pasto"	120
Residuos de matadero	"Rumen"	444
Fracción fermentable (RSU-Orgánico)	"Fruta"	696

Fuente: Elaboración propia.

Paralelamente se procedió al muestreo (muestra compuesta de residuos frescos) y su envío al Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayo de San Andrés (UMSA) de la ciudad de La Paz. Los residuos fueron caracterizados siguiendo métodos estandarizados recomendados por el US Department of Agriculture y US Composting Council (2002).

El análisis de los materiales permitió determinar la relación Carbono/Nitrógeno (C:N) índice crucial para la evaluación de procesos biológicos de descomposición. Las características de los residuos orgánicos se muestran en los siguientes Cuadros.

Cuadro 4. Características químicas de los residuos orgánicos

Parámetro	Concentración (%)	Método analítico empleado
Nitrógeno Total	2,78	Digestión Kjeldahl
Carbono Orgánico	24,94	Walkley & Black

Fuente: Elaboración propia con base en datos analíticos - Laboratorio UMSA Métodos deThe US Department of Agriculture and the US Composting Council, 2002. Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC), Edaphos International, Houston, TX.

Con base en los datos obtenidos se estableció una relación C/N de aproximadamente 9:1, la cual se considera inferior a los rangos estándar establecidos para este tipo de residuos. Los datos fueron contrastados con los valores de fuentes de información bibliográfica e

introducidos en plataformas o calculadoras “on line” disponibles para tal efecto. Las referencias se muestran en el siguiente Cuadro.

Cuadro 5. Valores de relación C/N de los residuos utilizados en la dosificación

Componente	Descripción	Relación C/N	Referencia
Fracción fermentable (RSU-Orgánico)	Residuos orgánicos domiciliarios frescos	9:1	Datos analíticos - Laboratorio UMSA
		15:1	http://compost.css.cornell.edu/download.html
		11:1 hasta 15:1	https://www.recyclingbin.com/Compost-Calculator
Agente estructurante	Chips de madera mezclados	400:1	https://morningchores.com/compost-calculator/
	Chips de madera suave	De 80:1 a 226:1	https://www.klickitatcounty.org/DocumentCenter/View/3523/Compost-Calculator
	Hojas frescas	37:1	
	Hojas secas	47:1	
		60:1	https://morningchores.com/compost-calculator/
	Paja de gramíneas	53:1	https://www.klickitatcounty.org/DocumentCenter/View/3523/Compost-Calculator
	Restos de jardín y poda de césped	20:1 a 30:1	https://morningchores.com/compost-calculator/
	Ramas de árboles	16:1	http://compost.css.cornell.edu/download.html
Activador	Contenido ruminal y estiércol	15:1	https://morningchores.com/compost-calculator/
		10:1 a 17:1	https://www.klickitatcounty.org/DocumentCenter/View/3523/Compost-Calculator

Fuente: Elaboración propia con base en las referencias indicadas.

En función a lo mencionado y dadas las características del material orgánico a procesar en la Planta, fueron calculadas diversas mezclas con los datos de los cuadros anteriores con el uso de las herramientas disponibles e intentando adecuarlas lo mejor posible al contexto local y a los objetivos de la investigación. Luego de las mencionadas pruebas se llegó a la conclusión que una proporción adecuada para la mezcla es de 2 partes de RSU-Orgánico por 1 parte de agente estructurante más el activador. Los datos resumidos de este análisis se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Valores de relación C.N de los residuos utilizados en la dosificación

Componente	Partes	Porcentaje	C:N adoptado	Proporción	Relación C/N final
RSU-Orgánico + activador	2	66,67	9:1	6,00	32,67
Agente estructurante	1	33,33	80:1	26,67	

Fuente: Elaboración propia con base en datos de las fuentes mencionadas.

Conforme las fuentes bibliográficas consultadas, el valor encontrado esta próximo del rango óptimo de C/N que varía entre 25:1 a 30:1. Ello significa que deben existir entre 25 a 30 partes de Carbono por 1 de Nitrógeno. En términos prácticos y dada la disponibilidad de materiales, se estableció que una relación apropiada se puede alcanzar con las siguientes proporciones: 40% de residuos de mercado (“fruta”), 10% de “rumen”, 15% de “pasto”, 20% de “chips”, 15% de “flores” las cuales fueron finalmente adoptadas para la dosificación.

Con las proporciones calculadas se procedió a extender capas de residuos orgánicos dispuestas de forma tal que se intercale material estructurarte (“chips”, ”pasto”, ”flores”) y la fracción orgánica fermentable de residuos urbanos (residuos de mercado más los residuos de matadero). En función a la densidad propia de cada componente y el volumen requerido, el espesor de cada capa fue medido para lograr un eficiente control de todas las proporciones (ver siguiente fotografía).

Figura 9. Proceso inicial de dosificación de la mezcla

El proceso de dosificación completo de la mezcla se esquematiza en la siguiente figura.

Figura 10. Proceso secuencial de dosificación de la mezcla

La adición secuencial de los distintos insumos o “ingredientes” en las proporciones establecidas se realizó con ayuda de equipo pesado. Conforme se observa en las figuras anteriores, inicialmente fue colocada una capa base de material chipeado (pasos 1 y 2) cuya función es la retención de lixiviados que son liberados de forma paulatina por las capas superiores (en especial por los residuos orgánicos de mercado), a su vez, la base actuó como material estructurante permitiendo el ingreso de oxígeno. Seguidamente se extendió, de manera secuencial; una capa de residuos de matadero (paso 3), una capa de residuos de poda (pasto) o residuos de flores secas (paso 4) y una capa de residuos de residuos de mercado (paso 5) y nuevamente una capa de residuos de poda (pasto) o flores (paso 6). El proceso descrito se fue repitiendo hasta que la pila alcanzó una altura de 2,30 m, 3,70 de ancho y 11,50 m de longitud (paso 7). Para minimizar la proliferación de vectores (moscas) y la pérdida excesiva de agua por evaporación, las pilas se recubrieron externamente con una cubierta de restos de poda (paso 8).

3.3.1.4. Proceso de pre-compostaje

Luego de la dosificación, la mezcla fue trasladada al área de pre-compostaje (galpón cubierto), durante el proceso, los componentes fueron homogeneizados y se conformaron las pilas con las dimensiones ya establecidas (3,7 m de ancho, 2,3 m de altura).

Figura 11. Proceso de pre-compostaje en galpón

Debido a que los materiales de entrada presentaron elevados contenidos de humedad la mezcla permaneció por un periodo de 15 días sobre la plataforma del galpón para que el exceso de líquido sea naturalmente exudado por la masa y se produzca el desencadenamiento de procesos bioquímicos. Durante este periodo se verificó la elevación de la temperatura y el flujo libre de lixiviados hacia el sistema de recolección del galpón (cámaras de almacenamiento) a partir de la cual fueron recirculados en la masa.

3.3.1.5. Proceso de compostaje

Transcurrido el periodo de permanencia de las pilas en el área de pre-compostaje, se procedió al traslado de la masa al área de compostaje de la Planta que funciona como un sistema “abierto”, es decir, consta de un patio donde los materiales orgánicos son acomodados en pilas (montones o hileras) para promover la fermentación o biodegradación.

El apilamiento demostró ser un método eficaz caracterizado por su sencillez y bajo costo. Para ello la masa pre-compostada fue depositada sobre la “Plataforma de Compostaje” que cuenta con un sistema de aireación forzada. El sistema permite insuflar o bombear aire atmosférico a través de las pilas de compostaje mediante una compresora acoplada a un sistema de ductos de distribución y tuberías perforadas. Todo el sistema se encuentra empotrado en la solera de hormigón del patio de compostaje y funciona conjunta y paralelamente con el canal de drenaje de lixiviados. El sistema mecánico de ventilación abastece a cada pila con un flujo gaseoso constante liberado a partir de su base y que asciende por convección hasta la parte superior. Ello permite mantener niveles de oxígeno suficientes para mantener una biomasa microbiana metabólicamente activa promoviendo así la descomposición aeróbica. El control de encendido/apagado de la bomba es controlado por un “timer” que se encuentra ubicado en una caseta anexa (ver siguiente fotografía).

Figura 12. Proceso de compostaje en plataforma con aireación forzada

Para conformar las pilas el material fue extendido (sin ser comprimido) en paladas sucesivas del tractor hasta alcanzar una altura máxima de 2,3 m y 3,7 m de ancho en su base inferior, procurándose conformar una pirámide truncada. Nuevas pilas se dispusieron de manera contigua formando hileras, a medida que se fueron recibiendo más volúmenes de mezcla. Se dejó un pasillo entre pilas para permitir el acceso durante el monitoreo de temperatura, humedad durante todo el proceso. Asimismo, se tomaron datos para verificar la reducción del volumen en cada pila (ver siguiente fotografía).

Figura 13. Monitoreo de temperatura y volumen en pilas de compostaje

3.3.1.6. Proceso de maduración

Concluido el proceso de compostaje el material fue trasladado al patio de maduración. Esta actividad tuvo lugar tomando en cuenta los siguientes indicadores de que la masa se había estabilizado (Jiménez y García, 1992):

- Cuando se percibió que no existe más liberación de lixiviados de la masa en compostaje.
- Cuando se registró mediante la sonda termométrica, la reducción significativa en la temperatura de las pilas, acercándose a la temperatura ambiente.
- Cuando no ser registró incremento de temperatura, luego de un volteo.

En función a lo mencionado, bajo las condiciones ambientales del área, ello ocurrió a partir de los 45 días de iniciado el proceso de compostaje.

En el Patio de Maduración se conformaron pilas de manera similar a las pilas de compostaje. Debido a que el material se encuentra en fase final de estabilización o "etapa de maduración" no se realizaron volteos o riegos a fin de promover los procesos naturales de humificación y otras reacciones bioquímicas que enriquecen el producto final. Aunque las pilas permanecieron estáticas, se continuó con el registro de temperatura a fin de verificar que no ocurra ningún indicativo de nuevos procesos fermentativos. En tal sentido, las pilas permanecieron en estas condiciones por un periodo de 15 días adicionales, periodo en el cual se redujo su humedad que al final del proceso de maduración fue del 25 al 30%.

3.3.1.7. Proceso de afino

La etapa final del procesamiento consiste en el Afino, Cernido y Embolsado del producto final lo cual ocurrió en el Galpón destinado para el efecto. En este sentido se trasladó el compost maduro desde el patio de maduración para proceder al cernido con zaranda metálica de 1,0 cm de luz (grilla de 1,0 x1,0).

Paralelamente fueron retirados mediante selección visual y manual, materiales considerados en la lista de "impropios" que aún se encontraban en el compost, los cuales fueron depositados en un contender móvil para su envío al relleno sanitario.

Por otro lado, los materiales orgánicos que permanecieron íntegros (principalmente chips) finalizado el proceso de compostaje y que, por su mayor tamaño, no pasaron por la zaranda

fueron enviados al área de dosificación para ser nuevamente introducidos como ingredientes para la mezcla a la vez que actúan como fuente de inoculo bacteriano.

Figura 14. Poceros de afino, cernido y embolsado de compost

3.3.2. Variables de respuesta

3.3.2.1. Temperatura y humedad durante el proceso de compostaje

Se tomó la temperatura de la masa a 50 cm de profundidad en cada pila de compost a cada tres días mediante una sonda termométrica digital, a la misma hora, dos veces al día. La humedad se tomó mediante un sensor digital.

3.3.2.2. Variación del volumen durante el proceso de compostaje

La variación del volumen durante el proceso de compostaje se evaluó a cada quince días registrando las dimensiones que indican la reducción del volumen en cada pila (m^3).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

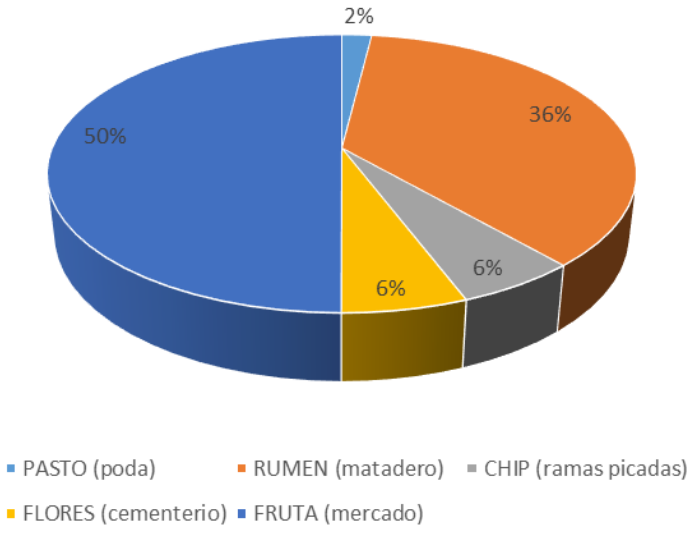
4.1. Cantidad de materiales procesados

En la siguiente figura se presenta un resumen histórico de la cantidad de residuos que ingresaron a la Planta desde la fecha de inicio hasta el final de la investigación. Se recibieron en promedio 3,38 t/día de residuos (residuos orgánicos conteniendo impropios.

Fuente: elaboración propia con datos de campo

Figura 15. Cantidad de residuos que ingresaron a la Planta

En la siguiente Figura se muestran las distintas proporciones de los materiales ingresados.



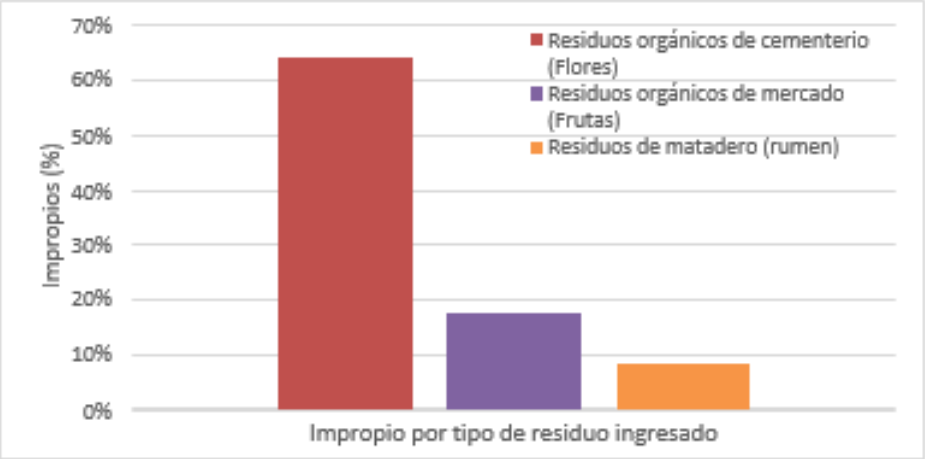
Fuente: elaboración propia con datos de campo

Figura 16. Proporción de residuos que ingresaron a la Planta, por tipo

Un 50% del material orgánico a procesar lo conforman los residuos de los mercados (“fruta”) seguidos del “rumen”. Otros materiales como restos de césped y poda constituyen del 2 al 6 % del total.

4.2. Contenido de impropios

Pese a la separación en origen a la que fueron sometidos los residuos, se observó un volumen apreciable de materiales no aptos para el compostaje. La proporción de impropios según la fuente se presenta en la siguiente Figura.



Fuente: elaboración propia con datos de campo

Figura 17. Proporción de impropios obtenidos según fuente.

Destacan los residuos provenientes del Cementerio General (contaminados principalmente con plásticos) y del Matadero Municipal (contendiendo restos de cuero, cuernos y eventualmente vísceras). La diferencia de estos materiales con respecto al peso bruto de los residuos que ingresaron fue de 277 kg.

4.3. Resultados del control de temperatura

Los datos de temperaturas tomados con sonda termométrica automática verificaron una óptima actividad microbiológica, con temperaturas siempre superiores a los 60°C, lo cual garantizó la eficiencia del proceso de compostaje en el saneamiento y reducción o eliminación de patógenos además de la reducción del volumen de la mezcla compostada.

Conforme se aprecia en la siguiente Figura las temperaturas fuero incrementando desde la temperatura ambiente hasta los 71°C.

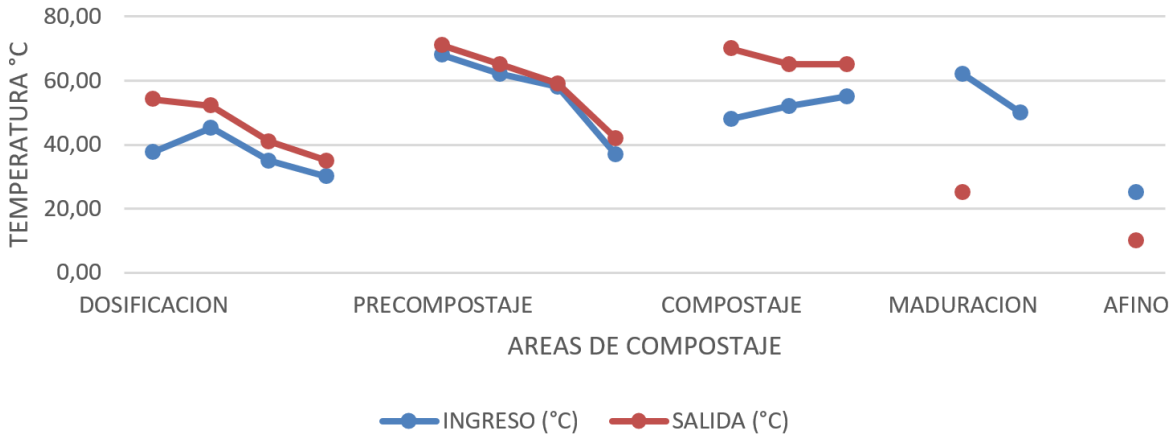


Figura 18. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje

Cabe aclara que debido a la temporada invernal se ha verificado un descenso significativo de las temperaturas ambientales, lo cual ha incidido ligeramente en los registros. Por otra parte, luego de concluido el periodo de maduración las pilas presentaron temperaturas estabilizadas en equilibrio con el ambiente. Los valores condicen con los mencionados por Roman *et al*. (2013b) quien indica una temperatura oprima de 65°C siendo deseable u descenso paulatino para garantizar la higienización.

4.4. Resultados del control de humedad

La evolución de los valores de humedad, se presentan en la siguiente Figura.

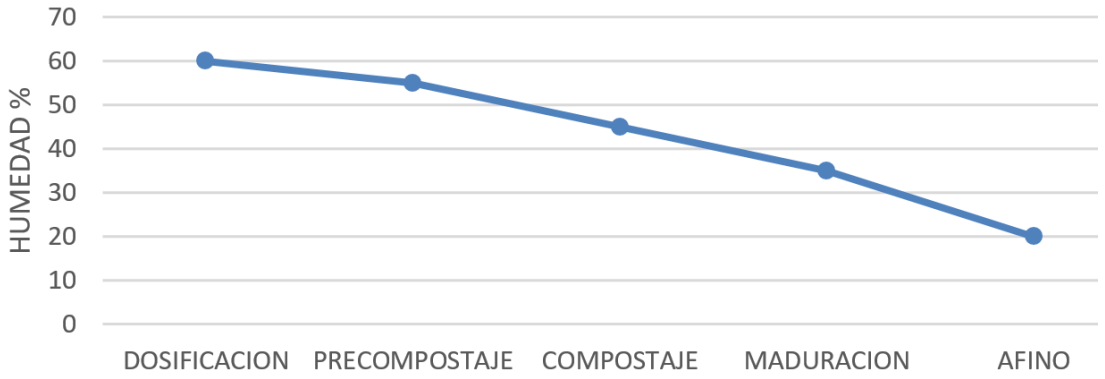


Figura 19. Evolución del contenido de humedad durante el proceso de compostaje.

Conforme se muestra en la anterior Figura, los sustratos “frescos” poseen contenidos acuosos de más del 65%, disminuyendo hasta un 20%. No es recomendable que el producto final posea valores inferiores lo cual afecta su calidad microbiológica.

4.5. Resultados durante el proceso de dosificación

En el siguiente cuadro se presentan los datos obtenidos en los rupos de pilas conformadas en el área de dosificación. Se observan densidades medias relativamente bajas.

Cuadro 7. Registro de datos en pilas de dosificación (D1 y D2)

CÓDIGO	VOLUMEN INGRESO (m^3)	VOLUMEN SALIDA (m^3)	REDUCCION VOLUMEN (m^3)	DENSIDAD MEDIA (kg/m^3)	PESO INICIAL (kg)	PESO SALIDA (kg)	REDUCCION EN PESO (kg)
D1	172.62	131.11	41.51	462.67	76498.7	57129.67	19369.03
D2	214.68	130.6	84.08	544.5	131641.2	77760.67	53880.53
TOTAL	387.3	261.71	125.59		208139.9	134890.34	

Fuente: elaboración propia con datos de campo

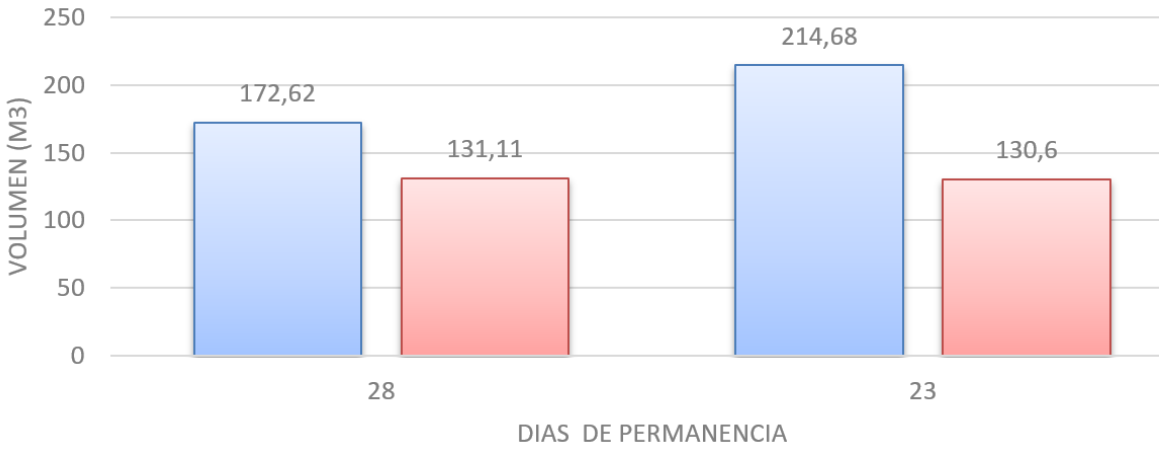


Figura 20. Reducción de volúmenes en pilas de dosificación D1 y D2

Como se observa en la anterior Figura, en las pilas D1 y D2 se tuvo una reducción de volumen de 41,51 m3 (de 172,62 m3 a 131.11 m3). El segundo grupo tuvo una reducción de 84,08 m3.

En el siguiente cuadro se muestra la reducción de volumen en los grupos 3 y 4. En D3 se tuvo una reducción de 8,86 m3.

Cuadro 8. Registro de datos en pilas de dosificación (D3 y D4)

CÓDIGO	VOLUMEN INGRESO (m^3)	VOLUMEN SALIDA (m^3)	REDUCCION VOLUMEN (m^3)	DENSIDAD MEDIA (kg/m^3)	PESO INICIAL (kg)	PESO SALIDA (kg)	REDUCCION EN PESO (kg)
D3	26.3	17.44	8.86	697	18331.1	12155.68	6175.42
D4	67.2	36.68	30.52	541	36355.2	19843.88	16511.32
TOTAL	93.50	54.12	39.38		54686.3	31999.6	22686.74

Fuente: elaboración propia con datos de campo

En la siguiente Figura se aprecia la reducción de volúmenes de ingreso y salida para cada pila

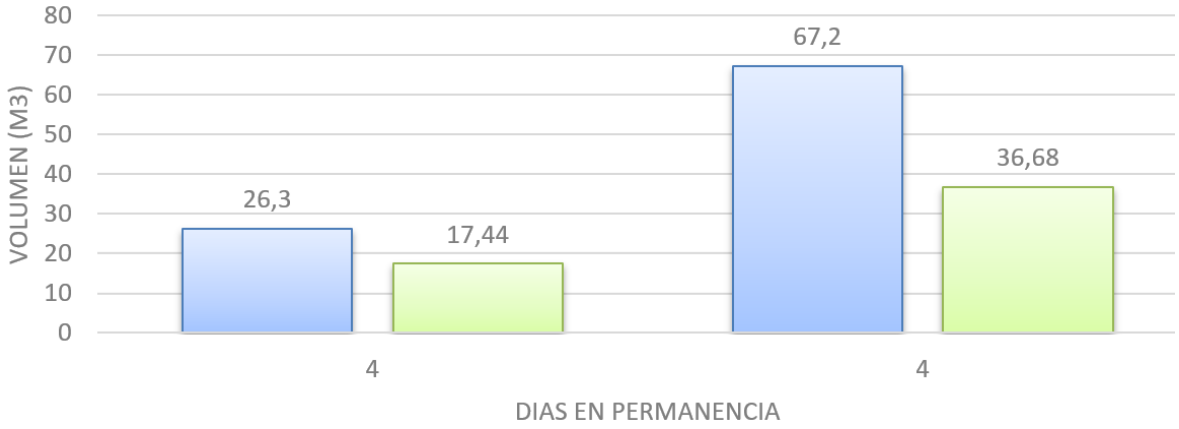


Figura 21. Reducción de volúmenes en pilas de dosificación D3 y D4

4.6. Resultados durante el proceso de pre-compostaje

En el siguiente Cuadro se presentan los datos de las pilas conformadas en el área de pre-compostaje. Para PC1 el volumen de ingreso fue de 60,12 m^3 registrándose una temperatura máxima en la masa de 68°C. El volumen de salida fue de 55,27 m^3 llegando a 71°C. Se tuvo una reducción de 4,86 m^3.

Cuadro 9. Registro de datos de las pilas conformadas en el área de pre compostaje.

CÓDIGO	VOLUMEN INGRESO (m^3)	VOLUMEN SALIDA (m^3)	REDUCCION VOLUMEN (m^3)	DENSIDAD MEDIA (kg/m^3)	PESO INICIAL (kg)	PESO SALIDA (kg)	REDUCCION EN PESO (kg)
PC1	60.12	55.27	4.86	295	17735.4	16304.65	1430.75
PC2	83.99	63.89	20.1	580	48714.2	37056.2	11658
PC3	68.61	55.57	16.59	707	48507.27	39287.99	9219.28
PC4	49.44	43.39	6.04	836	41331.84	36274.04	5057.8
TOTAL	262.16	218.12	47.59		156288.71	128922.88	27365.83

Fuente: elaboración propia con datos de campo

En la siguiente Figura se aprecia la reducción de volúmenes de ingreso y salida para cada pila.

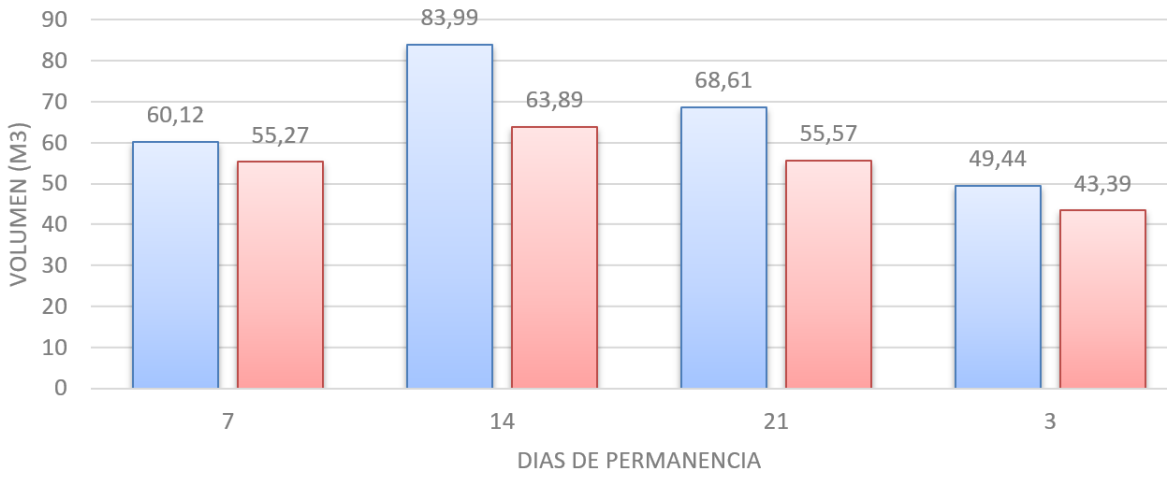


Figura 22. Reducción de volúmenes en pilas de pre-compostaje

La anterior Figura muestra para PC2 una reducción de 83.99 m^3 a 63,89 m^3 (20,01 m^3 de diferencia a los 14 días de permanencia). La temperatura registrada osciló entre 62°C a 65°C mostrando la efectividad del proceso.

4.7. Resultados durante el proceso de compostaje

El registro de datos de las pilas conformadas en el área de compostaje se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 10. Registro de datos de las pilas conformadas en el área de compostaje.

CÓDIGO	VOLUMEN INGRESO (m^3)	VOLUMEN SALIDA (m^3)	REDUCCION VOLUMEN (m^3)	DENSIDAD MEDIA (kg/m^3)	PESO INICIAL (kg)	PESO SALIDA (kg)	REDUCCION EN PESO (kg)
C1	85.58	55.77	29.81	359	30723.22	20021.43	10701.79
C2	70.05	48.33	21.72	596	41749.8	28804.68	12945.12
C3	60.1	53.93	6.17	705	42370.5	38020.65	4349.85
TOTAL	215.73	158.03	57.7		114843.52	86846.76	27996.76

Fuente: elaboración propia con datos de campo

En la siguiente Figura se aprecia la reducción de volúmenes de ingreso y salida para cada pila.

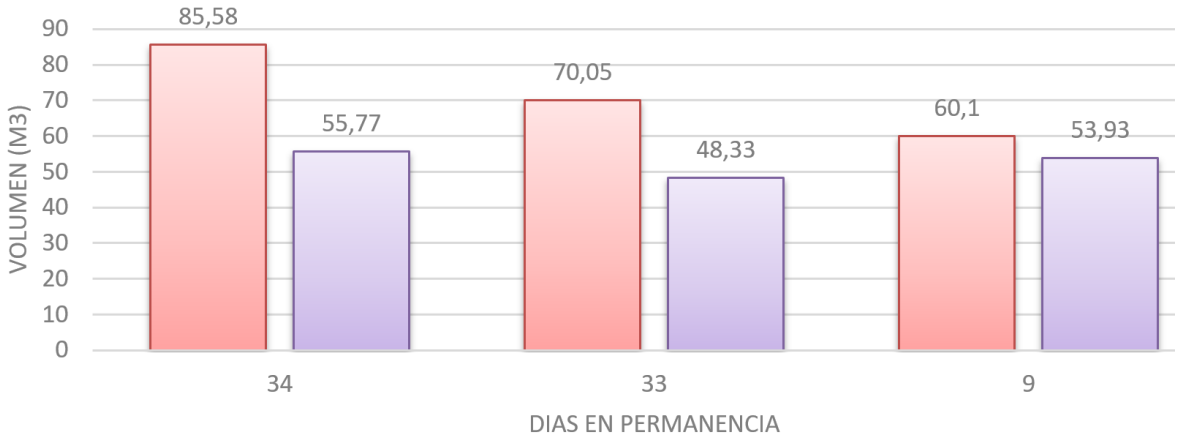


Figura 23. Reducción de volúmenes en pilas de compostaje

El proceso de compostaje con aireación forzada aplicado a la pila C1 con 85,58 m^3 de volumen de ingreso y 55,77 m^3 de salida alcanzó 70°C de temperatura lográndose una reducción de 29,81 m^3 de volumen durante 34 días de permanencia en el área y sometida a un volteo a las dos semanas.

Ya en C2 (sin aireación forzada), se tuvo una reducción de 21,72 m^3 de volumen durante 33 días con temperaturas menores oscilando entre 52°C a 65°C. Los datos indican que la aireación forzada genera condiciones levemente superiores en las condiciones térmicas de

la masa. No obstante, no se observó un perjuicio al proceso en las pilas que no recibieron aireación.

En la etapa de maduración las temperaturas de las pilas se estabilizaron en torno de 25°C luego de lo cual el compost obtenido fue trasladado al área de afino.

4.8. Balance general del proceso

Producto del proceso de compostaje se obtuvieron los datos presentados en el siguiente cuadro.

Cuadro 11. Balance general del proceso

Detalle	Volumen (m^3)	Rendimiento del proceso %
Insumo /Inicial)	387,30	40,8
Producto (Final)	158,03	

Fuente: elaboración propia con datos de campo

4.9. Resultados de calidad del producto final

Los resultados de análisis de laboratorio realizados en la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés y Laboratorio PURUMA se muestran en el siguiente Cuadro debidamente respaldado en Anexo.

Cuadro 12. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del compost obtenido

Parámetro	Unidad	Valor
pH (en agua 1:2,5)		7.84
Conductividad eléctrica (en agua 1:2,5)	dS/m	2.33
Carbono orgánico total	%	33.9
Nitrógeno total	%	1.51
Nitratos	ppm	22
Amonio	ppm	567
Potasio total	ppm	4504
Fósforo total	ppm	12612
Granulometría	9,5 mm (%)	7.00

Parámetro	Unidad	Valor
	4,7 mm (%)	3.00
	2,0 mm (%)	26.00
	1,0 mm (%)	15.00
	0,5 mm (%)	15.00
	<0,5 mm (%)	34.00
Materia orgánica particulada(MOP)	Materia orgánica particulada (%)	16
	Material inorgánico (%)	15
Contenido de humedad	%	24.18
Coliformes fecales	UFC/g	897

Fuente: elaboración propia con datos de laboratorio

Al no existir en Bolivia una normativa específica para el control de calidad de enmiendas orgánicas como el compost de residuos orgánicos, se recurrió a la normatividad internacional existente, procediéndose a la comparación de los parámetros analizados y otras característicasfísicas.

La comparación de los resultados con la normatividad existente se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 13. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos según normativas internacionales

PARÁMETRO	NORMA ESPAÑOLA Y COLOMBIANA	CUMPLIMIENTO RESPECTO A LA NORMA
Olor	A tierra húmeda	Cumple
Temperatura	Estable después devolteo	Cumple
Color	Oscuro (castaño –negro)	Cumple
Humedad	<40%	Cumple
RESULTADOS ANALÍTICOS		
pH (en agua 1:2,5)	7,0 – 8,0	Cumple
Materia Orgánica total	Mayor a 25%	Cumple
Nitrógeno total	Mayor a 1%	Cumple
Fósforo total (en P2O5)	Mayor a 1%	Cumple
Relación C/N	Menor a 20	Cumple parcialmente (Cocienteobtenido 22,45)
Granulometría	90 % pasa por malla de25 mm	Cumple
Coliformes fecales	Menor a 1000 UFC/g	Cumple

Fuente: elaboración propia con datos de laboratorio

Los resultados muestran que el compost obtenido posee un buen grado de estabilidad y propiedades físico - químicas que brindan la posibilidad de su aplicación al suelo sin riesgo de ocasionar efectos adversos, tanto sobre las plantas como sobre el medio ambiente o la salud pública. Se considera que el producto obtenido cumple con los requisitos mínimos para ser considerado como enmienda orgánica se según la normatividad española (Real Decreto 824/2005, Real Decreto 506/2013). Se ha evidenciado también que se cumplieron con los criterios higiene exigidos en el Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, sobre la puesta en el mercado de productos fertilizantes.

La similitud del producto obtenido con sustratos de jardinería hace que pueda ser considerado como un buen sustituto a la turba o “tierra vegetal” apta para viveros. Por otro lado, la notable presencia de elementos como fosforo y nitrógeno le confieren la cualidad de fertilizante, entendiendo como fertilizante a aquellas sustancias que añadidas al suelo son capaces de actuar en sentido positivo sobre la fertilidad del medio edáfico una vez que contiene los elementos esenciales para la planta, con potencialidad para cederlos.

Por su reacción (pH) ligeramente alcalino, el material se puede considerar a su vez como una enmienda orgánica, ya que puede modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y a la vez actuar como corrector orgánico, ya que puede mejorar el pH del suelo.

Según los estándares de la normativa colombiana NTC 5167 (31-05-2004), las características del compost cernido son adecuadas y garantizan la calidad del mismo, así como la posibilidad de su uso tanto en suelos agrícolas, como en áreas públicas urbanas (parques y jardines, paisajismo) y prioritariamente en zonas sujetas a procesos erosivos que presentan déficits importantes en el contenido de materia orgánica (normalmente inferior al 1%). El producto obtenido, inclusive sin pasar por malla es ideal para la restauración de áreas degradadas. tiene los elementos esenciales para la planta, con potencialidad para cederlos.

Según Reategui (2006) el pH próximo a la neutralidad del compost brinda un mejor ambiente para los organismos y la disponibilidad de nitrógeno y fósforo asimilables. De manera similar Castillo (2006) reporta contenidos elevados de fósforo y potasio en compost con pH neutro.

4.10. Costos operativos y administrativos de la planta de compostaje

4.10.1. Costos operativos de la maquinaria

El consumo de combustible de la maquinaria (volqueta y otros) calculado en función a un equivalente aproximado de 10 L/h de trabajo continuo arrojó los datos que constan en el siguiente Cuadro.

Cuadro 14. Costo de operación de maquinaria durante el proceso

EQUIPO	FRECUENCIA	TIEMPO (h)	h/día	COSTO Bs/h	COSTO TOTAL (Bs)
Retroexcavadora	37	164.90	4.46	191.87	31639.36
Volqueta	18	62.50	3.47	186.64	11665.00
Tractor	15	45.20	3.01	120.00	5424.00
Total:	70	272.60	3.65		48728.36

4.10.2. Consumo de agua en el proceso de compostaje

El consumo de agua en las pilas de compostaje fue minimizado al máximo, aun así, fue necesaria la aplicación de riego en las pilas a fin de mantener condiciones óptimas para los microorganismos. Considerando el tiempo de permanencia de las pilas en las áreas, un tiempo de aplicación de 2 a 3 horas cada dos días, suficiente para humedecer una pila durante una semana aproximadamente y aplicando un caudal aproximado de 0,06 L/s se estima un consumo de 1296 L/riego. De lo mencionado se obtienen los resultados presentados en el siguiente cuadro:

Cuadro 15. Consumo de agua para riego en las diferentes áreas de trabajo

ÁREA	PERÍODO	VOLUMEN RIEGO (L)	VOLUMEN RIEGO (m^3)
Dosificación	16/5/2022 al 26/8/2022	11210	11.21
Pre-compostaje	1/6/2022 al 26/8/2022	8225	8.23
Compostaje	7/6/2022 al 26/8/2022	15540	15.54
Total	12/7/2022 al 26/8/2022	34975	34.98

Considerando una tarifa de agua comercial que asciende a 12,4 Bs/m³, se obtiene que el costo del agua utilizada para la aplicación del riego asciende a 433,69 Bs.

4.10.3. Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica por el sistema de aireación forzada con una frecuencia de 15 min de encendido por 30 min de descanso, considerando un horario de 10 am a 4 pm (6 horas/día) demanda 120 min/día (2 h/día) de funcionamiento. Con base en dichos datos se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 16. Consumo de energía eléctrica

VARIABLE	CANTIDAD	UNIDAD
Voltaje	220.00	V
Corriente	8.33	A
Potencia	1832.60	W
	1.83	kW
Consumo100% de operación	1832.60	W/h
Tiempo de funcionamiento	6.00	h
funcionamiento efectivo	20.00	min/h
	33%	
Consumo efectivo horario	610.87	W/h
	0.61	kW/h
Tarifa consumo	1.19	kW/h Bs
	4.35	Bs/día
Días de funcionamiento (periodo7/6/2022 al 26/8/2022)	80	días
Consumo total	348.00	Bs

4.10.4. Resumen de costos operativos y administrativos

En el siguiente Cuadro se resumen los costos operativos y administrativos:

Cuadro 17. Costos administrativos y de operación

Concepto	Costo (Bs)
Personal y administración	88686.00
Maquinaria	48728.36
Servicios básicos (agua y electricidad)	781.69
Total	138196.05

5. CONCLUSIONES

Según los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente estudio, se plantean las siguientes conclusiones:

- La aplicación de aireación forzada en el proceso de compostaje promovió una aceleración del proceso y mayor elevación de temperatura respecto a las pilas que no tuvieron aireación.
- La aireación y adecuada dosificación de la mezcla utilizadas mostraron un buen desempeño a nivel térmico, promoviendo temperaturas que alcanzaron 71ºC garantizando el saneamiento e inactivación de posibles patógenos y por ende la higienización de los productos.
- El rendimiento del proceso luego del proceso de compostaje en pilas aeróbicas fue del 40,8%.
- Los resultados del análisis de laboratorio indican una buena calidad e inocuidad del producto obtenido y su potencial para utilización agrícola, restauración de área degradas u otros usos.
- El compostaje en pilas aeróbicas con aireación forzada se ha mostrado como una alternativa técnicamente factible y al alcance de la gestión municipal urbana.

6. RECOMENDACIONES

Producto de los análisis de resultados obtenidos en la investigación se tienen las siguientes recomendaciones.

- Para las futuras investigaciones de compostaje se deben probar diversas sustancias activadoras que aceleren el proceso.
- Se deben emprender ensayos agronómicos para probar el valor fertilizante, ausencia de compuestos fitotóxicos y otros parámetros de calidad de los productos obtenidos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, Y. 2006. Métodos para el Análisis del Compost, Creación de módulos de enseñanza para alternativas de preparación de compost y el análisis de calidad del mismo. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. 75, 58, 75 p.

Amachuy, A. 2013. Efecto de tres dosis de humus de lombriz provenientes de residuos sólidos orgánicos urbanos en el cultivo de acelga (Beta vulgares) en la zona de Mallasa. La Paz – Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés.

Barradas, R. 2009. Gestión integral de residuos sólidos municipales estado del arte. Minatitlán, Veracruz, México. Disponible en disponible en: https://oa.upm.es/1922

Bidlingmaier, W. 1996. Odour emissions from composting plants Professional, London. . London. Blackie Academic & Professional, London. pp. 71-79. p. (The Science of Composting)

Bolivia, (2012). Producción de Abonos y Fertilizantes VICEMINISTERIO DE BOLIVIA. BOLIVIA, SEDEM: 6.

Bomfim, A.S.C.D., De Oliveira, D.M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., y Rodriguez, D., 2022. Spent coffee grounds characterization and reuse in composting and soil amendment. Waste 1(1), 2-.20.

Castillo, C. (2006). ELABORACIÓN DE COMPOST EN MANIZALES A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS URBANOS. lunazul.ucaldas.edu.co - ELABORACIÓN DE COMPOST EN MANIZALESAP...25/08/2006http://lunazul.ucaldas.edu.co/index2.php?option=com_content&task=view&id=239&I... 5.

Cespedes, C. 2010. Elaboración de compost. Ed. E Arica. Arica. Seminario internacional sobre manejo integrado de mosacas de importancia sanitaria y de residuos asociados a las actividades agropecuarias. 5,69,73 p.

Delgado, M., et al. (2020). "EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS AVÍCOLAS EMPLEANDO DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS." 35: 4.

E.M.A.V.I. 2011, 2015. Manual de Operaciones Planta de Compostaje UTRO - Villazón. ULTRA Villazon. EMAVI, Entidad municipal de aseo villazon. 10, 11, 12 p.

Fernandez, M.;Gomez, J. y Estrada, Y. 2004. Compost legislation: sanitation vs Biological quality. I International Conference Soil and Compost Eco-Biology. León - Spain 167, 183 p. Disponible en http://www.bpeninsular.com/pdfs/COMPOST_LEGISLATION.pdf

GAMLP, S. 2004. Plan de cierre del Relleno Sanitario de Mallasa. *In*. 2004. RIO_DE_MALLASA_EVALUACION. p. Disponible en Disponible en: www.academia.edu/30318627/EL_PLAN_DE_CIERRE_DEL_RELLENO_SANITA

Campos-Alba C.; Garrido-Rodríguez J.C.; Plata-Díaz A.M. y Pérez-López G. 2021. The selective collection of municipal solid waste and other factors determining cost efficiency. An analysis of service provision by Spanish municipalities. Waste Manage.134,11-20.

Jimenez, E. I., y García, V. P. 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. Agriculture, ecosystems & environment, 38(4), 331-343.

Kulcu, R. y Yaldiz, O. 2004. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. Biores. Technol., 93 (1). 49, 57 p. Disponible en https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14987720/

Mitma, R. 2015. Evaluación de parámetros de temperatura, pH y humedad para el proceso de compostaje en la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos de la provincia de Leoncito Prado. Tingo Maria – Peru. 159 p. Disponible en 159

Paez, O. 2021. Compost y Compostaje: Conceptos básicos. Place Published. Disponible en https://opanatura.com/compost-y-compostaje/

PURUMA (2017). "HUMUS DE LOMBRIZ PURUMA." from https://www.puruma.org/.

Reategui, K. (2006). "EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE EM-COMPOSTUTILIZANDO AIREACIÓN FORZ ADA Y RESIDUOS DE BANANO." Las Mercedes de Guácimo: 172.

Restrepo, J. y Rodriguez, J. 2002. El suelo, la vida y los abonos orgánicos,. Ed. editorial enlace. Managua, Nicaragua, SIMAS, CICUTEC. Disponible en https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UNANL.51303.

Rodriguez, J. 2009. Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), dencada distrito de Grecia, cantón de Alajuela. . Place Published, 125 – 134.

Roman, P.;Martines, M. y Pantoja, A. 2013a. MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR Experiencias en América Latina. América Latina y el Caribe

Santiago de Chile. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf

Roman, P.;Martínez, M. y Pantoja, A. 2013b. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Santiago, Chile. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en «Compostaje domiciliario en la producción de abono en la huerta agroecológica».

SENAMHI. 2019. Base de datos meteorológicos de Calacoto. Place Published. Disponible en Disponible en: senamhi.gob.bo/index.php/sismet.

Soliva, M. y Lopez, M. 2004. Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. Editorial Valsaín. Formación de técnicos para el tratamiento y gestión de lodos de depuradora. 56, 89, 10 p.

Soto, M. 2002. Abonos organicos El proceso de compostaje. Departamento de agricultura. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza ((CATIE)) Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/74/Abonos_organicos_para_la_Produccion_sostenible_de_tomate.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tomati, U.;Madejon, E. y Galli, E. 2000. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. Compost Sci. Util., 8 (2): 108-115. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/261630567_Evolution_of_Humic_Acid_Molecular_Weight_As_an_Index_of_Compost_Stability

UNIVERSAL, S. (2020). "Humus de lombriz: todo lo que necesitas saber." from https://sustratouniversal.es/blog/humus-de-lombriz-todo-lo-que-necesitas-saber/.

Uribe, L. 2003. Taller de abonos orgánicos: Memoria. San Joise, Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas Cámara de Insumos Agropecuarios No Sintéticos. Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3060.

Vargas, O., et al. (2019). "El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento ": 7.

Villada, L. and J. Quintero (2019). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE MEDIANTE AIREACIÓN FORZADA Y EL MICROORGANISMO ENDÓGENO Bacillus Subtillis PARA LA TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DOMICILIARIOS, COMO MEJORA A LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL, Universidad Católica de Oriente (UCO). Estudiantes Ingeniería Ambiental.

Zamora, J.;Mendez, R. y Gutierrez, V. 2013. Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos. MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos, mediante Compostaje y Lombricultura, 2012 ed. Bolivia. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA. 152 p. Disponible en https://redcompostaje.mmaya.gob.bo/files/biblioteca/04%20GUIAS%20MANUALES/201%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20S%C3%B3lidos%20Org%C3%A1nicos.pdf

Zhu, N. 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. Bioresource technologi. . Biores. Technol. 97 (15): 1870-1875. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/7552185_Composting_of_high_moisture_content_swine_manure_with_corncob_in_a_pilot-scale_aerated_static_bin_system

8. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis (Laboratorio PURUMA

PURUMA Agricultura Regenerativa
Laboratorio AgroAmbiental
"La Casa del Agricultor"

N° PURUMA 051- 2022

ANÁLISIS FÍSICO-QUIMICO DE ORGÁNICOS

Cliente	Ing. Diego Tola A.
Responsables de análisis	*Ing. Daniela Ninoska Tola Garfias* **ANALISTA DE LABORATORIO**
Responsable de muestreo	Ing. Diego Tola A.
Fecha de recepción de muestra	8/08/2022
Fecha de emisión de informe	22/08/2022
Código de la muestra	**CP-MLP-01a**
Código Laboratorio	**LMS-024**

RESULTADOS

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR	MÉTODO
pH en H_20 relación 1:2,5	-	**7,84**	Potenciometría
Conductividad eléctrica en H_20 relación 1:2,5	dS/m	**2,33**	Potenciometría
Carbono Orgánico total	%	**33,9**	Ignición
Nitrógeno total	%	**1,51**	Kjeldahl
Nitratos	ppm	**22**	Ión selectivo (EIS)
Amonio	ppm	**567**	Ión selectivo (EIS)
Potasio total	ppm	**4504**	Espectrofotómetro de Absorción atómica
Fósforo total	ppm	**12612**	Espectrofotómetro UV-visible

CONTACTOS: Empresa: *Avenida Hacia el mar, Urb: CBN, Viacha #2045* **Oficina:** *Edificio Krsul Piso 8 of.: 807- Av. Camacho, La Paz,*
Correo Electrónico: *puruma.bolivia@gmail.com* **Redes sociales:** *Puruma* **Celular**: *+591 74015451; +591 77732819*

PURUMA Agricultura Regenerativa
Laboratorio AgroAmbiental
"La Casa del Agricultor"

PARAMETRO		UNIDAD	VALOR	MÉTODO
Granulometría	**Apertura de malla**	-	-	Tamizado
	9,5 mm	%	**7,00**	Nº de malla 3/8 in, 4, 10, 18 y 35
	4,7 mm	%	**3,00**	
	2,0 mm	%	**26,00**	
	1,0 mm	%	**15,00**	
	0,5 mm	%	**15,00**	
	< 0,5 mm	%	**34,00**	
Materia Orgánica Particulada (MOP)	Materia Orgánica particulada	%	**16**	Tamizado en Húmedo
	Material Inorgánico	%	**15**	
Contenido de Humedad		%	**24,18**	Gravimétrico
Coliformes totales		UFC/g	**897**	Membrana filtrante

LABORATORIO AGROAMBIENTAL "LA CASA DEL AGRICULTOR" PURUMA

Ing. Miguel Angel Lopez
Responsable de Laboratorio
PURUMA Agricultura Regenerativa

CONTACTOS: Empresa: *Avenida Hacia el mar, Urb: CBN, Viacha #2045* **Oficina:** *Edificio Krsul Piso 8 of.: 807- Av. Camacho, La Paz,*
Correo Electrónico: *puruma.bolivia@gmail.com* **Redes sociales:** *Puruma* **Celular**: *+591 74015451; +591 77732819*

PURUMA Agricultura Regenerativa
Laboratorio AgroAmbiental
"La Casa del Agricultor"

N° PURUMA 051- 2022

ANÁLISIS CROMATÓGRAFICO DE ORGANICOS

Cliente	***DIEGO TOLA***
Código de la muestra	*CP-MLP-01a*
Código Laboratorio	*LMS-024*

RESULTADOS

Muestra: CP-MLP-01a

Interpretación

El análisis cromatógrafo identifica que dentro de la zona central existe una buena porosidad del abono, asimismo en la zona mineral se puede apreciar la integración del material inorgánico y orgánico, además de una adecuada disponibilidad de nutrientes. Si bien existe un grado de maduración casi completa del abono, la presencia del anillo concéntrico indica la falta de humificación de una parte del material orgánico particulado. Del mismo modo en la zona externa se puede apreciar nubosidades, propiedad que caracteriza la buena presencia de nutrientes y una deseada actividad enzimática.

LABORATORIO AGROAMBIENTAL "LA CASA DEL AGRICULTOR" PURUMA

Ing. Miguel Angel Lopez
Responsable de Laboratorio
PURUMA Agricultura Regenerativa

CONTACTOS: Empresa: *Avenida Hacia el mar, Urb: CBN, Viacha #2045* **Oficina:** *Edificio Krsul Piso 8 of.: 807- Av. Camacho, La Paz,*
Correo Electrónico: *puruma.bolivia@gmail.com* **Redes sociales:** *Puruma* **Celular**: *+591 74015451; +591 77732819*

Anexo 2. Resultados de análisis (Laboratorio UMSA).

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
LABORATORIO DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA EN SUELOS Y AGUAS (LAFASA)

LAFASA
Laboratorio de la Facultad de Agronomía en Suelos y aguas

RES: FAC.AGRO.LAB. N°137

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

INTERESADO: Diego Orlando Tola Aguilar
SOLICITUD: LAF 137_22
FECHA DE ENTREGA: 18/08/2022
PROCEDENCIA: Departamento La Paz
Municipio
Provincia
Comunidad
Código

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
Humedad Gravimétrica	%	20	Gravimétrico
pH en H2O relación 1:5	-	8.10	Potenciometría
Conductividad eléctrica en agua 1:5	mmhos/cm	2.47	Potenciometría
Nitrógeno total	%	1.434	Kjendahl
Carbono orgánico	%	23.14	Walkley y Black

Ph.D. Roberto Miranda Casas
LABORATORIO DE SUELOS

Dirección: Av. Landaeta esq. Héroes del Acre N.° 1850,
Telf. IIAREN: 2484647 - 74016356 - 73075326 • **E-mail:** lafasa.suelos@gmail.com
Página web: agro.umsa.bo • La Paz - Bolivia