



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de una planta de compostaje de los residuos
sólidos orgánicos municipales de la ciudad de Cutervo**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Industrial y de Sistemas

Stefanny Castro Rubio

Asesor:
Dra. Ing. Bertha Susana Vegas Chiyón

Piura, julio de 2022



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, Teresa Noelina y José Alberto, porque me han dado todo en la vida sin esperar nada a cambio.

También va dedicado a mi familia, quienes han esperado ansiosamente este momento.





Agradecimientos

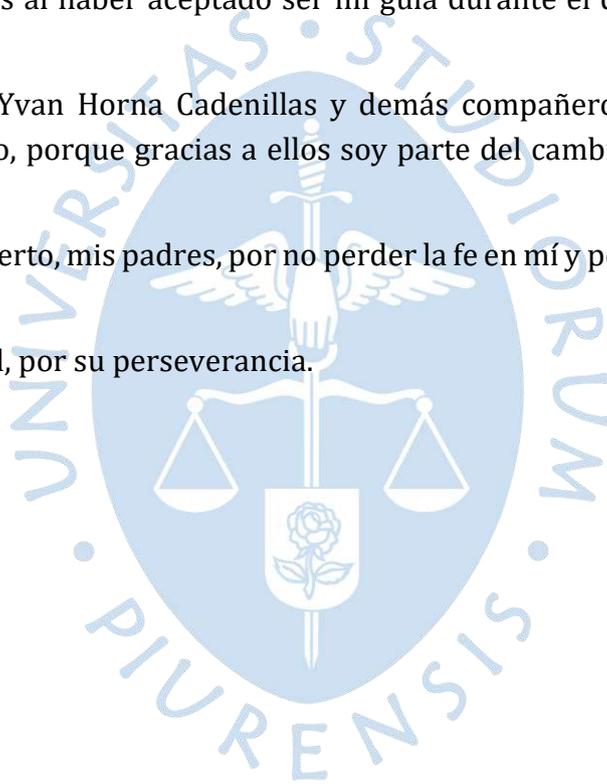
Agradezco a Dios por ser mi fuerza y mi soporte, sobre todo en los días difíciles.

A la Dra. Ing. Susana Vegas Chiyón, mi asesora de tesis, por su tiempo, dedicación y paciencia invertidos al haber aceptado ser mi guía durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Emer Yvan Horna Cadenillas y demás compañeros de la Municipalidad Provincial de Cutervo, porque gracias a ellos soy parte del cambio que quiero ver en el mundo.

A Teresa y Alberto, mis padres, por no perder la fe en mí y por alentarme a alcanzar esta meta.

A Oscar Daniel, por su perseverancia.





Resumen

En concordancia con los lineamientos para una gestión integral de residuos sólidos, y considerando que los orgánicos son los que se generan en mayor cantidad en la ciudad de Cutervo, se ha planteado el diseño de una infraestructura que permita su valorización, de modo que se disminuya la cantidad de basura dispuesta inadecuadamente en el botadero municipal a cielo abierto.

A lo largo de estas líneas se ha realizado el diagnóstico del manejo de residuos sólidos en la ciudad, así como la descripción de los aspectos técnico operativos para la implementación de una planta de compostaje de residuos orgánicos que aproveche de una forma más eficiente el espacio destinado para este fin.

El diseño se propone con el objetivo de ampliar la capacidad de producción de abono orgánico a través de la mejora del proceso actual del compostaje, de manera ambientalmente segura. Asimismo, se ha considerado el flujo de material que ingresa diariamente a la planta y los parámetros de control que intervienen en el proceso.

Se concluyó que se puede aumentar la capacidad de la planta hasta en un 400 %, al procesar hasta 700 toneladas de residuos orgánicos en un año operativo y obtener 175 toneladas de compost.



Tabla de contenido

Introducción.....	17
Capítulo 1. Planteamiento del estudio.....	19
1.1 Identificación del problema	19
1.2 Formulación del problema	22
1.3 Justificación del estudio.....	22
1.4 Objetivos del estudio.....	23
1.4.1 Objetivo general.....	23
1.4.2 Objetivos específicos.....	23
Capítulo 2. Gestión de los residuos sólidos	25
2.1 Gestión integral de los residuos sólidos	25
2.1.1 Generación.....	26
2.1.2 Segregación en la fuente	26
2.1.3 Almacenamiento.....	26
2.1.4 Recolección y transporte	26
2.1.5 Tratamiento.....	26
2.1.6 Disposición final.....	27
2.2 Gestión de los residuos sólidos en el Perú	28
2.3 Gestión actual de los residuos en Cutervo	29
2.3.1 Generación	29
2.3.2 Segregación en la fuente	30
2.3.3 Recolección y transporte de residuos	30
2.3.4 Valorización de residuos	30
2.3.5 Disposición final.....	32
Capítulo 3. Marco teórico.....	35
3.1 Residuos sólidos	35
3.1.1 Clasificación	35

3.1.2	Composición física.....	36
3.1.3	Tratamiento.....	37
3.2	Proceso de compostaje.....	40
3.2.1	Fases	41
3.2.2	Microorganismos eficientes	43
3.2.3	Evaluación de los parámetros físico - químicos	43
3.2.4	Beneficios e importancia del compost	44
Capítulo 4. Marco legal.....		47
4.1	Normativa general	47
4.2	Política Nacional del Ambiente (PNA)	49
4.3	Instrumentos para la gestión de residuos sólidos	49
4.4	Promoción de la valorización de residuos sólidos.....	50
4.5	Organismos reguladores de la gestión de residuos sólidos	51
Capítulo 5. Diseño de ingeniería		53
5.1	Aspectos técnico-operativos.....	53
5.1.1	Caracterización de los residuos sólidos del distrito de Cutervo	53
5.1.2	Cálculos y proyecciones para el diseño de la planta	56
5.1.3	Localización y tamaño de planta	65
5.2	Ingeniería y tecnología.....	71
5.2.1	Descripción del producto	72
5.2.2	Proceso productivo.....	73
5.2.3	Diseño del proceso.....	73
5.2.4	Balance de materia.....	76
5.2.5	Control del proceso.....	77
5.2.6	Dimensionamiento y distribución de planta	79
Capítulo 6. Evaluación económica del proyecto.....		85
6.1	Financiamiento.....	85
6.2	Impacto.....	85
6.2.1	Social.....	85
6.2.2	Ambiental.....	86
6.2.3	Gestión municipal.....	86
6.3	Presupuesto para la realización de la mejora planteada.....	86
6.3.1	Costos de construcción e implementación de la propuesta	86
6.3.2	Costos de operación.....	87
Conclusiones		89

Recomendaciones.....	91
Referencias bibliográficas	93
Apéndices.....	97
Apéndice 1. Programa de valorización de residuos orgánicos municipales	99
Anexos	115
Anexo A. Resultado del análisis de laboratorio.....	117





Lista de tablas

Tabla 1. Características del botadero El Infiernillo.....	19
Tabla 2. Composición física de los residuos sólidos domiciliarios	29
Tabla 3. Total de residuos tratados y de producto obtenido (en toneladas).....	31
Tabla 4. Manejo de residuos sólidos en Cutervo	32
Tabla 5. Composición física de los residuos sólidos municipales.....	36
Tabla 6. Composición física de los residuos sólidos domiciliarios de Cutervo	54
Tabla 7. Cantidad de residuos generados por las fuentes no domiciliarias	55
Tabla 8. Composición física de los residuos no domiciliarios.....	56
Tabla 9. Generación de residuos sólidos en Cutervo durante el año 2019.....	56
Tabla 10. Proyección de la población hasta el año 2026	58
Tabla 11. Proyección de los residuos a nivel domiciliario: años 2021-2026	58
Tabla 12. Proyección de los residuos sólidos no domiciliarios: años 2021-2026	59
Tabla 13. Proyección de la generación de residuos municipales	60
Tabla 14. Composición porcentual de los residuos orgánicos domiciliarios.....	60
Tabla 15. Porcentaje de residuos orgánicos aprovechables.....	61
Tabla 16. Residuos domiciliarios aprovechables a través del compostaje.....	61
Tabla 17. Composición física de los residuos orgánicos de los mercados	61
Tabla 18. Proyección de los residuos orgánicos provenientes de los mercados	62
Tabla 19. Cantidad de residuos orgánicos valorizables mediante el compostaje.....	62
Tabla 20. Cantidad de residuos que ingresaron a la planta de compostaje	63
Tabla 21. Densidad promedio de los residuos que ingresaron a planta.....	63
Tabla 22. Composición física de los residuos valorizados en la planta de compostaje	64

Tabla 23. Cálculo de la densidad promedio del estiércol de cuy	64
Tabla 24. Cálculo de la densidad de los restos de alimentos.....	65
Tabla 25. Cálculo de la densidad de la fracción vegetal.....	65
Tabla 26. Temperatura máxima, mínima y promedio mensual.....	66
Tabla 27. Coordenadas UTM WGS-84 Datum del terreno de la planta actual.....	67
Tabla 28. Requisitos para la implementación de una planta de compostaje.....	68
Tabla 29. Comparación del abono de acuerdo a su granulometría	72
Tabla 30. Capas que conforman una pila de compost.....	75
Tabla 31. Dimensiones de la pila	75
Tabla 32. Balance de materia de acuerdo al proceso	77
Tabla 33. Posibles dificultades a causa de una humedad inapropiada	79
Tabla 34. Materiales para la implementación de la planta de compostaje.....	86
Tabla 35. Mano de obra directa - salarios.....	87
Tabla 36. Materiales del proceso de compostaje	87



Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del botadero El Infiernillo	20
Figura 2. Zonas afectadas: La Succha y Yatún	20
Figura 3. Quebrada contaminada por residuos	21
Figura 4. Desperdicios acumulados en la zona baja del cerro Ilucán	21
Figura 5. Disposición final de los residuos sólidos en el botadero El Infiernillo.....	22
Figura 6. Transición hacia una economía circular.....	27
Figura 7. Composición porcentual de residuos sólidos a nivel nacional.....	29
Figura 8. Croquis de la planta de valorización de residuos orgánicos.	31
Figura 9. Vista de la planta de valorización de residuos orgánicos.....	32
Figura 10. Esquema de las fases del compostaje.....	42
Figura 11. Vértices del terreno destinado para el compostaje.....	67
Figura 12. Ubicación del sector Falso Paquisha.....	68
Figura 13. Distancia entre el vivero municipal y la planta de compostaje	69
Figura 14. Vía de acceso que rodea al barrio Buena Vista.....	69
Figura 15. Acceso a la entrada de la planta de compostaje.....	70
Figura 16. Recorrido de los vehículos desde el parque hasta la planta de compostaje.....	70
Figura 17. Longitud del recorrido: parque principal hasta la planta de compostaje	71
Figura 18. Diagrama del proceso de compostaje	76
Figura 19. Plano de distribución del nuevo diseño de planta.	82
Figura 20. Máquina picadora adquirida por la municipalidad	84



Introducción

En los países en desarrollo, la disposición final de los residuos sólidos en los botaderos se prioriza frente a alternativas de aprovechamiento y valorización, tales como el compostaje, el reciclaje, la recuperación de suelos o la generación de energía. Asimismo, los residuos orgánicos se caracterizan por ser la fracción predominante de los residuos sólidos municipales, y por presentar una mayor complejidad de tratamiento en comparación con otros residuos debido a sus características fisicoquímicas.

La ciudad de Cutervo, en el departamento de Cajamarca, es preponderantemente agropecuaria. No obstante, la contaminación por residuos sólidos es preocupante, y se explica por factores como el crecimiento desordenado de la ciudad, la educación ambiental precaria, y, sobre todo, por el ineficiente sistema de gestión de residuos sólidos municipales.

En el año 2016 se implementó una planta piloto de compostaje de residuos orgánicos, cuyo objetivo es disminuir el impacto de los residuos generados en la ciudad, sin embargo, desde su instalación, sus condiciones no han mejorado, ni se ha planteado la expansión del proyecto, por lo que la infraestructura no recupera los residuos sólidos de forma significativa.

Por lo expuesto, el presente estudio evaluará económica y técnicamente un diseño que permita incrementar la cantidad de residuos orgánicos valorizados, convirtiéndose en una herramienta de gestión para la Municipalidad Provincial de Cutervo.



Capítulo 1

Planteamiento del estudio

1.1 Identificación del problema

Uno de los principales problemas de la ciudad de Cutervo es la inadecuada disposición final de sus residuos sólidos, los cuales se eliminan a cielo abierto en la zona de El Infiernillo, a 3.33 kilómetros del centro de la ciudad, en la carretera Cutervo-Puerto Chiple. Las características del lugar se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Características del botadero El Infiernillo

Aspecto	Descripción
Ubicación geográfica	Cutervo, Cutervo, Cajamarca
Perímetro (m)	441.28
Área (m ²)	4762.38
Administrador del área degradada	Municipalidad Provincial de Cutervo
Denominación del área degradada	Botadero El Infiernillo
Este	742041
Norte	9296165
Zona	17
Cantidad que se dispone diariamente (t/día)	18

Fuente: Adaptado de Oefa (s.f.)

Esta zona se ha destinado como botadero desde hace más de cuatro décadas; sin embargo, no se ha considerado las medidas para la prevención y mitigación de los impactos tanto ambientales como sanitarios ocasionados por las actividades de disposición final y acumulación de residuos sólidos.

Geográficamente, El Infiernillo está ubicado en una zona accidentada, donde las constantes lluvias producen deslizamientos de tierra. Por otro lado, el agua natural que discurre del cerro Ilucán arrastra los residuos acumulados y sus lixiviados, contaminando las quebradas de la zona baja, que corresponde a las comunidades de La Succha y Yatún. Esta situación se agrava en la temporada de lluvias que dura desde octubre hasta mediados de mayo.

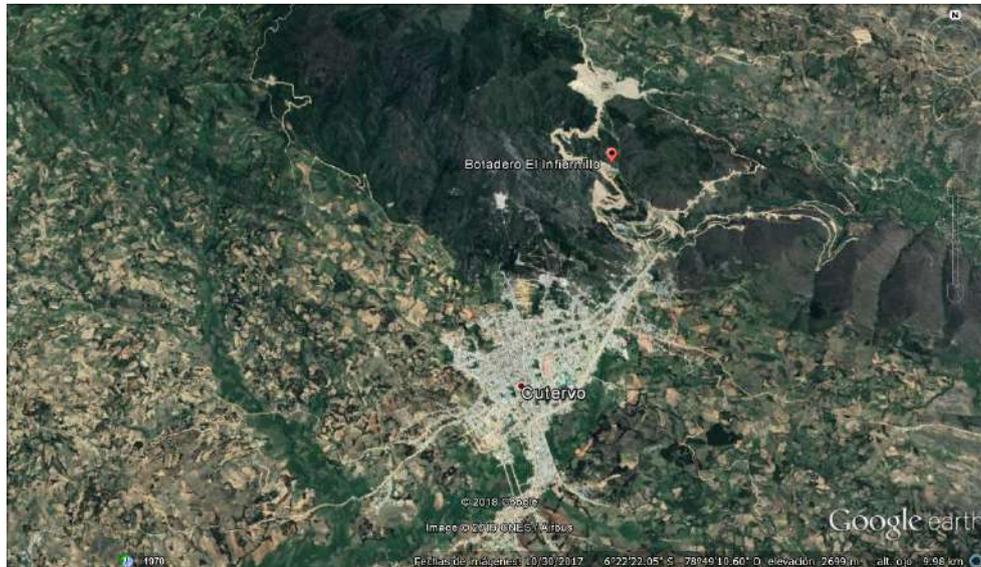


Figura 1. Ubicación del botadero El Infiernillo
Fuente: Google Earth (2018)

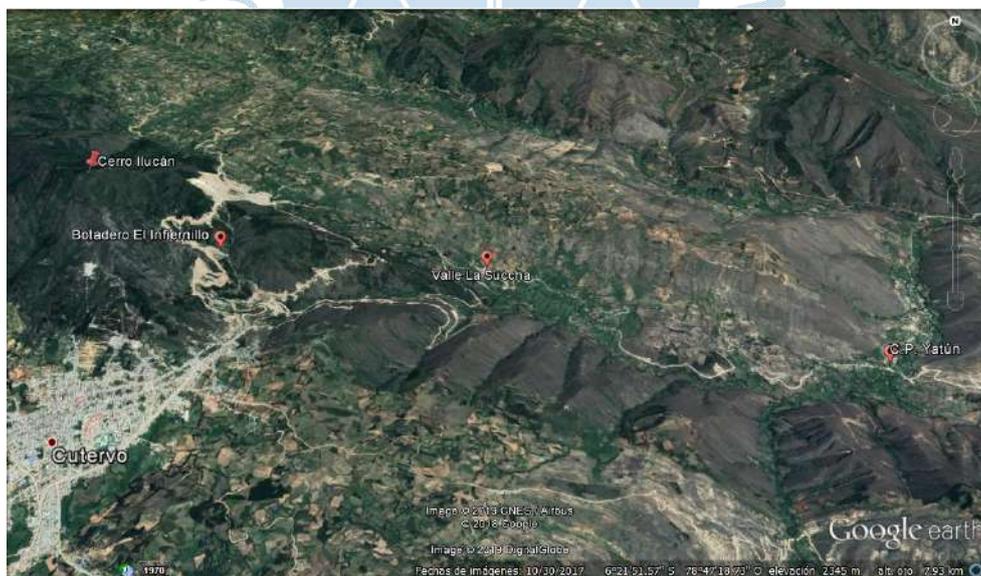


Figura 2. Zonas afectadas: La Succha y Yatún
Fuente: Google Earth (2019)



Figura 3. Quebrada contaminada por residuos
Fuente: Cutervo Cajamarca Perú (2017)



Figura 4. Desperdicios acumulados en la zona baja del cerro Ilucán
Fuente: Cutervo Cajamarca Perú (2017)

Evidentemente, el botadero es una amenaza para la salud de los pobladores, pues además de la contaminación de las quebradas de las comunidades aledañas, es un foco infeccioso de enfermedades, olores fétidos, suciedad y atrae aves carroñeras, perros y

otros vectores que generan la propagación de plagas y agentes patógenos. De igual modo, supone el deterioro de la naturaleza y del ambiente por la gran concentración de desechos que se dispone a diario.



Figura 5. Disposición final de los residuos sólidos en el botadero El Infiernillo
Fuente: Google Earth (2019)

Ante este escenario, se propone el diseño de una infraestructura de tratamiento de residuos sólidos de acuerdo a las características de los residuos generados en la ciudad de Cutervo, de tal forma que se reduzca el impacto que origina su generación.

1.2 Formulación del problema

¿Es viable el diseño de una planta de compostaje a partir de los residuos orgánicos municipales en la ciudad de Cutervo?

1.3 Justificación del estudio

En el año 2016, la Municipalidad Provincial de Cutervo implementó una planta piloto de compostaje de residuos sólidos orgánicos municipales como parte del cumplimiento del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal. Sin embargo, desde su apertura, no se ha mejorado sus condiciones, ni se ha planeado la reformulación del diseño ni de la distribución de la planta.

Si bien la propuesta no puede llevarse a una escala mayor porque el área es un limitante del diseño, se pretende aumentar la capacidad productiva de compost, a través del uso eficiente de los espacios vacíos del terreno donde se ubica actualmente, lo cual permitirá una mayor participación de la población en la recolección selectiva de los residuos sólidos orgánicos municipales, y, por ende, la valorización de una mayor cantidad de residuos.

Por otro lado, se ha evidenciado que el botadero es un foco infeccioso de enfermedades y es causante de la contaminación del suelo y agua que discurren por el

lugar. Así, la disposición de los residuos a cielo abierto amenaza la salud de la población y la preservación del ambiente, por la emisión de gases de efecto invernadero a causa de la acumulación de basura.

Cabe resaltar que, de acuerdo a los lineamientos para una adecuada gestión de residuos sólidos, las autoridades municipales deben priorizar alternativas de tratamiento frente a su disposición final, por lo cual, resulta necesaria una propuesta que contrarreste de manera más eficiente la generación inminente de residuos sólidos, considerando que es un efecto colateral del desarrollo y del crecimiento urbano.

Por lo expuesto, se propone el diseño de una planta que tome como base aspectos de la planta piloto como: etapas del proceso de compostaje, tiempo de producción, técnica de los microorganismos eficientes, soluciones ante los posibles inconvenientes durante la degradación de los residuos sólidos orgánicos, entre otros que han sido definidos a lo largo de estos años. Asimismo, la planta debe permitir que se recupere una mayor cantidad de residuos orgánicos bajo los requerimientos técnicos necesarios para llevar a cabo el proceso.

El objetivo es mejorar la gestión de los residuos municipales reduciendo el volumen de basura dispuesto inadecuadamente en el botadero El Infiernillo.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1. Objetivo general

Proponer el diseño de una planta de compostaje a partir de los residuos orgánicos municipales en la ciudad de Cutervo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual de la gestión de residuos sólidos municipales en la ciudad de Cutervo.
- Proponer mejoras en la distribución de la planta de compostaje municipal.
- Realizar el estudio técnico-operativo de la propuesta.
- Determinar la estructura de costos de la propuesta.



Capítulo 2

Gestión de los residuos sólidos

La gestión de los residuos contempla el conjunto de operaciones, acciones y estrategias relacionadas con el manejo de los residuos sólidos desde su generación hasta su disposición final.

El objetivo principal es optimizar los recursos desde el punto de vista económico y ambiental. Para ello, las acciones deben efectuarse considerando las condiciones en que se encuentran los residuos, tales como sus características físicas, el volumen generado, la procedencia, los costos incurridos en su tratamiento; de modo que su recuperación y su comercialización sea factible. Estas operaciones deben estar regidas bajo una normativa legal (André y Cerdá, 2006).

La gestión de los residuos sólidos tiene como finalidad el manejo integral y sostenible, mediante la articulación de políticas, planes y acciones, bajo lineamientos exigibles en función de las posibilidades económicas y técnicas de cada lugar.

El sistema integral debe ser capaz de manejar residuos de múltiples orígenes. De ese modo, la gestión de los residuos puede ser municipal o no municipal:

- **Gestión municipal:** Es realizada por las municipalidades provinciales y distritales, y corresponde a los residuos de origen doméstico, comercial, los provenientes de la limpieza de espacios públicos y de las actividades que generen residuos similares y que no requieran tratamiento especial ya que no son peligrosos.
- **Gestión no municipal:** Debido al riesgo que implica la manipulación de residuos peligrosos, estos deben ser sometidos a tratamientos especiales como la incineración o la disposición en rellenos sanitarios especiales, así como a controles periódicos. En esta clasificación se encuentran los residuos generados en los establecimientos de salud, las industrias, actividades agropecuarias, actividades especiales, entre otros.

2.1. Gestión integral de los residuos sólidos

La gestión integral de residuos sólidos se puede dividir en las siguientes fases:

2.1.1. Generación

Esta etapa está condicionada por el crecimiento poblacional, las actividades que realiza el ser humano, sus hábitos de consumo, entre otros factores.

Dado el contexto actual de una excesiva generación de residuos, se debe conducir los hábitos hacia la minimización a través de estrategias preventivas como las 3R (reducir, reusar, reciclar) y diversos métodos y técnicas de aprovechamiento y valorización. De esta manera, el volumen de residuos dispuestos incorrectamente en los botaderos municipales sería reducido.

La minimización en el origen involucra asimismo las etapas de diseño y fabricación de los productos, a través de la innovación para el uso eficiente de los materiales y recursos. Por otro lado, involucra a las viviendas y comercios, por los hábitos de consumo, el ahorro y la reutilización materiales.

2.1.2. Segregación en la fuente

Este proceso consiste en separar los residuos desde el origen, facilitando su valorización material y energética.

Los residuos se pueden clasificar de forma general, en residuos aprovechables y no aprovechables, y por sus características en: generales, vidrio, papel y cartón, plástico, orgánicos, metales, peligrosos, etc.

2.1.3. Almacenamiento

Los residuos son acopiados de forma temporal por los generadores hasta su recolección.

2.1.4. Recolección y transporte

La recolección y la segregación en la fuente son actividades interdependientes. Si se efectúa la segregación, el recojo debe ser selectivo y ello permite el aprovechamiento de los residuos. En cambio, una recolección sin diferenciación obstaculiza la recuperación de los residuos sólidos.

Una vez completada la ruta de recojo, los vehículos recolectores trasladan los residuos a su destino definitivo: a las plantas de tratamiento y reciclaje o a las áreas de disposición final.

En cuanto al transporte, esto equivale al traslado de los residuos entre las diferentes etapas y lugares que comprenden el manejo de los residuos sólidos.

2.1.5. Tratamiento

Abarca los procesos, métodos y técnicas que permiten el cambio de las propiedades físicas, biológicas o químicas de los residuos con el objetivo de minimizar el impacto que generan a la salud pública y al ambiente. Los más comunes son: el vertido controlado, la incineración, el reciclaje y el compostaje.

El resultado principal es que los residuos logran propósitos útiles para cumplir diversas funciones, por lo que pueden ser comercializados dentro del mercado nacional e internacional.

2.1.6. Disposición final

Es la última etapa del manejo de los residuos y consiste en la eliminación de lo que no fue recuperado en las primeras etapas de la gestión. La disposición debe estar regulada a través de medidas que garanticen la protección de la salud y del ambiente.

En un sistema integral, los residuos no aprovechables se disponen en rellenos sanitarios autorizados, entendiéndose un relleno sanitario como la “instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos en la superficie o bajo tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental” (Ministerio de Salud, 2009); sin embargo, existen otras prácticas como la disposición en los vertederos a cielo abierto, también llamados botaderos o la incineración.

El sistema debe priorizar el uso eficiente de los recursos, implementando estrategias de minimización y recuperación de residuos. Por otro lado, debe ser parte del desarrollo local e incluirse políticas y planes en función de las posibilidades económicas y técnicas de cada localidad.

En la Figura 6 se observa de inicio a fin el ciclo de la gestión integral de residuos sólidos, orientándose hacia una economía circular.



Figura 6. Transición hacia una economía circular

Fuente: Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (2022)

2.2. Gestión de los residuos sólidos en el Perú

Uno de los desafíos que afronta el país es contrarrestar el deterioro ambiental a través del mejoramiento de la gestión de los residuos sólidos y el desarrollo de la conciencia pública, de manera que, en el futuro, los aspectos ambientales sean gestionados adecuadamente.

De acuerdo al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA, s.f.), el Perú produce en promedio veintitrés mil toneladas de basura al día, que equivale a siete millones y medio de toneladas al año. Se calcula que para el año 2025 esta cifra incrementaría hasta treinta y seis mil toneladas diarias. Asimismo, se estima que el 70 % de los residuos son generados a nivel domiciliario y que la generación per cápita de la zona urbana a nivel nacional es de 0.57 kg/(hab·día).

En cuanto a la disposición final, existe un déficit de rellenos sanitarios, por lo que el 44 % de residuos es dispuesto en botaderos informales: el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (Oefa, 2018), ha identificado 1585 botaderos a nivel nacional. Asimismo, existen 57 rellenos sanitarios, los cuales permiten que poco más de la mitad de los residuos (el 52 %) sean dispuestos bajo condiciones ambientalmente adecuadas. Sin embargo, alrededor del 63 % de los residuos que van a los rellenos son residuos aprovechables (Defensoría del Pueblo, 2019).

Otro problema identificado es el ineficiente sistema de recolección de basura, y se le atribuye a la falta de pago de arbitrios, que se da entre un 30 % - 60 %, ello genera la falta de presupuesto municipal para llevar a cabo dichas actividades.

De acuerdo a la Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (2022), los residuos sólidos en el Perú están conformados por:

- Residuos aprovechables: 74 %
 - Residuos orgánicos: 57.64 %
 - Residuos inorgánicos: 18.12 %
- Residuos no aprovechables: 15.67 %
- Residuos peligrosos: 8 %

El principal inconveniente que afronta nuestro país dentro de la gestión integral de residuos, es la escasez de infraestructura para el tratamiento y disposición final de residuos sólidos, ya que las cifras más alentadoras indican que en el país solo el 1.40 % de los residuos que podrían ser valorizados se gestionan a nivel municipal.



Figura 7. Composición porcentual de residuos sólidos a nivel nacional

Fuente: Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (2022)

2.3. Gestión actual de los residuos en Cutervo

2.3.1. Generación

De acuerdo al Sistema de información para la gestión de residuos sólidos, la ciudad de Cutervo registró una generación de 3889.76 toneladas de residuos domiciliarios, 2120.77 toneladas de residuos no domiciliarios y una generación per cápita domiciliaria de 0.52 kg/(hab-día).

Según su origen, los residuos se han clasificado en domiciliarios, aquellos generados dentro de una vivienda; y no domiciliarios, generados durante el desarrollo de alguna actividad económica. Ver Tabla 2 para la descripción de su composición.

Tabla 2

Composición física de los residuos sólidos domiciliarios

Tipo de residuo sólido	Composición (%)
Residuos orgánicos	73.81
Papel	2.68
Cartón	6.23
Vidrio	0.57
Plástico	5.04
Metales	0.35
Residuos no aprovechables	5.07

Tipo de residuo sólido	Composición (%)
Otros	6.25
Total	100.00

Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2019)

2.3.2. Segregación en la fuente

Como parte de la implementación de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales, se impulsó el Programa de valorización de residuos sólidos orgánicos, el cual contempla actividades de concientización, segregación en la fuente y recolección selectiva de dichos residuos; asimismo, participan los comerciantes de los mercados locales. Esto supone la segregación de menos del 5 % de los residuos generados en la ciudad.

2.3.3. Recolección y transporte de residuos

El municipio cuenta con el servicio diario de limpieza pública, que incluye el barrido de calles, la recolección, el transporte y la disposición final de residuos.

Se recolecta los residuos municipales provenientes de las fuentes domiciliarias y no domiciliarias. El municipio no cuenta con un plan de recolección selectiva, por lo cual realiza una recolección indiferenciada de 500 toneladas de residuos mensuales, aproximadamente.

El servicio de recolección urbana cubre el 90 % de la población, pues existen zonas con pendiente pronunciada y calles inaccesibles al tránsito vehicular.

En general, se puede considerar que el servicio de recolección y transporte de residuos sólidos municipales cumple con mantener la ciudad limpia; pero puede mejorarse si se diseñan las rutas de recojo de acuerdo a las exigencias y características de cada zona. Actualmente las rutas son sometidas a la experiencia del conductor, quien adapta el recorrido a su criterio.

2.3.4. Valorización de residuos

Se analizará la valorización de residuos orgánicos, por ser la materia en cuestión en la presente tesis.

El porcentaje de residuos recolectados a través del Programa de valorización de residuos orgánicos, es valorizado en la planta de compostaje municipal a través de la introducción de microorganismos eficientes. Se optó por esta tecnología por su baja inversión y porque se obtiene resultados en el corto plazo, ya que aceleran la descomposición de la materia orgánica.

El producto no se comercializa, sino que es utilizado por la municipalidad para el mantenimiento de las áreas verdes de la ciudad y de los campos deportivos de grass natural en la zona rural del distrito. Asimismo, es entregado en calidad de donación a los

participantes del programa y como apoyo a los agricultores, quienes solicitan el abono para el cultivo de papa, café, maíz y berenjena, principalmente.

En la Figura 8 se muestra el croquis y en la Figura 9 la vista general de la planta.

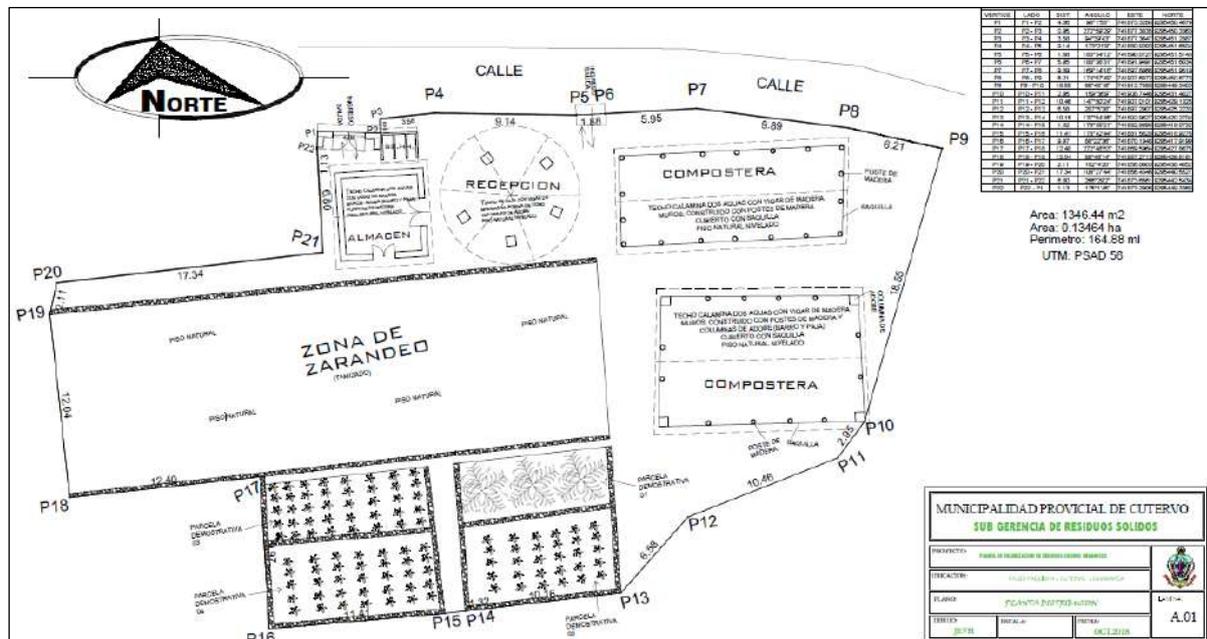


Figura 8. Croquis de la planta de valorización de residuos orgánicos
Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2018)

El abono orgánico es obtenido en un período de 40 a 45 días, dependiendo de las condiciones climáticas y del control de los parámetros del proceso. La Tabla 3 muestra la producción de la planta durante el período 2020.

Tabla 3

Total de residuos tratados y de producto obtenido (en toneladas)

Período	Recolectado (t)	Valorizado (t)	Producto (t)
Enero	14.00	13.90	0.00
Febrero	13.00	12.90	5.36
Marzo	7.00	6.90	5.56
Abril	0.00	0.00	2.76
Agosto	7.14	7.00	0.00
Setiembre	15.79	15.60	4.90
Octubre	25.00	24.80	9.30
Noviembre	17.00	16.95	14.20
Diciembre	13.00	12.59	10.10
Total	111.93	110.64	52.18

Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2020)



Figura 9. Vista de la planta de valorización de residuos orgánicos

2.3.5. Disposición final

El operario del vehículo de recolección transporta los residuos al botadero municipal, El Infiernillo, como se le ha denominado por la zona donde está ubicado. Tiene un área aproximada de 4762.38 m². La cantidad de residuos que se dispone al día es de 17 toneladas al día aproximadamente (Oefa, 2018).

A continuación, se resume las etapas del manejo de residuos municipales en la ciudad de Cutervo (ver Tabla 4).

Tabla 4

Manejo de residuos sólidos en Cutervo

Etapa	Cumple	Observaciones
Generación	-	La generación per cápita es de 0.52 kg/(hab·día).
Segregación en la fuente	NO	Solo se ha involucrado al 3.5 % de la población
Almacenamiento	NO APLICA	No aplica.
Barrido y limpieza pública	SÍ	-
Recolección y transporte	SÍ	El servicio es indiferenciado.
Valorización de residuos (reutilización, aprovechamiento, reciclaje)	SÍ	Recuperación de residuos orgánicos e inorgánicos.

Etapa	Cumple	Observaciones
Comercialización	SÍ	Los residuos inorgánicos son comercializados a través de las asociaciones de recicladores.
Transferencia	NO APLICA	No aplica.
Disposición final	SÍ	No se realiza adecuadamente: botadero municipal a cielo abierto "El Infiernillo".





Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Residuos sólidos

Coloquialmente conocidos como basura, los residuos sólidos son el material del que el hombre ha decidido deshacerse y que, en la mayoría de los casos, carece de valor económico para el uso común.

Según el Decreto Legislativo N° 1278 que modifica la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, los residuos son “cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien o servicio, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, para ser manejados priorizando su valorización y en último caso, su disposición final”.

En un concepto más amplio, el residuo sólido es el material que no puede ser utilizado para desempeñar la función para la que fue creado, pero tiene la capacidad de ser reutilizado o de convertirse en materia prima para un nuevo producto a través de métodos de tratamiento y recuperación.

3.1.1. Clasificación

De acuerdo al D.L. 1278, los residuos se clasifican de acuerdo a la competencia de su gestión en residuos municipales y no municipales, y según el manejo que reciben en peligrosos y no peligrosos.

- **Residuos municipales.** Lo conforman los residuos de origen domiciliario o domésticos, como restos de alimentos, revistas, papel, latas, botellas, etc.; los de origen comercial, generados en establecimientos comerciales de bienes y servicios, como envolturas, embalajes, plásticos, vidrios, etc.; los generados en la limpieza de espacios públicos, como restos de poda, bolsas, descartables, etc.; y los generados por otras actividades cuyos residuos se asimilen a los mencionados anteriormente.
- **Residuos no municipales.** Son aquellos de carácter peligroso y no peligroso que se generan en el desarrollo de actividades extractivas, productivas y de servicios. Ejemplo: residuos generados en la actividad pesquera, en los establecimientos de salud, en el sector agroindustrial, etc.

- **Residuos peligrosos.** Representan un riesgo significativo para la salud y para el ambiente. Sus características son: auto combustibilidad, explosividad, corrosividad, reactividad, toxicidad, radiactividad y patogenicidad. Por ejemplo: desechos biológicos, residuos de la minería, desechos de combustión, envases de plaguicidas agroquímicos, residuos de plantas de tratamiento de agua residual, etc.
- **Residuos no peligrosos.** Son aquellos que no presentan riesgo para la salud y el ambiente.

3.1.2. Composición física

La siguiente tabla muestra la composición de los residuos sólidos, de acuerdo a la Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales (Ministerio del Ambiente, 2019).

Tabla 5

Composición física de los residuos sólidos municipales

Composición de los residuos sólidos
1. Residuos aprovechables
1.1. Residuos orgánicos:
– Residuos de alimentos: cáscaras, restos de frutas, verduras y hortalizas.
– Residuos de maleza y poda: restos de flores, hojas, tallos y grass.
– Otros residuos orgánicos: estiércol de animales menores y huesos.
1.2. Residuos Inorgánicos:
– Papel: blanco, periódico, mixto (páginas de cuadernos, revistas, otros similares).
– Cartón: blanco, marrón (corrugado), mixto (tapas de cuaderno, revistas, otros).
– Vidrio: transparente, de colores (marrón - ámbar, verde, azul, entre otros), otros.
– Plástico: PET (tereftalato de polietileno): aceite y botellas de bebidas; PEAD (polietileno de alta densidad): botellas de lácteos, shampoo, detergente líquido, PEBD (polietileno de baja densidad): empaques de alimentos, empaques de detergente, empaque film, PP (polipropileno): baldes, tinas, rafia, tapas de bebidas, tapers, bolsas de cereales; PS (poliestireno): tapas cristalinas de CDs, micas, vasos de yogurt, envases de lavavajilla; PVC (policloruro de vinilo).
– Tetrabrik, textiles, caucho, cuero, jebe, metales.
2. Residuos no aprovechables
– Bolsas plásticas de un solo uso.
– Residuos sanitarios (papel higiénico, pañales, toallas sanitarias, excretas mascotas).
– Tecnopor (poliestireno expandido), pilas, restos de medicamentos.
– Residuos inertes (tierra, piedras, cerámicos, ladrillos, entre otros).
– Envolturas de snacks, galletas, caramelos, entre otros.

Fuente: Ministerio del Ambiente (2019)

3.1.3. Tratamiento

3.1.3.1. Tratamiento de residuos orgánicos. La mayoría de los residuos orgánicos son biodegradables y pueden ser transformados en sustancias sólidas, líquidas y gaseosas mediante su conservación biológica. Los productos dependerán del tipo de microorganismos y las condiciones en las que se realiza las transformaciones biológicas, obteniendo: compost, biogás, syngas, fertilizantes y energía. (Mesías y Quispe, 2015).

De acuerdo a Yepes, Montoya y Orozco (2008), “existen básicamente tres grupos de tecnologías para la recuperación de recursos: la valorización biológica y química, la obtención de combustibles (derivados de desechos) y la valorización térmica”.

- **Valorización biológica.** Entre los procesos biológicos más comunes y más usados se encuentran el compostaje y el vermicompostaje:

- **Compostaje:** Ocurre a través de la degradación natural de los residuos orgánicos por acción de microorganismos presentes en la tierra. Este proceso debe desarrollarse en condiciones controladas de humedad y temperatura, la cual al superar los 65 °C - 70 °C provoca la destrucción de elementos patógenos y por tanto la total inocuidad del producto.
- **Vermicompostaje:** Es una tecnología de compostaje que aprovecha la capacidad de degradabilidad de las lombrices de tierra, convirtiendo los residuos orgánicos en humus. Los residuos consumidos por las lombrices representan del 20 % al 100 % de su peso corporal.

La especie *Eisenia Foetida*, coloquialmente conocida como lombriz roja californiana, es la más utilizada en América Latina; esto es debido a que ingieren grandes cantidades de materia orgánica y excretan hasta un 60 % de lo ingerido.

El humus de lombriz es inodoro, no se fermenta y su apariencia es similar a la borra del café. De acuerdo a Röben (2002), el humus de lombriz es un residuo rico en carbono y puede contener “hasta un 5 % de nitrógeno, 5 % de fósforo, 5 % de potasio, un 4 % de calcio, una carga bacteriana de 2 billones por gramo y un pH entre 7 y 7,5”; por ende, se concluye que el lombricompostado o vermicompost es un fertilizante orgánico de alta calidad, y de fácil y económica producción.

- **Obtención de combustibles.** El producto gaseoso de la digestión anaeróbica de la materia orgánica es el biogás, el cual es utilizado como biocarburante para la producción de energía eléctrica y térmica. Su composición se debe principalmente al gas metano, entre 50 % - 60 %, dióxido de carbono entre un 35 % - 45 %, y otros componentes como nitrógeno y oxígeno que representan hasta un 5 %.
- **Valorización térmica.** Esta tecnología consiste en la recuperación de energía a partir de la degradación de las moléculas orgánicas por la acción del calor. El propósito de la valorización térmica es contribuir con la reducción de los residuos

orgánicos y aprovechar su poder calorífico para la generación de energía. (Muñoz, et al., 2016)

Estos procesos térmicos pueden clasificarse según los requerimientos de oxígeno: en presencia, como es el caso de la incineración, o en ausencia o baja concentración de oxígeno, como la pirólisis o la gasificación.

- Incineración: Proceso a altas temperaturas que contribuye a la reducción del volumen de los residuos hasta un 95 % y de su peso hasta un 80 %. La desventaja es que requiere métodos de depuración de gases tóxicos como dioxinas y furanos generados durante el proceso, y la instalación de un horno incinerador, ya que generalmente se trabaja a temperaturas mayores a 900 °C.

A medida que aumenta la temperatura de la operación también aumenta el costo (Muñoz et al., 2016).

- Pirólisis: Es la degradación térmica de materia orgánica que ocurre en ausencia de oxígeno. El proceso tiene tres etapas: la dosificación, la transformación de la materia prima y la obtención de los productos (Klug, 2012).

La materia orgánica puede convertirse en material carbonizado, que puede ser utilizado como combustible en procesos industriales, o como materia prima para la producción de carbón activado; en gas, utilizado para la generación de energía térmica o en la obtención de productos químicos; y en producto líquido, conocido como biodiésel, que puede ser convertido en un combustible rico en hidrocarburos. (Urien, 2013)

Desde un punto de vista químico, es un proceso complejo pues se lleva a cabo a través de una serie de reacciones en las que influyen factores como la temperatura, las condiciones de la atmósfera de reacción y el tiempo de permanencia del material orgánico en el reactor (Gómez et al., 2004).

- Gasificación: Es un proceso que permite la obtención de un gas que puede ser utilizado para la generación de energía térmica, eléctrica o la combinación de ambos procesos mediante sistemas de cogeneración.

A diferencia de la incineración, esta tecnología evita la formación de dioxinas y furanos por su atmósfera reductora y por la alta temperatura de operación, que supera los 1400 °C.

De acuerdo a Sánchez (2014): “La gasificación supone la oxidación parcial de un sustrato carbonoso en condiciones subestequiométricas de aire, oxígeno o en presencia de otros agentes gasificantes como el dióxido de carbono o el vapor de agua. Esta reacción genera una mezcla de gases que recibe el nombre de gas de síntesis o syngas, en función de su composición y del sistema de reacción empleado”.

3.1.3.2. Tratamiento de residuos inorgánicos. Los residuos inorgánicos o no biodegradables son aquellos materiales de desecho cuyo origen no es biológico y que han sido elaborados a través de procesos industriales.

Ya que su tiempo de degradación es de alta durabilidad y no se reintegran en la naturaleza, se pueden tratar de acuerdo a su tipo:

- **Plástico.** El reciclado de plástico es el proceso de recuperación de desechos plásticos a través de tecnologías de aprovechamiento como el reciclaje mecánico, el reciclaje químico y la valorización energética.

- **Reciclaje mecánico:** Para este tipo de reciclaje se utiliza una máquina extrusora graneadora de polímeros, que, mediante el prensado, fusión, moldeado y presión, se obtiene el nuevo material con menos características que el material inicial. Esto obliga a emplearlo en la fabricación de productos con menores especificaciones técnicas.

De los materiales valorizados a través de esta técnica, destaca el termoplástico, cuyo proceso es llevado a cabo a altas temperaturas.

- **Reciclaje químico:** A través del reciclaje químico, el plástico se descompone en combustible o se polimeriza nuevamente con acción del calor, la presión o catalizadores. Su principal ventaja es que no requiere segregación, pues trata fácilmente plásticos heterogéneos, reduciendo de esta manera los costos de selección y transporte.
- **Valorización energética:** Es una alternativa de aprovechamiento de residuos plásticos que no se puedan reciclar de manera sostenible, a través de la combustión para la producción de energía.

- **Vidrio.** El vidrio es un material reciclable al 100 % ya que puede someterse infinitas veces a procesos de recuperación sin perder sus propiedades.

El vidrio es triturado formando un polvo grueso denominado calcín, el cual es sometido a altas temperaturas para ser moldeado en botellas, recipientes, contenedores, entre otros.

Este tipo de valorización tiene gran impacto pues minimiza las emisiones de dióxido de carbono y evita la extracción de materia prima de la naturaleza.

- **Papel y cartón.** El reciclaje consiste en la recuperación de las fibras celulósicas que fueron utilizadas en su fabricación, a través de medios químicos o mecánicos. La obtención de la pulpa celulosa se basa en la utilización de sustancias acuosas, para luego afinar, prensar, secar y bobinar el nuevo papel.

Se estima que alrededor del 42 % de la explotación maderera se destina a la fabricación del papel y cartón, lo cual resalta la importancia de su reciclaje.

A través del reciclaje se puede recuperar el 90 % del papel y cartón, reduciéndose el consumo de agua y electricidad en un 90 % y 50 % respectivamente.

- **Metales.** Para diferenciar el tipo de metal durante su recuperación, se utiliza un mecanismo de corrientes inducidas de Foucault que separan los metales de acuerdo a su tipo, el cual proyecta hacia afuera de la cinta transportadora el aluminio y atrae a los metales ferrosos.

En cifras generales, el 40 % de la chatarra de acero se destina a la producción de nuevos aceros; la hojalata se emplea en la fabricación de otros envases o como chatarra en las fundiciones siderúrgicas; y el aluminio mantiene sus propiedades al fundirse repetidas veces.

3.2. Proceso de compostaje

El compostaje es un proceso natural y biooxidativo que consiste en un sistema de tratamiento de residuos biodegradables bajo condiciones aeróbicas y termófilas controladas mediante parámetros como aireación, temperatura y humedad. La descomposición de materia orgánica también se conoce como oxidación porque ocurre en presencia de oxígeno.

Durante el proceso de compostaje intervienen numerosos y variados microorganismos que necesitan condiciones físicas y químicas para desarrollarse. Esta actividad es realizada principalmente por las poblaciones mixtas que degradan la materia orgánica como bacterias, hongos, algas y actinomicetos. Las bacterias son la población más numerosa del proceso, pues constituyen el 80 % - 90 % del total de microorganismos, y poseen una amplia diversidad metabólica, la cual degrada químicamente una gran variedad de productos orgánicos a través de sus enzimas.

El compost, materia orgánica estable y libre de patógenos, es el resultado del proceso y contribuye a la protección del suelo contra la erosión, a incrementar sus niveles de materia orgánica, a mejorar la retención del agua, y otros aspectos esenciales para el cuidado y mantenimiento de los suelos.

Las características más destacables del proceso de compostaje son:

- Reduce el volumen de residuos dispuestos inadecuadamente en los botaderos.
- Promueve el aprovechamiento de los residuos orgánicos.
- Beneficia la agricultura.
- Es un proceso muy robusto, ya que se obtiene resultados consistentes pese a la variabilidad del entorno.
- Es un proceso versátil, pues se puede adaptar a distintos tipos de residuos orgánicos.
- Requiere sistemas tecnológicos poco sofisticados.

3.2.1. Fases

Se puede identificar principalmente cuatro fases: mesófila, termófila o de higienización, mesófila II o de enfriamiento y maduración (ver Figura 10).

3.2.1.1. Fase mesófila. En esta fase inicia el proceso de biodegradación de la materia orgánica por acción de los microorganismos, principalmente de las bacterias termófilas, por lo que la temperatura aumenta desde una temperatura ambiente hasta 40 °C - 45 °C, pasados pocos días e incluso solo horas.

Debido a la actividad microbiana, los microorganismos utilizan fuentes de carbono y nitrógeno generando calor.

3.2.1.2. Fase termófila o de higienización: Durante esta fase, los microorganismos comienzan a degradar con gran voracidad la materia orgánica y su actividad hace que la temperatura aumente. La materia se descompone biológicamente en moléculas más pequeñas por medio de reacciones, las cuales producen liberación de energía, y, por ende, el aumento de la temperatura del material, la evaporación del agua contenida y la disminución del pH por la formación de ácidos orgánicos.

Cuando alcanza los 65 °C - 70 °C se sugiere realizar volteos para airear la mezcla y reponer el oxígeno consumido de modo que no se interrumpa la vida microbiana, así como evitar condiciones anaeróbicas excesivas. Temperaturas por encima de los 55 °C eliminan esporas de hongos fitopatógenos, huevos de parásitos y semillas de malezas.

La descomposición se caracteriza por la reducción del peso y del volumen, la estabilización parcial y la higienización del material, que se dan por la subsistencia de los microorganismos.

Esta fase puede durar semanas, dependiendo el material que se esté procesando, las condiciones climáticas, entre otros factores.

3.2.1.3. Fase mesófila II o de enfriamiento: En esta fase la actividad microbiana disminuye porque se agotan las fuentes de carbono y nitrógeno, y por consecuencia la temperatura desciende.

Se caracteriza por presentar una materia estable y el pH del medio desciende, aunque en general se mantiene ligeramente alcalino.

El enfriamiento de la mezcla requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración.

3.2.1.4. Fase de maduración: El proceso de biodegradación es más lento y se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos.

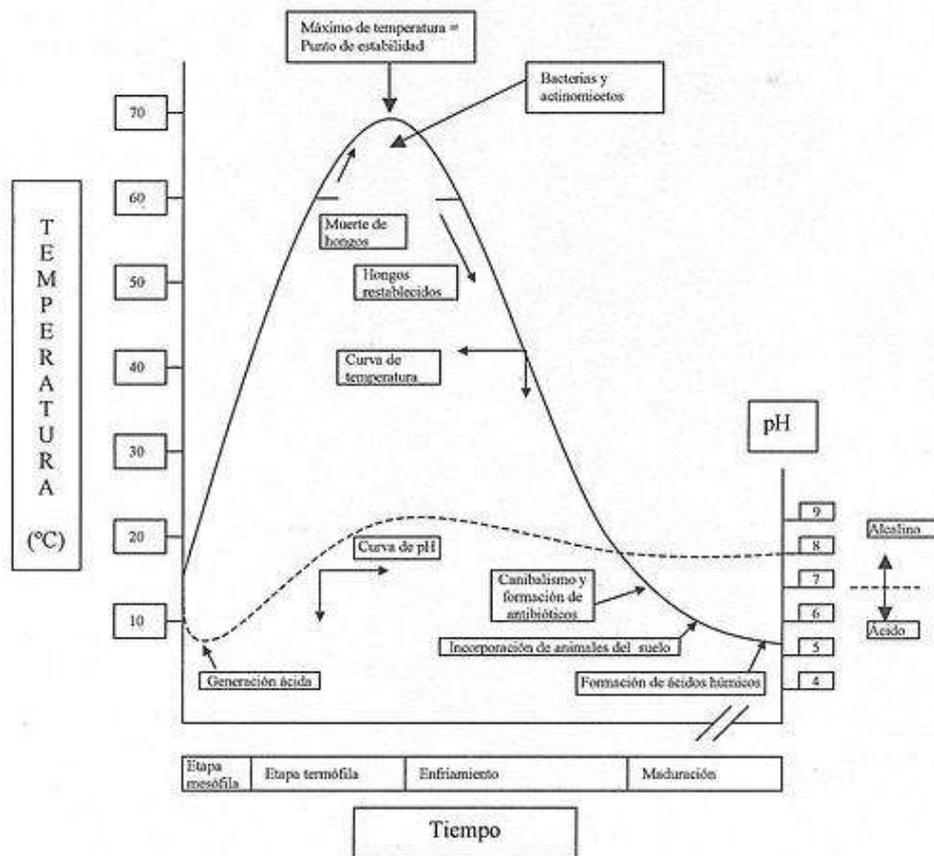


Figura 10. Esquema de las fases del compostaje

Fuente: Abarra Taldea (2004)

Durante esta fase ya no queda tanta materia orgánica biodegradable disponible, por lo cual no existe una gran liberación de energía como en las fases previas. Las condiciones de aerobiosis se mantienen de forma espontánea porque no hay requerimiento de oxígeno y el compost se mantiene a temperatura ambiente; en caso sea necesario humedecerlo, es recomendable emplear solo aguas limpias, no lixiviados ni residuos líquidos.

La fase de maduración se caracteriza por:

- La disminución gradual de la temperatura.
- No requerir un control exhaustivo del proceso, dado que la actividad microbiana es menor a las anteriores etapas.
- La mezcla madura no tiene olor ni se diferencian sus elementos.

Un compost estable tiene características similares a las sustancias húmicas del suelo, lo que contribuye a mejorar su actividad microbiana. Asimismo, brinda las condiciones para el establecimiento de las raíces de la planta: incrementan la capacidad de retención de la humedad, aumentan la capacidad de intercambio iónico, que es originado por los desequilibrios eléctricos de las partículas del suelo, y contribuyen en la formación de su estructura granular.

En esta fase no es necesario realizar volteos o humedecer el material, pero se recomienda que se remueva para obtener un producto homogéneo.

La duración mínima para la descomposición y maduración de la materia orgánica no se puede precisar ya que depende de sus características físicas, del control de los parámetros durante el proceso, de la tecnología que se utilice y de la mezcla de materiales.

3.2.2. Microorganismos eficientes

Esta tecnología consiste en la inoculación de microorganismos eficientes EM (por sus siglas en inglés *Efficient Microorganisms*), como bacterias ácido-lácticas, levaduras, bacterias fotosintéticas y hongos, que aceleran el proceso de descomposición de residuos orgánicos, reduciendo el tiempo de obtención de compost de 6 meses a 45 días, de acuerdo a las condiciones climáticas y a los parámetros físico químicos de la mezcla orgánica.

3.2.3. Evaluación de los parámetros físico - químicos

A fin de garantizar el proceso de compostaje y la calidad del producto, es recomendable controlar que la mezcla cumpla lo siguiente:

- Porosidad que permita la retención del agua y la circulación del aire en el interior, ya que esto facilita la regulación de la temperatura, sobre todo cuando el material está apilado.
- Humedad apropiada.
- pH adecuado a la actividad microbiana.
- Proporción de materia orgánica suficiente para que el proceso inicie y se complete.
- Una relación C/N que minimice las pérdidas de nitrógeno o que permita que este elemento no sea un factor limitador del proceso.
- Unos contenidos mínimos de otros elementos esenciales para los microorganismos, a fin de que no sean un factor limitador.

Asimismo, se presentan los valores habituales de los parámetros que intervienen durante el proceso:

3.2.3.1. Temperatura. La temperatura tiene un amplio rango de variación en función de la fase del proceso, el cual inicia a temperatura ambiente y va variando hasta alcanzar temperaturas más altas para asegurar la eliminación de microorganismos patógenos (proceso de sanitización). El límite máximo de temperatura es de 70 °C, que, tras superarlo, se inhibiría la actividad microbiana, por lo que es importante la oxigenación del material.

Durante las fases del proceso las poblaciones de microorganismos van cambiando unas a otras, hasta el agotamiento de nutrientes y el establecimiento de la temperatura a una temperatura ambiente.

3.2.3.2. Humedad. Es importante mantener la humedad entre el 40 % - 50 %, ya que, de presentar humedad elevada, el proceso se podría convertir en anaeróbico (en ausencia de oxígeno). Por otro lado, si la humedad es muy baja se ralentiza la actividad microbiana y eso conlleva a obtener compost inmaduro.

La humedad varía dependiendo del estado físico y del tamaño de las partículas y es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular.

3.2.3.3. pH. Al inicio del proceso es común que la mezcla sea excesivamente ácida por la formación de ácidos orgánicos durante la degradación de la materia orgánica. Los restos vegetales pueden incrementar el pH porque liberan compuestos alcalinos, por ello es necesario mezclarlos con restos secos, ricos en carbono, para evitar la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco, ya que es el mayor fertilizante de los suelos.

Es conveniente que el pH sea lo más neutro posible para mantener la actividad microbiana activa.

3.2.3.4. Oxígeno. La aireación minimiza la emisión de sustancias malolientes y garantiza el oxígeno necesario para satisfacer la intervención microbiana. Por otro lado, el requerimiento de oxígeno varía durante el proceso de compostaje, alcanzando el mayor consumo durante la fase termofílica.

Un exceso de aireación provocaría que la temperatura disminuya y se pierda la humedad por evaporación, ocasionando que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua. Por el contrario, una baja aireación, genera exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis: malos olores.

3.2.3.5. Relación C/N. La relación carbono/nitrógeno varía en función del material de partida y se obtiene al dividir el contenido de carbono (C) sobre el contenido de nitrógeno (N) de los materiales a compostar. Esta relación también varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, de 35:1 a 15:1.

Si al iniciar el proceso de compostaje el material presenta una relación C/N superior a 30 requerirá mayor tiempo de degradación, por el contrario, si tiene una relación C/N menor a 20, se perderá el contenido de nitrógeno.

El carbono es fuente de energía para los microorganismos del suelo y el nitrógeno es fundamental para la síntesis proteica de los mismos; la adecuada relación entre ambos nutrientes favorece el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

3.2.4. Beneficios e importancia del compost

El compost es el producto del proceso de compostaje, y contribuye a:

- Mejorar la estabilidad estructural del suelo.
- Proteger el suelo contra la erosión.

- Aumentar la capacidad de retención de agua.
- Regular el pH y la actividad microbiana.
- Proporcionar nutrientes y minerales al suelo.
- Disminuir los riesgos de contaminación.
- Incrementar los niveles de materia orgánica.
- Promover la agricultura orgánica.

El compost beneficia la agricultura, pues reduce o incluso elimina el uso de fertilizantes químicos, ya que tiene la capacidad de mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo aumentando su fertilidad (Vargas y Pérez, 2018).

El compost actúa como recuperador de suelos afectados por la acción reiterativa de sustancias químicas y otros productos que los degradan. Del proceso se obtiene dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estable.





Capítulo 4

Marco legal

El manejo de residuos sólidos es uno de los desafíos más grandes para el país, debido al incremento de la generación de residuos por factores como la expansión urbana y el crecimiento poblacional. Frente a ello, los gobiernos locales deben velar por la correcta y eficiente gestión de los mismos, promoviendo las buenas prácticas ambientales en sus localidades.

En este contexto, el Gobierno del Perú ha instaurado diversos mecanismos para la protección del ambiente como políticas nacionales, mediante las cuales se plantea la minimización, valorización y recuperación de residuos sólidos, como base de la gestión integral. Estas estrategias facilitan la reintegración de los residuos sólidos en la cadena productiva de valor; de este modo, se evitaría eliminar residuos potencialmente aprovechables y se reduciría la cantidad de residuos dispuestos inadecuadamente en los vertederos y botaderos a cielo abierto.

La gestión de residuos sólidos es un conjunto de acciones normativas, financieras y de planeamiento a largo plazo que se deben tener en cuenta desde la generación hasta la disposición final, y es responsabilidad de los gobiernos locales. Asimismo, debe instrumentarse con proyectos, soluciones tecnológicas, asistencia y sensibilización ciudadana.

4.1. Normativa general

- **Constitución Política del Perú (1993).** Promulgada en el año 1993. Fija normas que garantizan el derecho que tiene toda persona a la protección de su salud y a gozar de un ambiente equilibrado. Asimismo, indica que el Estado debe promover el uso sostenible de los recursos naturales, la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas.
- **Ley N° 27972.** Ley Orgánica de Municipalidades. Vela por la protección y la conservación del ambiente. Asimismo, regula y controla los elementos contaminantes, promueve la educación, y elabora y aprueba planes ambientales.
- **Decreto Supremo N° 014-2011-MINAM.** Aprueba el Plan Nacional de Acción Ambiental (PLANAA) 2011-2021.

- **Decreto Legislativo N° 1278.** Aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. En diciembre de 2016 se publicó en el Diario Oficial El Peruano el Decreto Legislativo N° 1278, que sustituye a la Ley N° 27314: Ley General de Residuos Sólidos, que fue aprobada en el año 2000. Esta norma se aplica a todos los sectores productivos y abarca las actividades de segregación, almacenamiento, tratamiento, transporte y comercialización de residuos sólidos.

El D.L. 1278 está basado en la minimización de la generación de residuos, el uso eficiente de los materiales y la promoción de la recuperación y valorización material y energética de los residuos sólidos, incluyendo a los recicladores en la cadena de valor del reciclaje.

Asimismo, plantea tres ejes relevantes: cambiar la definición de residuo y enfocarlo hacia su reinserción en ciclos productivos, dándole valor como insumo para otras industrias; desarrollar el potencial de la industria del reciclaje en el Perú, a través de la inversión en infraestructuras y la formalización de los recicladores; e involucrar a los actores clave en la gestión de residuos: las autoridades, las empresas y los ciudadanos.

Por otro lado, la valorización de residuos se menciona de forma recurrente a través de la eficiencia de los materiales y la minimización en la fuente, aprovechando el material de descarte y ya no considerándolo como residuo. El Artículo 24 indica que, “es competencia de las municipalidades promover e implementar progresivamente programas de segregación en la fuente y la recolección selectiva de los residuos sólidos en todo el ámbito de su jurisdicción, facilitando la valorización de los residuos y asegurando una disposición final técnicamente adecuada”.

- **Decreto Legislativo N° 1501.** Modifica el D.L. 1278. En mayo de 2020 se aprobó el D.L. 1501, según el cual, será necesario que se implemente la segregación en la fuente y el reciclaje de residuos sólidos, como competencia municipal.
- **Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM.** Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. En diciembre de 2017, el Ministerio del Ambiente publicó el Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM, que aprueba el Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278 de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

Está orientado hacia el desarrollo y uso de tecnologías, métodos, prácticas y procesos de producción y comercialización que favorezcan la minimización y valoración de los residuos sólidos. Asimismo, promueve la economía circular, el principio de responsabilidad extendida del productor, el principio de responsabilidad compartida y el principio de protección del ambiente y la salud.

Por otro lado, frente al diagnóstico de la situación en el país, impulsa la sostenibilidad del servicio de limpieza pública, la inversión municipal en

infraestructuras de residuos sólidos y la reconversión y recuperación de los botaderos según sus características.

4.2. Política Nacional del Ambiente (PNA)

Aprobada por el Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM, es el principal instrumento para definir las acciones de las instituciones públicas orientándolas hacia un ambiente saludable. Asimismo, precisa cómo los gobiernos de todos los niveles deben afrontar los principales problemas ambientales del país: desde los ministerios hasta los gobiernos regionales y locales.

4.3. Instrumentos para la gestión de residuos sólidos

- **Sistema de información para la gestión de los residuos sólidos municipales – SIGERSOL municipal.** Es un instrumento de registro que recopila la información declarada por las municipalidades sobre el manejo de los residuos sólidos en su jurisdicción. Esta base de datos permite tomar decisiones acerca de la gestión de residuos sólidos en el país y la elaboración de indicadores nacionales.
- **Plan Nacional de Acción Ambiental – PLANAA (2011-2021).** Es el principal instrumento de gestión ambiental nacional. Tiene como marco de orientación a la Política Nacional del Ambiente que está dividida en cuatro ejes:
 - Conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y de la diversidad biológica.
 - Gestión integral de la calidad ambiental.
 - Gobernanza ambiental.
 - Compromisos y oportunidades ambientales internacionales.

El objetivo principal es mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes (Ministerio del Ambiente, 2011).

En cuanto a la gestión de residuos sólidos municipales, la meta prioritaria del PLANAA al año 2021 es que el 100 % de residuos del ámbito municipal sean manejados, aprovechados y dispuestos adecuadamente, a través de estrategias como el tratamiento y disposición final adecuados, la minimización de la generación de residuos sólidos, y la mejora de la segregación, de la recolección selectiva y del reciclaje de los residuos sólidos.

- **Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PLANRES.** El objetivo del PLANRES es minimizar la generación de residuos sólidos implementando programas de educación ambiental y promoviendo la participación ciudadana mediante la reducción de la generación per cápita de residuos. Asimismo, promueve la mejora de la calidad y de la cobertura de los servicios de residuos

sólidos, incluyendo la recolección selectiva de residuos y alternativas de tratamiento y recuperación, como el reciclaje en el caso de los residuos inorgánicos, y el compostaje, en los orgánicos.

Asimismo, incluye lineamientos, prioridades y criterios técnico-políticos establecidos en las normativas, y provee recomendaciones y estrategias para la gestión integral de residuos sólidos, estipuladas según acuerdos mundiales.

- **Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos – PIGARS.** Es competencia de las municipalidades provinciales planificar la gestión de los residuos sólidos municipales en el ámbito de su jurisdicción. A través de este instrumento de gestión, se identifican las necesidades y planifica estratégicamente mejoras, determinando objetivos, metas, actividades e inversiones proyectados a cinco años, considerando la economía circular e incorporando la minimización y valorización de los residuos sólidos municipales, así como la viabilidad del servicio de limpieza pública.
- **Plan de Manejo de Residuos Sólidos – PMRS.** El PMRS es un instrumento técnico operativo participativo, para la adecuada gestión de residuos sólidos municipales con un ámbito de intervención distrital, que surge de las coordinaciones entre las autoridades locales y los actores claves involucrados en el manejo de los residuos. El objetivo es asegurar procesos eficaces, eficientes y sostenibles, desde la generación hasta la disposición final, incluyendo minimización, reducción, reutilización y reciclaje de residuos sólidos.
- **Programa de Segregación en la Fuente y Recolección Selectiva – PSFyRS.** El objetivo de este sistema es reducir la cantidad de residuos que son dispuestos incorrectamente, impulsando a través de la educación ambiental y la concientización ciudadana, el reciclaje formal y el aprovechamiento de los residuos sólidos. Este programa, que es implementado por las municipalidades, favorece la valorización de residuos, pues desde la fuente de origen, ya sean los domicilios, comercios o instituciones, se realiza la separación correcta según el tipo de residuos, evitando la contaminación y permitiendo que sean manejados de forma especial. La segregación se complementa con el adecuado almacenamiento y la entrega al personal encargado de la recolección selectiva de acuerdo al horario establecido.

4.4. Promoción de la valorización de residuos sólidos

La gestión eficiente de los residuos sólidos está condicionada por el acceso adecuado al financiamiento. Por ello, existen diversos programas que promueven la implementación de sistemas integrales de manejo de residuos sólidos, a través del diseño e implementación de infraestructuras de tratamiento y recuperación de residuos.

Actualmente, la Municipalidad Provincial de Cutervo, como parte del cumplimiento de la Meta 3 “Implementación de un Sistema Integrado de Manejo de

Residuos Sólidos Municipales” del Programa de Incentivos a la Mejor de la Gestión Municipal, ha dispuesto una planta piloto de compostaje en un área de . Sin embargo, la capacidad actual solo permite la participación de 200 familias de la zona urbana, lo que equivale al 3.5 % de la población total.

En el año 2009 se creó la Ley N° 29332: Ley que crea el Plan de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal. A través de este instrumento, se convoca a los gobiernos locales a cumplir metas en un plazo determinado para conseguir la transferencia de recursos financieros adicionales a su presupuesto institucional. Por otro lado, permite articular esfuerzos entre los gobiernos locales y el gobierno nacional.

Con el fin de impulsar la implementación de infraestructuras que faciliten la recuperación y correcta disposición final de los residuos sólidos municipales, a partir del año 2010 se ha propuesto la gestión integral y adecuada. Desde el año 2010 al 2016, la meta fue implementar un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de residuos domiciliarios. A partir del año 2017, consiste en la implementación de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales, y se divide en tres actividades:

1. Valorización de residuos inorgánicos municipales: para lo cual es importante trabajar con asociaciones de recicladores formalizados o con Empresas Operadoras de Residuos Sólidos (EO-RS), para la comercialización de estos residuos.
2. Valorización de residuos orgánicos municipales: a través de procesos como el compostaje, la lombricultura o los biodigestores.
3. Erradicación de puntos críticos y prevención de puntos críticos potenciales de residuos sólidos municipales ubicados en los espacios urbanos y vías públicas.

Estos incentivos retribuyen el buen desempeño en la gestión pública de los gobiernos locales, los cuales deben presentar mejoras en diversos ámbitos de su gestión.

4.5. Organismos reguladores de la gestión de residuos sólidos

- **Ministerio del Ambiente - MINAM**

Promueve la minimización de la generación de residuos sólidos frente a cualquier alternativa para gestionarlos eficientemente. En segundo lugar, promueve la recuperación y valorización material y/o energética de los residuos, a través del compostaje, coprocesamiento, reciclaje, etc., orientando las acciones hacia una economía circular. La disposición final de residuos bajo condiciones controladas y ambientalmente seguras constituye el último paso, y solo de aquellos residuos que no pudieron ser gestionados en los pasos anteriores.

- **Gobiernos locales**

Los gobiernos locales, a través de estrategias, promueven el reciclaje y la segregación de residuos en la fuente. Las municipalidades utilizan instrumentos

económicos como impuestos, tarifas, subsidios y bonos de desempeño para incentivar la participación ciudadana.

- **Dirección General de Residuos Sólidos (DGRS)**

La Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (DGRS) es la encargada de promover, coordinar y asesorar a las autoridades acerca de la implementación de la normativa de gestión de los residuos sólidos.

- **Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA)**

El OEFA es un órgano público técnico especializado, adscrito al Ministerio del Ambiente, y es el responsable promover el cumplimiento de la normativa ambiental y la mejora del Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Es, además, el ente rector del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (SINEFA) y cumple una función normativa y supervisora con las Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA) de ámbito nacional, regional y local (Oefa, 2022).

En líneas generales, las municipalidades deben implementar programas de gestión y manejo de residuos sólidos que incluyan necesariamente la minimización y actividades de valorización. La planificación, el diseño, la implementación y la sistematización de los instrumentos de gestión, resultan de la suma de diferentes actores con roles bien definidos.

En ese sentido, el Programa de valorización de residuos sólidos municipales que viene implementado la Municipalidad Provincial de Cutervo de manera progresiva, se ha planteado de acuerdo a la meta de establecida en el Programa de Incentivos (PI). Para el presente año se ha previsto la valorización de 45.07 toneladas de residuos sólidos orgánicos municipales.

Capítulo 5

Diseño de ingeniería

Ante la brecha de infraestructuras de tratamiento de residuos sólidos, se plantea la implementación de un área para la valorización de residuos sólidos orgánicos municipales, como una alternativa que preceda a la disposición final, de modo que se reduzca el volumen de residuos dispuestos inadecuadamente en el botadero municipal.

Para ello, se rediseñará la planta piloto de compostaje, de modo que aumente la capacidad productiva de abono orgánico, teniéndose en cuenta aspectos como el tipo de residuos a procesar, el volumen del material y los instrumentos de medición que regulan el proceso.

5.1. Aspectos técnico-operativos

Para la presente investigación se considerará los residuos generados en la ciudad de Cutervo, tanto a nivel domiciliario como en los mercados, debido a que son fuentes que generan residuos predominantemente orgánicos.

5.1.1. Caracterización de los residuos sólidos del distrito de Cutervo

La fuente principal para analizar el comportamiento de la generación de residuos sólidos es el Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales del distrito de Cutervo, elaborado en el año 2019, el cual señala indicadores como la generación per cápita de residuos (GPC), la composición física porcentual, la densidad y otros factores convenientes para la toma de decisiones sobre la gestión de residuos sólidos a corto, mediano y largo plazo.

Asimismo, otra fuente importante es el reporte emitido al Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos, en adelante SIGERSOL, el cual describe la generación de residuos sólidos en la zona urbana del distrito de Cutervo, así como el resultado del servicio de limpieza pública y de la valorización de los residuos sólidos municipales.

5.1.1.1. Residuos sólidos domiciliarios.

- **Generación per cápita de los residuos domiciliarios (GPC).** La GPC domiciliaria durante el año 2019 fue de 0.52 kg/(hab·día), es decir que cada habitante –a nivel domiciliario– generó 520 gramos de residuos en un día.

- **Densidad de los residuos domiciliarios.** La densidad promedio de los residuos domiciliarios fue de 284.88 kg/m³. Este parámetro corresponde a los residuos sólidos sin compactar.
- **Composición física de los residuos domiciliarios.** La composición física de los residuos domiciliarios está representada principalmente por residuos aprovechables (88.68 %): residuos orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos, como residuos de alimentos, residuos de maleza, poda y madera, representan el 73.81 % del total. Los residuos inorgánicos, tales como papel, cartón, vidrio, plástico y metales, representan el 14.87 %.

Por otro lado, los residuos no aprovechables, como bolsas plásticas, residuos sanitarios, pilas y otros, representan el 11.32 % del total de residuos generados en la ciudad de Cutervo a nivel domiciliario. La Tabla 6 detalla la composición física de los residuos.

Tabla 6

Composición física de los residuos sólidos domiciliarios de la ciudad de Cutervo

Tipo de residuos sólidos	Total (t/año)	Composición (%)
Residuos aprovechables	3449.35	88.68
Residuos orgánicos	2871.01	73.81
Residuos de alimentos	2231.94	57.38
Residuos de maleza, poda y madera	414.64	10.66
Otros residuos orgánicos	224.43	5.77
Residuos inorgánicos	578.34	14.87
Papel	104.23	2.68
Blanco	84.40	2.17
Periódico	14.39	0.37
Mixto	5.44	0.14
Cartón	242.32	6.23
Marrón (corrugado)	127.19	3.27
Mixto	115.13	2.96
Vidrio	22.16	0.57
Transparente	19.83	0.51
Otros colores	2.33	0.06
Plástico	196.02	5.04
Tereftalato de polietileno	33.45	0.86
Polietileno de alta densidad	46.67	1.20
Polietileno de baja densidad	85.18	2.19
Polipropileno	9.72	0.25
Poliestireno	17.50	0.45
Policloruro de vinilo	3.50	0.09
Metales	13.61	0.35

Tipo de residuos sólidos	Total (t/año)	Composición (%)
Residuos no aprovechables	440.30	11.32
Bolsas plásticas	42.00	1.08
Papel higiénico/pañales/toalla sanitaria	132.25	3.40
Pilas	9.33	0.24
Tecopor (poliestireno expandido)	13.61	0.35
Otros no aprovechables	243.11	6.25
Total	3889.65	100.00

Fuente: SIGERSOL (2021)

5.1.1.2. Residuos sólidos no domiciliarios.

- **Generación.** Los residuos no domiciliarios provienen del barrido de calles y de los establecimientos comerciales, restaurantes, hoteles, instituciones educativas, instituciones públicas y privadas y mercados. Ver Tabla 7 para el detalle de la generación de residuos por cada fuente.

Tabla 7

Cantidad de residuos generados por las fuentes no domiciliarias

Fuente	Generación (kg/día)	Generación (t/año)	%
Barrido de calles	3179.25	1160.70	54.72
Establecimientos comerciales	971.52	354.05	16.72
Restaurantes	503.36	182.50	8.66
Hoteles	52.57	18.25	0.90
Instituciones educativas	106.36	40.15	1.83
Instituciones públicas y privadas	47.59	18.25	0.82
Mercados	949.69	346.75	16.35
Total de residuos	5810.34	2120.65	100.00

Fuente: SIGERSOL (2021)

- **Composición física.** Los residuos no domiciliarios están compuestos principalmente por residuos orgánicos, que corresponden a más del 50 % del total; sin embargo, los residuos provenientes del barrido están compuestos mayormente por residuos no aprovechables (83.38 %).

Este análisis resulta necesario para determinar la cantidad de residuos sólidos orgánicos provenientes de fuentes no domiciliarias que pueden ser valorizados a través del compostaje.

Tabla 8

Composición física de los residuos no domiciliarios

	Barrido (%)	Comercio (%)	Restaurantes (%)	Hoteles (%)	I. E. (%)	Instituc. Públicas y Privadas (%)	Mercados (%)
Orgánicos	12.38	66.67	75.33	56.27	67.41	61.11	89.89
Residuos de alimentos	7.27	65.18	74.58	40.14	43.84	34.05	80.58
Residuos de maleza y poda	5.11	0.00	0.00	1.94	15.14	18.30	3.31
Otros residuos	0.00	1.49	0.75	14.20	8.44	8.77	6.00
Inorgánicos	4.24	17.61	12.73	23.34	20.91	25.18	5.34
Papel	1.40	0.84	0.97	1.29	7.86	9.19	0.24
Cartón	1.94	8.66	5.07	11.36	7.21	8.68	2.63
Vidrio	0.76	0.74	0.73	1.01	0.58	0.67	0.23
Plástico	0.00	6.90	5.59	9.03	4.90	6.21	2.09
Metales	0.14	0.47	0.37	0.65	0.36	0.43	0.15
No aprovechables	83.38	15.72	11.94	20.39	11.68	13.71	4.77

Fuente: SIGERSOL (2021)

5.1.1.3. Resultados generales de la caracterización. Se estimó que la generación total de residuos sólidos municipales en el año 2019 fue 6343.70 toneladas aproximadamente, y que la generación per cápita municipal fue de 0.78 kg/(hab·día). (Ver Tabla 9).

Tabla 9

Generación de residuos sólidos en la ciudad de Cutervo durante el año 2019

Año	Población de la ciudad de Cutervo	GPC domiciliaria kg/(hab·día)	Generación total domiciliaria (t/día)	Generación total no domiciliaria (t/día)	Generación total municipal (t/día)	Generación total municipal (t/año)	GPC municipal kg/(hab·día)
2019	22 254	0.52	11.57	5.81	17.38	6343.70	0.78

5.1.2. Cálculos y proyecciones para el diseño de la planta

Para conocer el comportamiento de la generación de los residuos sólidos municipales durante los próximos 5 años, que es el horizonte del presente estudio, se

proyectará la población de la ciudad de Cutervo, la generación per cápita y los residuos que favorecen el proceso de compostaje.

5.1.2.1. Proyección de la población. De acuerdo a los resultados del último Censo Nacional 2017 (INEI, 2017), el distrito de Cutervo contó con 50 905 habitantes, de los cuales el 41.69 % (21 220 habitantes) perteneció a la zona urbana y el 58.31 % (29 685 habitantes) a la zona rural.

Esta información se contrasta con los resultados del Censo Nacional 2007 (INEI, 2007), en los que el distrito contó con 53 075 habitantes, de los cuales el 31.52 % (16 728 habitantes) perteneció a la zona urbana y el 68.48 % (36 347 habitantes) a la zona rural.

Por lo tanto, se infiere que la población del distrito ha disminuido, sin embargo, es notorio el efecto migratorio de los habitantes de la zona rural a la zona urbana, pues de 2007 a 2017, la población urbana ha aumentado en un 26.85 %, mientras que la población de la zona rural ha disminuido 18.33 % durante el mismo periodo.

Para obtener la proyección de la población en la ciudad, se debe calcular la tasa de crecimiento anual inter censal, para lo cual se aplicará la siguiente fórmula (Ministerio del Ambiente, 2015):

$$r=100 \times \left(\sqrt[n]{\frac{Pf}{Po}} - 1 \right)$$

Donde:

r: Tasa de crecimiento poblacional.

Pf: Población final, según el último Censo Nacional (año 2017).

Po: Población inicial, según el Censo Nacional del año 2007.

n: Número de años transcurridos entre la Pf y Po.

5.1.2.1.1. Cálculo de la tasa de crecimiento intercensal no conocida.

$$r=100 \times \left(\sqrt[10]{\frac{21220}{16728}} - 1 \right)$$

A partir de “r”, se puede calcular la proyección de la población para los años 2017-2026 (ver Tabla 10). Para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$PF= Pi \times (1 + r)^n$$

Donde:

Pi: Población inicial, que es la población obtenida del último Censo Nacional.

r: Tasa de crecimiento anual inter censal.

n: Número de años entre el año de proyección y el año del último censo.

PF: Población final, que es la población proyectada en “n” años.

Tabla 10

Proyección de la población hasta el año 2026

N	Año	Población proyectada
	2017	21 220
1	2018	21 731
2	2019	22 254
3	2020	22 790
4	2021	23 339
5	2022	23 900
6	2023	24 476
7	2024	25 065
8	2025	25 668
9	2026	26 286

5.1.2.2. Proyección de la generación de residuos. Para el cálculo de la proyección de la generación de residuos se tendrá en cuenta la generación per cápita de residuos domiciliarios, la generación de residuos no domiciliarios y la proyección de la población calculada en el apartado anterior para los años 2021-2026.

5.1.2.2.1. Proyección de la generación domiciliaria durante los años 2021-2026. Con la proyección de la población y de la generación per cápita de residuos se determina la generación total de residuos domiciliarios al año 2026, para lo cual se asume que la GPC crece 1 % anual por factores como la expansión urbana y el crecimiento económico de la población.

En la Tabla 11 se muestra la generación de residuos sólidos, resultado del producto de la GPC por el número de habitantes.

Tabla 11

Proyección de los residuos generados a nivel domiciliario: años 2021-2026

Año	Población	GPC proyectada (kg/habitante/día)	Generación de residuos (t/día)	Generación de residuos (t/año)
2021	23 339	0.53	12.37	4514.93
2022	23 900	0.54	12.91	4710.69

Año	Población	GPC proyectada (kg/habitante/día)	Generación de residuos (t/día)	Generación de residuos (t/año)
2023	24 476	0.54	13.22	4824.22
2024	25 065	0.55	13.79	5031.80
2025	25 668	0.55	14.12	5152.85
2026	26 286	0.56	14.72	5372.86

Como se observa en la Tabla 11, para el año 2026 se espera la generación de 5372.86 toneladas de residuos sólidos municipales provenientes de los domicilios de la ciudad de Cutervo.

5.1.2.2. Proyección de la generación no domiciliaria durante los años 2021-2026. Para el cálculo de los residuos sólidos no domiciliarios se considerará que la oferta de bienes y servicios ofrecida los comercios e instituciones está directamente relacionada con la demanda y por ende el crecimiento de la población. Por ello, se utilizará la tasa de crecimiento poblacional anual de 2.41 % calculada en el apartado 5.1.2.1.1. (ver Tabla 12).

Tabla 12

Proyección de los residuos sólidos domiciliarios: años 2021-2026

Año	Generación de residuos no domiciliarios (t/día)	Generación de residuos no domiciliarios (t/año)
2021	6.09	2222.85
2022	6.24	2277.60
2023	6.39	2332.35
2024	6.54	2387.10
2025	6.70	2445.50
2026	6.86	2503.90

Como se observa en la Tabla 12, al año 2026 se espera una generación de 2685.56 toneladas de residuos sólidos no domiciliarios.

5.1.2.2.3. Proyección de la generación de residuos municipales durante los años 2021-2026. Con los datos de los dos apartados anteriores se puede estimar la generación de los residuos sólidos municipales de la ciudad de Cutervo durante los años 2021-2026 (ver Tabla 13).

Tabla 13

Proyección de la generación de residuos municipales

Año	Generación de residuos domiciliarios (t/día)	Generación de residuos no domiciliarios (t/día)	Generación de residuos municipales (t/día)	Generación de residuos municipales (t/año)
2021	12.37	6.22	18.59	6785.35
2022	12.91	6.43	19.34	7059.10
2023	13.22	6.65	19.87	7252.55
2024	13.79	6.88	20.67	7544.55
2025	14.12	7.11	21.23	7748.95
2026	14.72	7.36	22.08	8059.20

5.1.2.3. Proyección de los residuos a compostar.

5.1.2.3.1. Domiciliarios. La Tabla 14 muestra la composición porcentual de los residuos orgánicos a nivel domiciliario. Esta clasificación considera a residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras de frutas y verduras, etc.), residuos de la poda (maleza y restos de plantas), y otros residuos orgánicos (excretas de animales menores, huesos y similares).

Tabla 14

Composición porcentual de los residuos orgánicos domiciliarios

Tipo de residuo orgánico	Composición porcentual (%)
Residuos de alimentos	57.38
Residuos de maleza, poda y madera ^a	10.66
Otros residuos orgánicos	5.77
Total	73.81

^a Se considera en este tipo de residuos a ramas, tallos, raíces, hojas y cualquier otra parte de las plantas producto del clima y la poda. Este material es importante porque sirve como estructurante para el compost.

Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2018)

Cabe resaltar que se excluye del proceso de compostaje a los residuos de animales como huesos, cebos, pieles, carnes, grasas, excretas de perros y gatos, etc.; por lo que según se muestra en la Tabla 15, los residuos orgánicos que favorecen el proceso corresponden al 94.07 % de residuos orgánicos, es decir el 69.43 % del total de residuos generados en la ciudad a nivel domiciliario. Asimismo, se calcula la cantidad de material valorizable a través del compostaje (ver Tabla 16).

Tabla 15

Porcentaje de residuos orgánicos aprovechables

Tipo de residuo	Composición porcentual (%)
Aprovechable	94.07
No aprovechable	5.03
Total	100.00

Nota: Estos valores fueron calculados durante la ejecución del Programa de valorización de residuos orgánicos.

Tabla 16

Residuos domiciliarios aprovechables a través del compostaje

Año	Generación de residuos domiciliarios (t/día)	Residuos aprovechables a través del compostaje (t/día)
2021	12.37	8.59
2022	12.91	8.96
2023	13.22	9.18
2024	13.79	9.57
2025	14.12	9.80
2026	14.72	10.22

5.1.2.3.2. No domiciliarios. Se considerará únicamente a los residuos provenientes de los mercados porque además de presentar un alto índice de composición orgánica, la segregación de sus residuos es más eficiente.

Tabla 17

Composición física de los residuos orgánicos de los mercados

Tipo de residuo	Composición (%)
Residuos de alimentos	80.58

Tipo de residuo	Composición (%)
Residuos de maleza, poda y madera	3.31
Total	83.89

Fuente: SIGERSOL (2021)

Con esos valores se calcula la cantidad de residuos orgánicos provenientes de los mercados que se pueden aprovechar a través del compostaje (ver Tabla 18).

Tabla 18

Proyección de los residuos orgánicos provenientes de los mercados

Año	Generación de residuos (t/día)	Residuos aprovechables a través del compostaje (t/día)	Residuos aprovechables a través del compostaje (t/año)
2021	1.02	0.86	312.32
2022	1.05	0.88	321.51
2023	1.09	0.91	333.76
2024	1.12	0.94	342.94
2025	1.16	0.97	355.19
2026	1.20	1.01	367.44

Teniendo en cuenta la materia orgánica disponible en ambas fuentes, se calcula la cantidad de residuos que se pueden aprovechar a través del compostaje (ver Tabla 19).

Tabla 19

Cantidad de residuos orgánicos valorizables mediante el compostaje

Año	Generación de residuos domiciliarios (t/día)	Generación de residuos en los mercados (t/día)	Total (t/día)	Total (t/año)
2021	8.59	0.86	9.45	3449.25
2022	8.96	0.88	9.84	3591.60
2023	9.18	0.91	10.09	3682.85
2024	9.57	0.94	10.51	3836.15
2025	9.80	0.97	10.77	3931.05
2026	10.22	1.01	11.23	4098.95

5.1.2.4. Caracterización de los residuos que ingresan a la planta de compostaje. Durante el manejo de residuos orgánicos en la planta de compostaje se realizó la caracterización del material que ingresó a la planta, obteniendo datos como el peso promedio, la densidad promedio y su composición física, con la finalidad de obtener información sobre el comportamiento de los generadores para ampliar progresivamente el proyecto.

A continuación, se presenta el peso de los residuos que ingresaron a la planta durante 05 días consecutivos (Tabla 20), el cálculo de la densidad (Tabla 21) y su composición física (Tabla 22).

Tabla 20

Cantidad de residuos que ingresaron a la planta de compostaje

Día	1	2	3	4	5	6	7	Peso promedio
Peso (kg)	639.50	463.00	580.25	352.25	418.00	780.75	527.50	537.32

Tabla 21

Densidad promedio de los residuos que ingresaron a planta

Día	1	2	3	4	5	6	7	Densidad promedio
Densidad (kg/m ³)	365.43	264.25	331.18	201.00	240.50	450.35	350.67	314.77

En cuanto a la composición física de los residuos orgánicos valorizados en la planta de compostaje, los residuos de alimentos como cáscaras de frutas y verduras, correspondieron al 42.76 % del total, los residuos de animales (estiércol de cuy) el 37.67 %, los restos de poda el 18.53 % y los residuos inorgánicos que se filtraron en el proceso el 1.04 % (ver Tabla 22).

Cabe resaltar que la diferencia entre la composición determinada en el Estudio de caracterización (Municipalidad Provincial de Cutervo, 2019) y la calculada durante las actividades de compostaje (de acuerdo a la Tabla 22), se debe a que en los barrios donde se realiza la recolección selectiva para la valorización de los residuos orgánicos, las familias se dedican a la crianza de cuyes; por lo tanto, el porcentaje de otros residuos orgánicos (estiércol de cuy) es superior.

Tabla 22

Composición física de los residuos orgánicos valorizados en la planta de compostaje

Descripción	Peso (kg)						%
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Total	
Residuos de alimentos (cáscaras y restos de frutas y verduras y otros)	95.92	255.95	290.25	156.05	250.70	1048.87	42.76
Restos de poda	159.88	45.00	116.05	70.90	62.70	454.53	18.53
Otros orgánicos (estiércol de cuy)	378.25	158.38	169.06	120.76	97.72	924.17	37.67
Residuos inorgánicos (bolsas plásticas, botellas, papel, etc.)	5.45	3.67	4.89	4.54	6.88	25.43	1.04
Total	639.50	463.00	580.25	352.25	418.00	2453.00	100.00

Para el cálculo de la densidad del guano de cuy se tomó cinco muestras en un recipiente de 15 litros y se obtuvo los siguientes resultados (ver Tabla 23).

Tabla 23

Cálculo de la densidad promedio del estiércol de cuy

Peso del guano (kg)	Volumen del recipiente (L)	Volumen del recipiente (m ³)	Densidad calculada (kg/m ³)
5.55	15.00	0.015	370.00
5.90	15.00	0.015	393.33
4.60	15.00	0.015	306.67
5.40	15.00	0.015	360.00
4.30	15.00	0.015	286.67
Densidad promedio (kg/m ³)			343.33

Asimismo, se calculó la densidad de los restos de alimentos, como cáscaras de frutas y verduras, y la densidad de la fracción vegetal (restos de poda), obteniendo:

Tabla 24

Cálculo de la densidad de los restos de alimentos

Peso de los restos de alimentos (kg)	Volumen del recipiente (L)	Volumen del recipiente (m ³)	Densidad calculada (kg/m ³)
5.32	18.00	0.018	295.56
8.64	18.00	0.018	480.00
6.29	18.00	0.018	349.44
8.35	18.00	0.018	463.89
9.08	18.00	0.018	504.44
Densidad promedio (kg/m ³)			418.66

La densidad de los residuos de alimentos es un indicador bajo, porque corresponde a residuos secos, cuya función es contener la generación de lixiviados y cubrir el material para evitar vectores indeseados y mantener la temperatura adecuada.

Tabla 25

Cálculo de la densidad de la fracción vegetal

Peso de la fracción vegetal (kg)	Volumen del recipiente (L)	Volumen del recipiente (m ³)	Densidad calculada (kg/m ³)
1.23	18.00	0.018	68.33
0.95	18.00	0.018	52.78
1.76	18.00	0.018	97.78
1.69	18.00	0.018	93.89
1.52	18.00	0.018	84.44
Densidad promedio (kg/m ³)			79.44

5.1.3. Localización y tamaño de planta

La presente tesis propone una mejora del sistema actual de la planta de compostaje municipal, por lo tanto, el área y su localización son la base para la nueva distribución de planta. Cabe resaltar que dicho terreno es propiedad de la municipalidad, por ello cualquier cambio es factible.

5.1.3.1. Tamaño de planta. El terreno donde se ubica la planta piloto de compostaje tiene un área de 1000 m², que incluye aproximadamente 350 m² de parcelas

destinadas a la siembra de productos orgánicos para demostrar los beneficios del compost.

5.1.3.2. Macrolocalización. El proyecto se realizará en la ciudad, distrito y provincia de Cutervo en la región Cajamarca, ubicada a 2648 m.s.n.m y con coordenadas UTM 17 M, 741331 E, 9294571 S. La ciudad está asentada en un terreno irregular sobre las faldas del Cerro Ilucán.

Las características climatológicas de la ciudad se observan en la Tabla 26, infiriéndose que el clima es frío y constante, con un rango de temperatura comprendido entre los 9 °C y 19 °C. Por otro lado, existen lluvias durante todo el año, con un promedio anual de precipitación de 122.46 mm, siendo marzo el mes con mayores precipitaciones (304.20 mm).

Tabla 26

Temperatura máxima, mínima y promedio mensual

Mes	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)
	Máxima	Mínima	Media	
Abril 2021	18.51	10.17	14.34	58.20
Mayo 2021	17.51	9.89	13.70	131.30
Junio 2021	17.44	9.83	13.64	65.30
Julio 2021	17.72	8.86	13.29	21.50
Agosto 2021	17.46	9.48	13.47	125.20
Setiembre 2021	18.05	9.86	13.96	55.60
Octubre 2021	18.58	10.5	14.54	200.00
Noviembre 2021	18.83	9.12	13.98	178.60
Diciembre 2021	18.47	9.91	14.19	106.10
Enero 2022	18.52	9.31	13.92	64.70
Febrero 2022	17.24	9.67	13.46	189.20
Marzo 2022	17.9	9.54	13.72	304.20
Abril 2022	17.85	10.24	14.05	92.10
Promedio anual	18.01	9.72	13.86	122.46

Fuente: Estación meteorológica SENAMHI – Cutervo (2021-2022)

5.1.3.3. Microlocalización. Desde el punto de vista de la microlocalización, la planta de compostaje se ubica de acuerdo a las siguientes coordenadas UTM (ver Tabla 27), las cuales corresponden a los vértices del terreno (ver Figura 11).

Tabla 27

Coordenadas UTM WGS-84 Datum del terreno de la planta actual

	Este	Norte	Elevación (m.s.n.m.)
A	741648.58	9295096.96	2722
B	741600.09	9295097.67	2722
C	741601.05	9295085.77	2719
D	741584.62	9295084.66	2717
E	741585.70	9295072.61	2715
F	741598.67	9295071.72	2715
G	741598.22	9295062.01	2713
H	741622.70	9295065.53	2715
I	741628.40	9295071.10	2716
J	741640.07	9295075.16	2717



Figura 11. Vértices del terreno destinado para el compostaje

Fuente: Google Earth (2021)

Por otro lado, es fundamental considerar los requisitos técnicos mínimos para la implementación de una planta de valorización de residuos sólidos de acuerdo al Reglamento del Decreto Legislativo 1278, por lo cual en la Tabla 28 se analiza las condiciones del área actual.

Tabla 28

Requisitos para la implementación de una planta de compostaje

Requisitos mínimos	Características del área implementada
No estar ubicado en zona residencial, comercial o recreacional	<ul style="list-style-type: none"> – La planta se ubica en la parte alta de la ciudad, en una zona denominada “Falso Paquisha” (Ver Figura 12). – En esta zona también se ha implementado el vivero municipal, a 100 metros de distancia. (Ver Figura 13).
No obstaculizar el tránsito vehicular o peatonal	<ul style="list-style-type: none"> – Para acceder al área, se toma un camino que rodea el barrio Buena Vista y no interrumpe el tránsito vehicular ni peatonal (Ver Figura 14).
Disponer de vías de acceso para transporte	<ul style="list-style-type: none"> – Es una zona accesible durante todo el año por todo tipo de transporte rodante, es amplia para la descarga y el parqueo (Ver Figura 15).

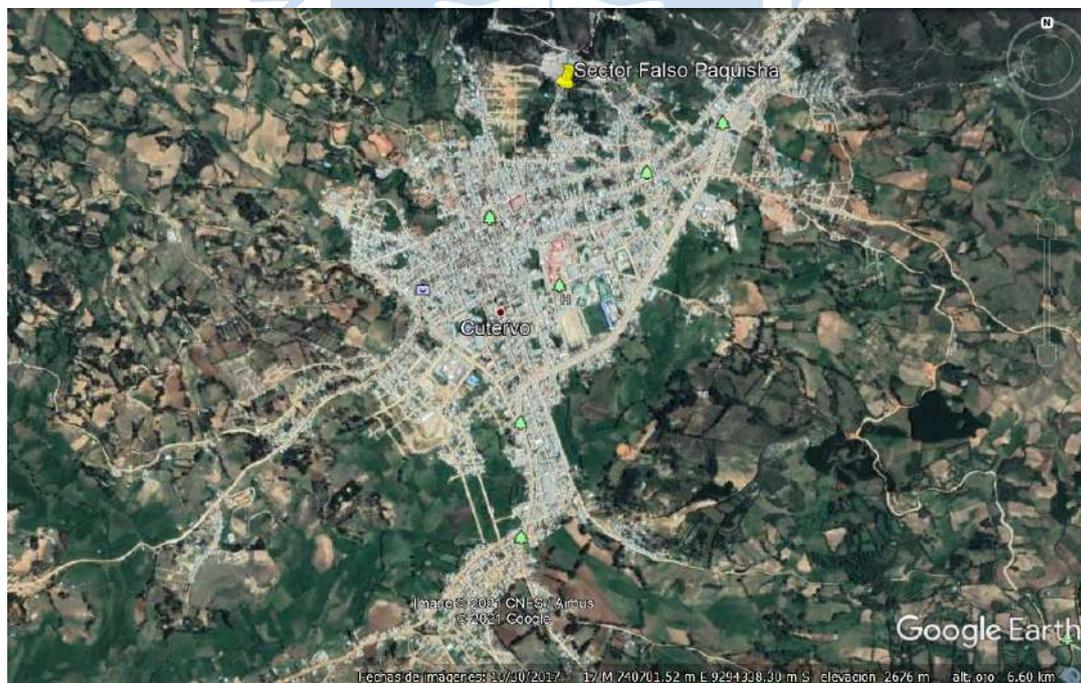


Figura 12. Ubicación del sector Falso Paquisha

Fuente: Google Earth (2021)

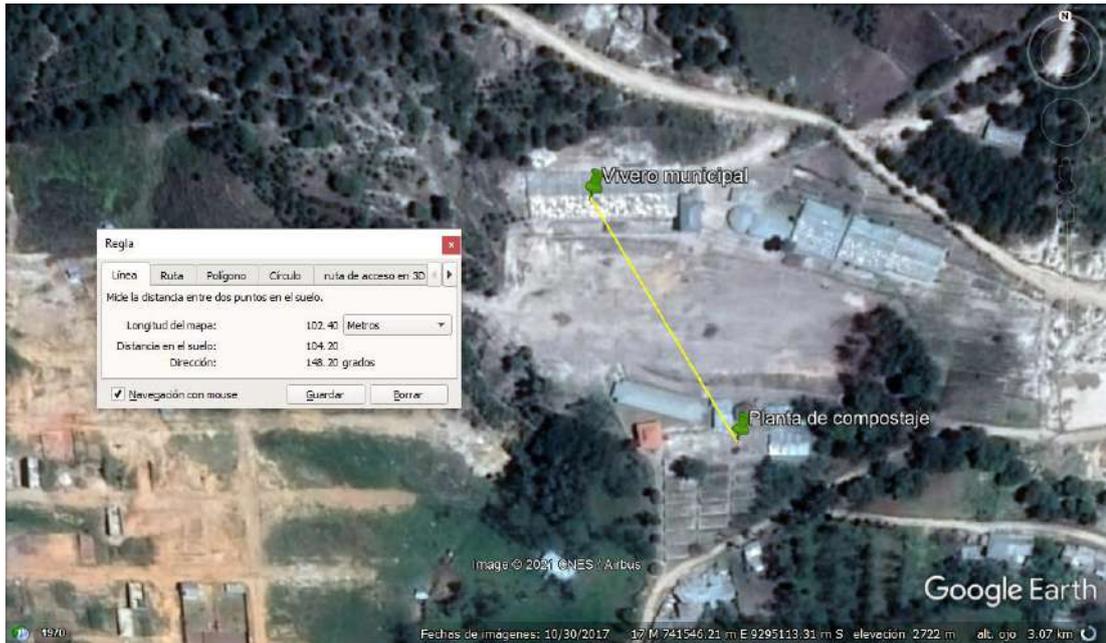


Figura 13. Distancia entre el vivero municipal y la planta de compostaje
Fuente: Google Earth (2021)



Figura 14. Vía de acceso que rodea al barrio Buena Vista



Figura 15. Acceso a la entrada de la planta de compostaje

Se describe un recorrido aproximado de 1.44 kilómetros de distancia entre el parque principal y la planta de compostaje. Esta es la única ruta con acceso vehicular, tal como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 16. Recorrido de los vehículos desde el parque hasta la planta de compostaje
Fuente: Google Earth (2021)

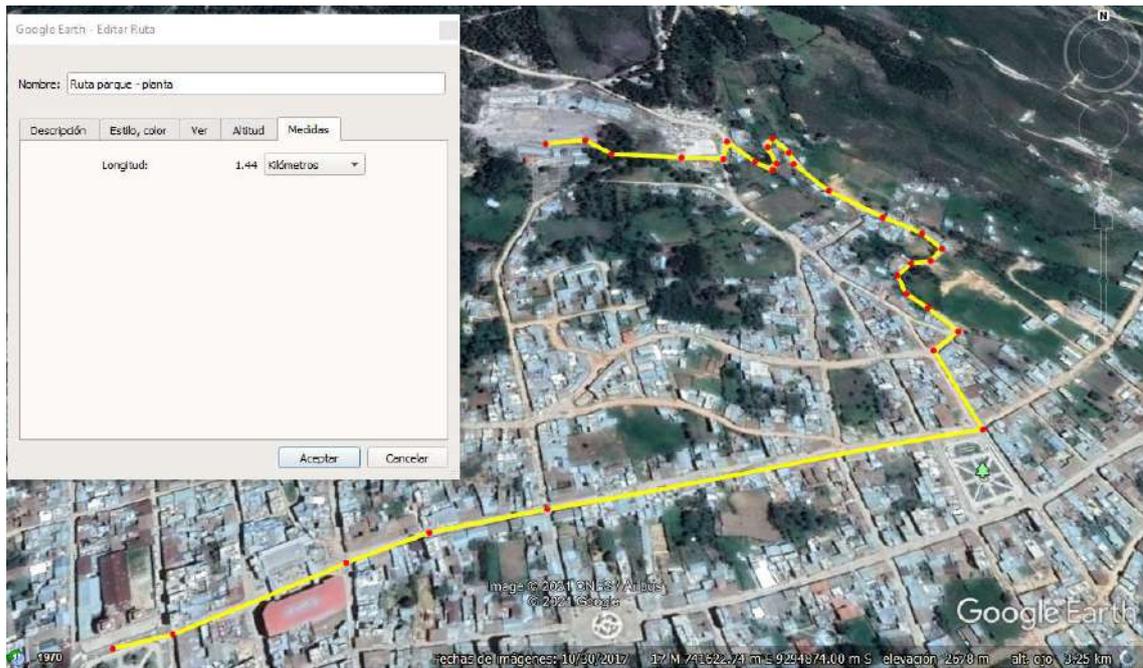


Figura 17. Longitud del recorrido: parque principal hasta la planta de compostaje
Fuente: Google Earth (2021)

5.1.3.4. Justificación de la ubicación y localización de planta

El tratamiento y valorización de residuos orgánicos en la ciudad de Cutervo es factible, por representar el mayor porcentaje del total de residuos sólidos generados, por lo que la proximidad y la disponibilidad del recurso no suponen un problema.

Por otro lado, la producción de compost es una alternativa de tratamiento de residuos a través de la degradación y la estabilidad de su contenido de manera ambientalmente segura. Esta estrategia minimiza el impacto ocasionado por la ineficiente gestión de residuos municipales, lo cual se refleja en el botadero “El Infiernillo” y la problemática socio ambiental que ha originado.

Otro de los motivos que justifican la producción de abono orgánico, es su utilidad, debido a que contribuiría con el desarrollo económico del sector agropecuario, que es al que mayormente se dedica la población cutervina.

Por último, el terreno no tiene impedimento legal ni técnico que comprometa la continuidad operativa de la planta, ya que es administrado directamente por la municipalidad.

5.2. Ingeniería y tecnología

Para el proceso de compostaje se utilizará la misma tecnología que en la planta piloto, es decir, el compostaje a través de microorganismos eficientes en un sistema abierto de pilas estáticas, que resultan de acumular restos orgánicos. (Ver Apéndice 1 para una mejor descripción).

5.2.1. Descripción del producto

El producto de la transformación de los residuos orgánicos bajo condiciones controladas se denomina compost o abono orgánico, el cual, estable e higienizado, puede ser aplicado como abono, sustrato o recuperador de suelos, al poseer un importante contenido en materia orgánica y nutrientes. Asimismo, su utilización como enmienda orgánica o producto restituidor promueve la fertilidad del suelo y evita su desertificación.

Para este estudio se distinguirán tres tipos de compost producidos en la planta de compostaje de acuerdo a su utilización (ver Tabla 29) y se almacenará en sacos de polipropileno con capacidad de 50 kg, cuyas medidas son 25.5" x 43" (65 cm x 110 cm).

Por otro lado, los requisitos del compost para su utilización en la actividad agraria (producción agrícola de cultivos transitorios y permanentes), está regulada bajo la Norma Técnica Peruana 201.207:2020: FERTILIZANTES. Compost para uso agrícola. Requisitos, aprobada bajo Resolución Directoral N° 042-2020-INACAL/DN.

Tabla 29

Comparación del abono de acuerdo a su granulometría

Tipo de abono cosechado	Tipo de cultivo	Fotografía
Fino	Plantas ornamentales, hortalizas, mantenimiento del vivero municipal	
Grueso	Maíz, papa	
Mixto	Árboles frutales, café	

5.2.2. Proceso productivo

El proceso de valorización de residuos sólidos orgánicos municipales inicia desde la segregación en las fuentes generadoras, y se complementa con actividades como el pesado de residuos casa por casa, la recolección y el transporte de los residuos a la planta de compostaje.

Por otro lado, el proceso de producción de abono orgánico, objeto del presente estudio, está comprendido por:

1. Ingreso de los residuos sólidos a la planta de compostaje.
2. Descarga del material.
3. Pesado.
4. Separación de los residuos impropios.
5. Picado o corte del material orgánico.
6. Activación de los microorganismos eficientes.
7. Armado de las pilas.
8. Secado.
9. Afino o cernido.
10. Empacado.

Así como el control del proceso a través del volteo de las pilas, la toma de la temperatura, el control de la humedad y el riego, de ser el caso.

5.2.3. Diseño del proceso

A continuación, se detalla las operaciones que se llevarán a cabo durante el proceso productivo.

5.2.3.1. Recepción, descarga y almacenamiento de los residuos. El proceso de producción de compost inicia con el ingreso del material proveniente de la recolección de los residuos domiciliarios, de los mercados y del mantenimiento de las áreas verdes. La recepción se hará en la zona de descarga, donde el personal pesará los residuos y los registrará de acuerdo a su origen, incluyendo la fecha y hora de ingreso.

Asimismo, se dispondrá material en el almacén de residuos. Por ejemplo, los residuos provenientes del mantenimiento de las áreas verdes, el estiércol de cuy, etc.

Por último, se realizará la limpieza y desinfección del vehículo recolector.

5.2.3.2. Separación. La separación consiste en eliminar el material impropio que se haya filtrado y que desfavorezca el proceso de compostaje. Esto es realizado mediante selección manual. Una vez finalizado, se pesa el material de descarte para calcular el peso del material orgánico que pasará a las siguientes etapas, mediante la siguiente fórmula:

$$Pt_{(t)} - Pd_{(t)} = Pc_{(t)}$$

Donde:

Pt: Peso total de residuos que ingresaron

Pd: Peso del material de descarte

Pc: Peso del material a compostar

t: toneladas

Debido a la eficiente segregación en las fuentes, el porcentaje de material impropio se ha estimado en 1.04 %, el cual se almacenará para su posterior eliminación.

5.2.3.3. Picado. La mayor parte de los residuos que llegan a planta son residuos húmedos, como cáscaras y restos de frutas y verduras, los cuales son cortados de forma irregular hasta un tamaño mínimo de cinco centímetros. En esta etapa se utiliza machetes.

Por otro lado, la fracción vegetal como tallos y ramas son procesados en la máquina picadora de residuos orgánicos adquirida por la municipalidad durante el desarrollo del estudio.

Es preciso mencionar que, a menor tamaño de partícula, mayor es el área de intervención de los microorganismos para la degradación, por lo que este paso define la duración del proceso.

5.2.3.4. Formación de las pilas de compostaje. Consiste en el apilamiento de los residuos orgánicos mediante capas, alternando residuos secos y residuos húmedos, hasta una altura recomendada de un metro como máximo (ver Tabla 30). Esta operación se realiza de forma manual utilizando palanas, rastrillos, carretillas, etc.

De acuerdo a las recomendaciones técnicas para el compostaje, la primera capa debe contener residuos secos como rastrojo, paja y aserrín, para disminuir la generación de lixiviados. Por ello, se acumulará este tipo de residuos hasta una altura de 10 centímetros, resultando una capa de 0.41m^3 ($2.70\text{ m} \times 1.50\text{ m} \times 0.10\text{ m}$), y considerando que la densidad de la fracción vegetal es 79.44 kg/m^3 , resulta un total de 32.57 kilos para la primera capa.

La segunda capa tendrá 35 centímetros de altura y estará formada por guano de cuy. El volumen de esta capa será de 1.42 m^3 ($2.70\text{ m} \times 1.50\text{ m} \times 0.35\text{ m}$), y considerando que la densidad del guano de cuy es 343.33 kg/m^3 , resulta un total de 487.53 kg de guano.

La tercera capa será similar a la primera, por lo que se necesitará un total de 32.57 kilos de residuos secos.

La cuarta capa tendrá 35 centímetros de altura y estará formada por residuos húmedos: restos de frutas y verduras. El volumen de esta capa será de 1.42 m^3 ($2.70\text{ m} \times 1.50\text{ m} \times 0.35\text{ m}$), y considerando que la densidad es 428.66 kg/m^3 , resulta un total de 594.50 kilos.

La quinta y última capa tendrá las mismas características que las capas de material seco, es decir se necesitará 32.57 kilos.

Tabla 30

Capas que conforman una pila de compost

5ta capa: residuos secos (restos de poda)

4ta capa: residuos húmedos (cáscaras y restos de frutas y verduras)

3era capa: residuos secos (restos de poda)

2da capa: guano de cuy

1era capa: residuos secos (restos de poda)

En resumen, se necesita 97.71 kilos de residuos secos, 487.53 kilos de guano de cuy y 594.50 kilos de residuos húmedos. La capacidad de cada pila será de 1.18 toneladas, con un volumen de 4.05 m³ y una densidad global de 291.36 kg/m³ (Ver Tabla 31).

Tabla 31

Dimensiones de la pila

Parámetro	Medida
Largo (m)	2.70
Ancho (m)	1.50
Altura (m)	1.00
Volumen (m ³)	4.05
Peso (kg)	1180.00
Densidad (kg/m ³)	291.36

Cabe resaltar que se debe inocular la mezcla de microorganismos eficientes en cada capa formada, con el fin de humedecer el material y acelerar la descomposición por la alta carga microbiana añadida.

5.2.3.5. Compostaje. Durante la fase de descomposición, se deberá controlar la temperatura del material para determinar la necesidad de oxígeno y evitar condiciones anaeróbicas. Se distinguirá tres etapas: mesófila, termófila y el enfriamiento del material (ver punto 3.2.1.). En la fase inicial se elevará la temperatura rápidamente por la activación de los microorganismos y su adaptación al medio. Asimismo, es necesario controlar la humedad para que se encuentre en el nivel adecuado.

Si bien el sistema será de pilas estáticas, para regular los parámetros descritos se recomienda revolver la pila o humedecerla, para airearla e ir disminuyendo gradualmente su temperatura. En el punto 5.2.4. se explicará el control del proceso con mayor detalle.

5.2.3.6. Secado. Este proceso dura 3 días con una pérdida del 20 % en peso. Consiste en exponer el material directamente al sol para disminuir la humedad adquirida durante la fase de enfriamiento.

5.2.3.7. Afino. Una vez finalizada la etapa de secado, se zarandea el material para:

- Separar las impurezas que no fueron eliminadas anteriormente.
- Obtener un compost según la granulometría deseada.
- Recuperar el material estructurante y los residuos que no se han terminado de descomponer.

Para este proceso se utilizan mallas de 0.5 cm y 1 cm, para obtener los productos descritos en la Tabla 29.

5.2.3.8. Empacado. El producto se almacena en sacos de polipropileno con un peso de 45 kilogramos.

5.2.4. Balance de materia

Para el balance, se ha considerado la experiencia en la planta de compostaje municipal, donde se determinó que las pérdidas después del picado manual (picado 2) son despreciables, mientras que en el picado con máquina (picado 1) resulta el 80 % del material ingresante al proceso. Por otro lado, el material resultante del proceso de compostaje (degradación) es un 50 % del valor inicial, mientras que el del secado y del afino corresponden a un 90 % y 90 % respectivamente.

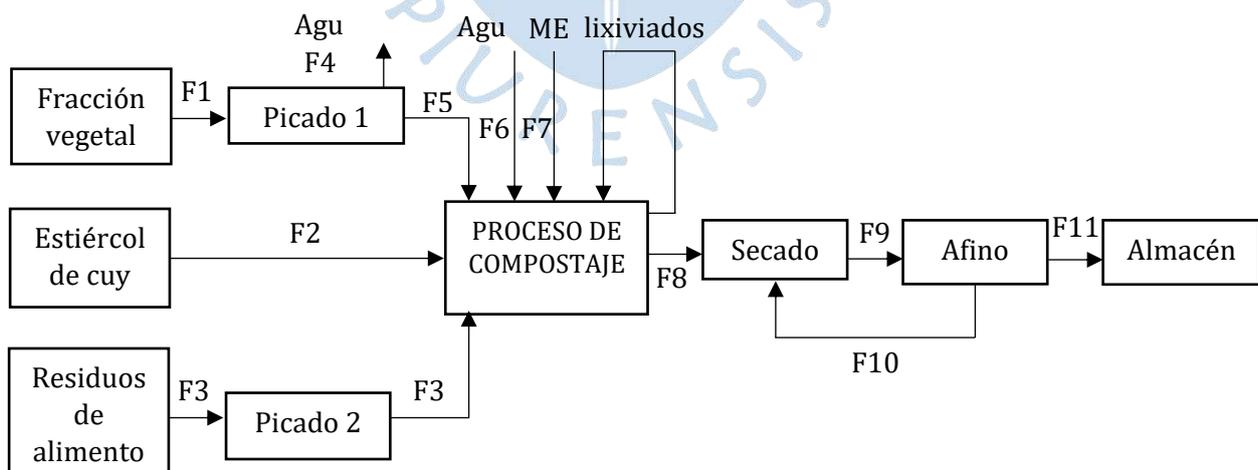


Figura 18. Diagrama del proceso de compostaje

Tabla 32

Balance de materia de acuerdo al proceso

Proceso	Entrada (kg)	Salida (kg)	Recuperación de materia orgánica (%)
Picado 1	F1= 117.25	F5=97.71 F4= 19.54	80
Picado 2	F3= 594.50	F3= 594.50	100
Compostaje*	F5= 97.71 F6= 600.00 F7= 20.00 F2= 487.53 F3= 594.50	F8= 904.37	50
Secado	F8=904.37	F9= 723.50	80
Afino	F9= 723.50	F11= 651.15 F10= 72.35	90

* En el proceso de compostaje ocurren pérdidas de vapor de agua, así como el recojo de las aguas residuales provenientes del regado del material y de la generación de lixiviados, las cuales son almacenadas en el pozo adecuado para humedecer las próximas pilas a formar.

Para el cálculo del rendimiento global del proceso de compostaje, se dividirá el material resultante del proceso de afino (651.15 kg) sumado a la cantidad de agua que resulta del picado de la fracción vegetal (19.54 kg) entre la sumatoria del material que ingresa al proceso de compostaje: fracción vegetal (117.25 kg), estiércol de cuy (487.53 kg), restos de alimentos (594.50 kg), agua (600 kg) y microorganismos eficientes (20 kg). Por lo cual se tiene que:

$$\eta_{\text{global}} = \frac{F_{11}+F_{14}}{F_1+F_2+F_3+F_6+F_7} \times 100\% = \frac{651.15+19.54}{117.25+487.53+594.50+600+20} \times 100\% = 36.87\%$$

5.2.5. Control del proceso

Algunos parámetros como la temperatura, el pH, la humedad y el oxígeno, condicionan la preservación de la población de microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje. Por ello, es necesario realizar monitoreos continuos que incluyen actividades como la medición de la temperatura, el volteo de las pilas para su aireación y la regulación de la humedad.

5.2.5.1. Temperatura. El incremento de temperatura está relacionado a la oxidación biológica exotérmica originada por la alta actividad microbiana.

Este factor permite conocer la fase en que se encuentra el proceso, así como el momento en el que se debe realizar los volteos. Por otro lado, alcanzar temperaturas de

65 °C - 70 °C asegura la eliminación de agentes patógenos contenidos en los restos vegetales y animales, y la destrucción de semillas de las malas hierbas y otros componentes que podrían perjudicar el producto.

Se recomienda que el control de la temperatura sea diario, para lo cual, se introduce el termómetro en distintos puntos de la pila, incluyendo la parte interna y externa y se calcula el promedio de dichas lecturas.

El aumento acelerado de temperatura es un indicador de que el proceso de degradación está ocurriendo. En el caso de que la pila se enfríe y aún no se haya completado el proceso de degradación, se recomienda añadir materiales con alto contenido en nitrógeno, como estiércoles, restos de frutas y verduras, residuos frescos de poda, etc.

Actualmente, la planta de compostaje cuenta con un termómetro digital HANNA HI 145 con las siguientes características:

- Rango de temperaturas: -50° C - 220 °C
- Precisión: ± 0.3 °C
- Longitud de sonda: 125 mm
- Modelo: tipo T

5.2.5.2. Humedad. El rango óptimo de humedad durante el proceso de compostaje está comprendido entre el 45 % y el 60 % de agua en peso. Un mayor o menor valor significa la interrupción de la actividad microbiana, el retraso de la degradación, y por ende la inestabilidad del producto. A continuación, se presentan problemas y soluciones ante un porcentaje de humedad inadecuado:

Tabla 33

Posibles dificultades a causa de una humedad inapropiada

Porcentaje de humedad del material	Problema	Solución
<45 %	Cesa el desarrollo de la actividad microbiana, por lo tanto, el proceso de compostaje se retarda.	Regar con moderación y añadir restos húmedos: restos de frutas y verduras.
>60 %	No circula el aire al interior de la pila, por lo tanto, el proceso podría convertirse en anaeróbico generando malos olores.	Añadir restos secos: hojas, restos de poda, paja, aserrín, etc., y voltear el material para airearlo.

5.2.5.3. Aireación. La falta de aireación tiende a generar humedad por la concentración de vapor de agua en la materia orgánica. Ante esto, los microorganismos aeróbicos son reemplazados por microorganismos anaeróbicos generando malos olores y acidez por el exceso de metano (CH_4), ácido acético y ácido sulfhídrico (H_2S).

El exceso de oxígeno provoca el descenso de la temperatura del material, por lo cual el enfriamiento también afecta la actividad de los microorganismos.

La necesidad de aireación (oxigenación) varía de acuerdo a cada etapa del proceso, siendo la mayor tasa de consumo durante la fase termófila (Román, Martínez y Pantoja, 2013).

5.2.5.4. pH. El pH depende del tipo de residuo orgánico que se vaya a tratar y varía durante todo el proceso de compostaje. Se debe procurar mantener un pH neutro o cercano (entre 6 y 7.5), ya que valores menores o mayores impiden la actividad microbiana.

5.2.5.5. Olores. La generación de olores se minimiza cubriendo el material con paja, aserrín u otro material seco que absorba los restos líquidos generados por la descomposición, así como remover el material para evitar que los riegos lo compacten. A su vez, esto minimiza la presencia de vectores indeseados como moscas, aves y otros.

5.2.5.6. Lixiviados. Para disminuir la generación de residuos líquidos, se debe disponer de suficiente fracción vegetal como paja, restos de poda u otro material absorbente como el aserrín, para suministrar a las pilas durante su formación.

Se calcula que, por cada tonelada de residuos orgánicos se producen 20 litros de líquido residual, los cuales servirán para la humectación e inoculación de microorganismos, por su alta carga microbiana.

5.2.6. Dimensionamiento y distribución de planta

La infraestructura debe considerar como mínimo:

- Valla perimetral que delimite toda la instalación, incluidos el almacén de residuos y el de producto final.
- Zonas de limpieza y desinfección de vehículos.
- Sistemas de recogida y gestión de lixiviados y aguas pluviales: sistemas de canalización y depósitos.
- Las proporciones de los materiales: residuos sólidos y líquidos, estructurantes y los complementarios para la activación de los microorganismos eficientes.
- La maquinaria y los equipos disponibles.
- Las zonas complementarias para el movimiento del personal.
- Disponer de áreas para la descarga del material, el pesado, la selección manual, el armado de las pilas, el cernido y empaclado del compost, el almacén de producto

terminado, el almacén de equipos y herramientas, y los baños y vestuarios del personal.

- Contar con áreas para la maniobra y operación de vehículos y equipos sin perturbar las actividades operativas.
- Protección frente a la lluvia, porque puede desfavorecer las características del material a compostar y porque no interesa incrementar la generación de lixiviados.
- Independización del área de manejo de residuos del área administrativa.
- Contar con letreros y señalización.

5.2.6.1. Distribución de las áreas. La planta dispone de un área de 1000 m² y su distribución se realizará de acuerdo a las siguientes áreas:

5.2.6.1.1. Recepción y descarga del material. 11 m². En esta zona se realizará el pesado del material, la selección manual y el registro del material aprovechable y no aprovechable.

5.2.6.1.2. Compostaje. 550 m². Para el cálculo de la superficie de la zona de compostaje se ha considerado la cantidad de residuos que ingresan a planta, la duración de la fase de descomposición y la distancia entre las pilas. Aquí se realizará el armado, la inoculación de los microorganismos eficientes y los volteos para airear el material.

Esta zona debe contar con una pendiente adecuada para facilitar el recojo de lixiviados.

5.2.6.1.3. Secado. 90.65 m². Para proteger el material de las lluvias, se techará 31.45 m², y lo restante (59.20 m²) será una superficie libre. Asimismo, se ha contemplado el espacio para los cambios de ubicación del material.

En el área de secado se colocará plástico doble cara donde se extenderá el compost proveniente de la zona de compostaje, para que se seque directamente al sol.

5.2.6.1.4. Afino. 31.45 m². Se ubicarán las cribas metálicas para zarandear el material. Al finalizar, se empacará el compost en los sacos de polipropileno.

5.2.6.1.5. Almacén de producto terminado: 31.5 m². Se almacenará el compost hasta su utilización.

5.2.6.1.6. Almacén de material estructurante y otros residuos orgánicos. Comprende 14.11 m². Donde se almacenarán los residuos de frutas y verduras, estiércol, restos de poda, entre otros.

5.2.6.1.7. Oficina administrativa. 9 m². Donde se emitirán los informes, registro de material y recepción del público interesado.

5.2.6.1.8. Almacén de insumos, equipos y herramientas. 14.11 m². Se almacenará la picadora TRP-11 y las herramientas que se necesitan para elaborar el compost: carretillas, palanas, rastrillos, manguera, etc.

5.2.6.1.9. Vestuarios y baños: 11.32 m². Se dispondrá servicios higiénicos y vestuarios para el personal.

5.2.6.1.10. Caseta de vigilancia: 3.15 m². Se ubicará el personal de seguridad de la planta.

5.2.6.1.11. Recepción: 22 m².

5.2.6.1.12. Pozo de aguas pluviales: Se almacenará el agua de lluvia que se recolecte.

5.2.6.1.13. Pozo de lixiviados: Se almacenará el residuo líquido producto de la humectación de las pilas.



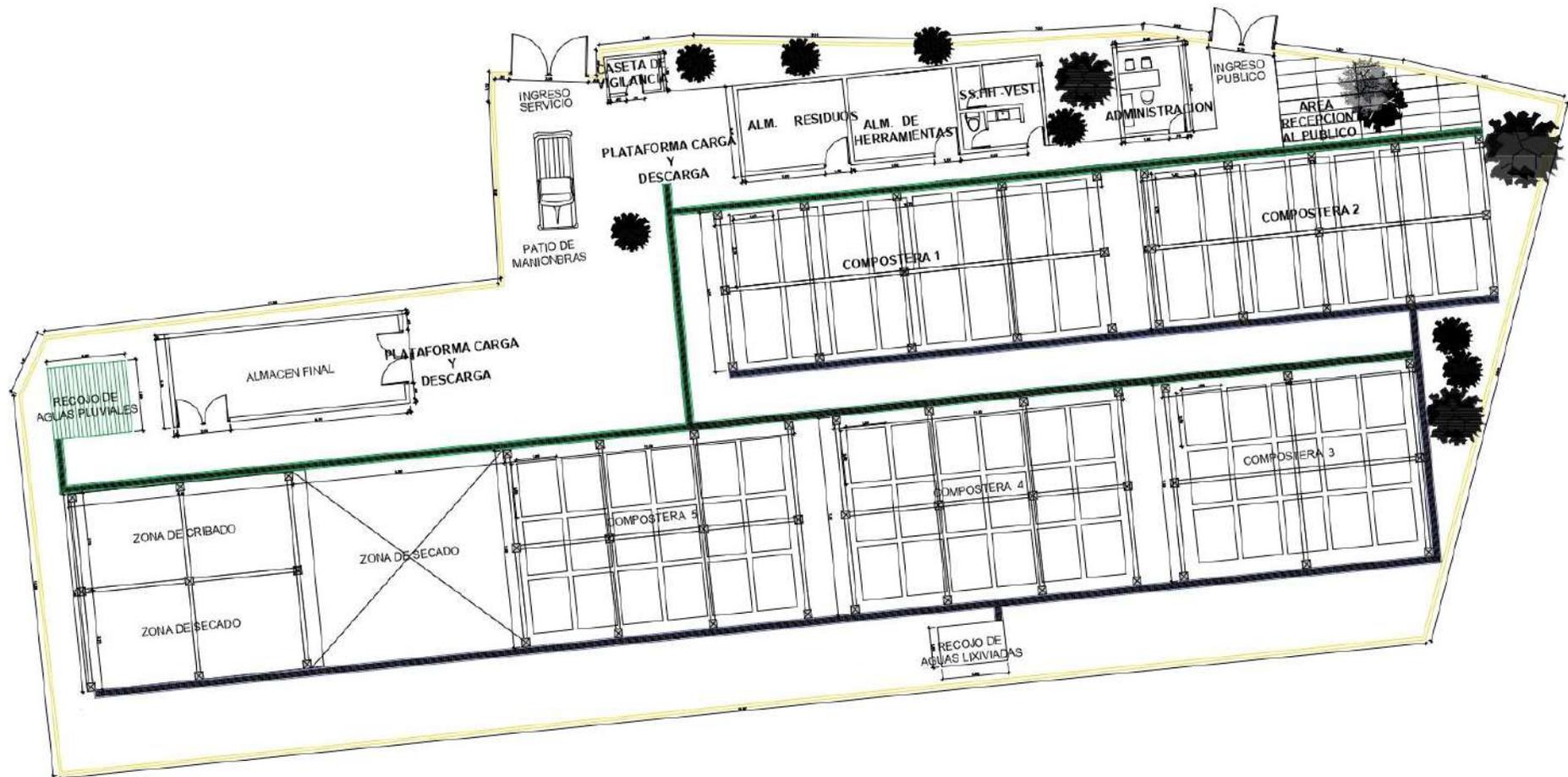


Figura 19. Plano de distribución del nuevo diseño de planta

5.2.6.2. Requerimiento de insumos, tecnología y equipos. Para llevar a cabo el proceso de compostaje se necesitará:

1. Criba con malla metálica
2. Carretillas buggy
3. Palanas
4. Rastrillos
5. Plástico doble cara
6. Sacos de polipropileno
7. Hilo rafia
8. Manguera
9. Lampas
10. Trinchas
11. Escobas
12. Machetes tipo sable
13. pH-metro
14. Equipos de protección personal:
 - Uniforme: camisa y pantalón drill con cinta reflectiva
 - Camiseta manga larga
 - Gorro tipo legionario
 - Botas de jebe
 - Zapatillas
 - Lentes de seguridad transparentes
 - Máscaras antigases doble filtro
 - Guantes anti corte con palma de cuero
 - Guantes anti corte de látex
15. Insumos de limpieza
 - Detergente
 - Lejía
 - Jabón

Durante el desarrollo del presente estudio, la Municipalidad Provincial de Cutervo, adquirió una máquina picadora de desechos vegetales, de la marca PENAGOS modelo TRP-11, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Producción (kg/h): 2000
- Capacidad (m³/h): 5 - 6
- Autorregula la entrada de los residuos orgánicos, debido a su sistema basculante que genera presión sobre el material para lograr uniformidad en el proceso de picado.



Figura 20. Máquina picadora adquirida por la municipalidad
Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2020)

Se entiende que la automatización del proceso de compostaje, a través de maquinarias y equipos como: balanza electrónica, faja transportadora (de selección y transporte), cargador frontal, horno de secado, tamiz vibratorio, entre otros, impulsarían la eficiencia de las operaciones llevadas a cabo en la planta de compostaje; sin embargo, en las últimas dos gestiones municipales (2015-2022), y en la mayoría de municipios a nivel nacional, existe falta de voluntad política para solucionar problemas ambientales.

Es importante comentar que, los equipos mencionados en el párrafo anterior se habían considerado, sin embargo, los encargados de la municipalidad invierten lo mínimo en proyectos que gestionan adecuadamente los residuos sólidos, a pesar del presupuesto recibido por el cumplimiento de las metas del Plan de Incentivos (PI). La Municipalidad Provincial de Cutervo asigna los recursos estrictamente necesarios para asegurar el financiamiento del Estado por la consecución de resultados asociados al PI, por lo cual es poco probable que se pueda aplicar este requerimiento de tecnología.

Capítulo 6

Evaluación económica del proyecto

6.1. Financiamiento

La construcción e implementación será financiada con los Incentivos Presupuestarios por el cumplimiento de las metas establecidas por el Ministerio de Economía y Finanzas durante el año previo. Se debe tener en cuenta que estos recursos no pueden ser destinados, bajo responsabilidad, a fines distintos para los cuales fueron transferidos, es decir, que deben ser necesariamente invertidos para el sostenimiento del sistema integrado de manejo de residuos sólidos municipales.

Para el financiamiento de la propuesta se debe elaborar un plan de valorización de residuos sólidos municipales, asignando el presupuesto necesario para la consecución de las actividades planteadas.

La inversión para la implementación de la mejora de las condiciones y la capacidad de la planta actual de compostaje será financiada con el Plan de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal, como parte del cumplimiento de la Actividad 2: "Valorización de residuos sólidos orgánicos municipales". En el año 2018 se aprobó la certificación presupuestal por S/ 98 865.00, y por S/ 58 980.00 para el año 2020.

6.2. Impacto

6.2.1. Social

Con el mejoramiento de la capacidad de la actual planta de compostaje se generará seis puestos de trabajo.

Se concientizará a la población sobre el manejo adecuado de los residuos sólidos y se educará sobre opciones ambientalmente adecuadas para recuperar los residuos orgánicos.

Se brindará el producto terminado a los agricultores locales y participantes que lo requieran, contribuyendo de esta forma con la agricultura limpia.

Se beneficiará con la mejora de los productos que los agricultores expenden.

Mejora de la calidad de vida de las familias que residen cerca al botadero.

6.2.2. Ambiental

Se reducirán toneladas de dióxido de carbono contribuyendo así a la preservación del ambiente.

Se reducirán toneladas de residuos dispuestos inadecuadamente en el botadero municipal.

6.2.3. Gestión municipal

Se potenciará el Programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de residuos, involucrando a la población en su sostenibilidad.

Mantenimiento de las áreas verdes.

6.3. Presupuesto para la realización de la mejora planteada

A continuación, se presentan los costos de construcción e implementación de la propuesta: tales como mano de obra y materiales para delimitar las áreas de la nueva distribución de planta, y los costos operativos: mano de obra directa y materiales directos e indirectos, propios del proceso de compostaje.

6.3.1. Costos de construcción e implementación de la propuesta

El costo en los materiales para la construcción e implementación de la mejora planteada se ha estimado en S/ 26 425.00 y S/ 8000.00 en mano de obra, que corresponde a la contratación de cuatro operarios y un maestro de obra por el período de 30 días que se realizará la mejora planteada. En la Tabla 34 se especifican los materiales a utilizar para la construcción de las áreas: composteras, zona de secado, pozo de aguas pluviales y de lixiviados, zona de afino, almacén de residuos, almacén de producto terminado, almacén de herramientas e insumos, oficina administrativa, recepción, vestuarios, baños y caseta de vigilancia.

Tabla 34

Materiales para la implementación de la planta de compostaje

Cantidad	Unidad de medida	Descripción del producto	Precio unitario (S/)	Precio total (S/)
100	UNIDAD	Pie derecho de 4 " x 3 m de largo	10.00	1000.00
300	METRO	Tela arpillera de polipropileno	12.00	3600.00
180	UNIDAD	Calamina de 0.22 m x 0.86 m x 3.60 m	32.00	5760.00
120	UNIDAD	Cemento	22.00	2640.00
50		Arena	45.00	2250.00
30		Piedra chancada	55.00	1650.00
100	UNIDAD	Listones de madera de 5 m	20.00	2000.00
100	KILO	Alambre galvanizado	8.00	800.00

Cantidad	Unidad de medida	Descripción del producto	Precio unitario (s/)	Precio total (s/)
100	UNIDAD	Fierro de 1/2"	32.00	3200.00
50	KILO	Clavos de 4"	4.00	200.00
20	KILO	Clavos de 3"	3.50	70.00
1.5	MILLAR	Ladrillo pandereta	650.00	975.00
6	UNIDAD	Ventana básica	180.00	1080.00
6	UNIDAD	Puerta contraplacada	200.00	1200.00
Total				26 425.00

Cabe resaltar que se da el supuesto de que los equipos descritos en el punto 5.2.6.2. ya han sido adquiridos por la entidad y no forman parte del estudio.

6.3.2. Costos de operación

6.3.1.1. Costos de mano de obra directa. Los salarios de la mano de obra directa (MOD) se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35

Mano de obra directa - salarios

N°	Función	Cantidad	Sueldo unitario (S/)	Costo total (S/)	Costo anual (S/)
1	Operador	4	930.00	3720.00	44 640.00
2	Conductor	1	1200.00	1200.00	14 400.00
3	Ayudante	1	930.00	930.00	11 160.00
Total					70 200.00

6.3.1.2. Costos de materiales directos e indirectos. La Tabla 36 muestra los materiales indispensables para llevar a cabo el proceso de compostaje, tales como los insumos para la activación y reproducción de los microorganismos eficientes, así como los implementos de seguridad para el personal obrero e insumos de limpieza.

Tabla 36

Materiales del proceso de compostaje

N°	Descripción	Cantidad	U. de medida	C. unitario (S/)	Costo total (S/)
1	Uniforme	12	Unidad	200.00	2400.00
2	Botas	18	Unidad	20.00	360.00
3	Mascarilla antigases	18	Unidad	120.00	2160.00
4	Guantes de cuero	72	Unidad	10.00	720.00

N°	Descripción	Cantidad	U. de medida	C. unitario (S/)	Costo total (S/)
5	Zapatillas	12	Unidad	25.00	300.00
6	Guantes anticorte	72	Unidad	5.00	360.00
7	Lentes de seguridad	18	Unidad	20.00	360.00
8	Detergente	50	Saco	75.00	3750.00
9	Lejía	12	Galón	10.00	120.00
10	Jabón	50	Unidad	5.00	250.00
11	Melaza	200	Unidad	50.00	10000.00
12	Afrecho	10	Quintal	35.00	350.00
13	Levadura	20	Caja	200.00	4000.00
14	Sacos de polipropileno	3	Millar	1000.00	3000.00
Total (S/)					28 130.00

La valorización de residuos sólidos orgánicos requiere un presupuesto estimado de S/ 108 730.00, correspondiente a los costos operativos: mano de obra y materiales directos e indirectos. Bajo el supuesto de una producción de 90 toneladas anuales, y que el precio de venta del compost es de S/ 0.35 el kilogramo al por mayor y S/ 0.50 al por menor, se obtiene lo siguiente:

$$90\,000\text{ kg} \times \frac{\text{S/ } 0.35}{\text{kg}} = \text{S/ } 31\,500.00$$

$$90\,000\text{ kg} \times \frac{\text{S/ } 0.50}{\text{kg}} = \text{S/ } 45\,000.00$$

Si bien existe un déficit, el impacto final será positivo si se incluye la valorización del impacto social, económico y ambiental de llevar a cabo este proyecto. Por ejemplo: mantenimiento de los parques, jardines y campos deportivos del distrito, incentivo a los agricultores de la zona, producción de especies en el vivero municipal, tratamiento adecuado de los residuos sólidos municipales, entre otros.

Conclusiones

De la caracterización física realizada a los residuos sólidos orgánicos que ingresaron a la planta de compostaje, se concluye que la segregación en la fuente por parte de las familias participantes es muy eficiente, pues solo se identificó un 1.04 % de residuos impropios al proceso. Esto, significa una oportunidad para la ampliación del Programa de valorización implementado en la actualidad.

Mediante la segregación de los residuos orgánicos municipales de la ciudad de Cutervo es posible aprovechar hasta 60 toneladas mensuales del material orgánico, obteniéndose una producción de 15 toneladas de compost o abono orgánico.

La mejora de las condiciones actuales de la planta de compostaje supone el aumento de la capacidad operativa de la planta hasta de un 400 %, siendo posible procesar 700 toneladas de residuos en un año operativo y resultando 175 toneladas de compost. Cabe resaltar que esta cantidad es variable y dependerá de las estrategias de sensibilización que imparta la Municipalidad Provincial de Cutervo.

El compostaje con microorganismos eficientes es una notable alternativa para mejorar la gestión actual de los residuos sólidos de la ciudad de Cutervo y satisfacer la demanda de productos orgánicos del sector agrícola y del mantenimiento de las áreas verdes del distrito.

A pesar de existe un déficit, pues lo que se invertirá para la construcción y operatividad de la planta es superior a los ingresos que se tendrían al comercializar el producto, el proyecto se justifica por el impacto positivo desde el punto de vista social, económico y ambiental. Más aún, porque se financiaría con los recursos provenientes del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal promovido por el Ministerio de Economía y Finanzas.



Recomendaciones

Los gobiernos locales deben priorizar la implementación de proyectos de valorización de residuos, que permitan su reintegración en la cadena productiva cuantas veces sea posible. En el caso de los residuos orgánicos, pueden volver a la tierra a través del compostaje o convertirse en energía.

Si bien en el presente estudio la capacidad de producción de compost está limitada por el terreno actual, es preciso plantear un plan de expansión, que incluya disponer un área más extensa para el manejo integral de los residuos sólidos municipales.

Los residuos provenientes de instituciones educativas no han sido considerados por la coyuntura actual, sin embargo, se podría establecer convenios interinstitucionales que involucren la participación estudiantil y docente a través de la educación ambiental. Cabe resaltar que ya se ha impulsado la concientización a través de la instalación de composteras y biohuertos educativos en instituciones educativas de la zona urbana y rural del distrito de Cutervo.

La municipalidad debe monitorear las acciones de valorización de residuos sólidos orgánicos especialmente la participación de los actores clave: los generadores.

Para asegurar que el compost esté libre de contaminantes e impropios es necesario implementar un Programa de Segregación en la Fuente y Recolección Selectiva de Residuos Sólidos Municipales. Este sistema permitirá el aprovechamiento de los residuos biodegradables desde su generación para su posterior tratamiento.

Para optimizar la superficie de acción para los microorganismos sin evitar los espacios aéreos se recomienda que los residuos orgánicos sean cortados a un tamaño de 2 a 5 centímetros para la ventilación de estas mismas partículas y la oxigenación de las bacterias.

Es importante sensibilizar y concientizar a las viviendas acerca de la segregación y almacenamiento correcto de sus residuos, para no tener inconvenientes durante la valorización de los mismos.

Por último, se recomienda a la Municipalidad Provincial de Cutervo que implemente otras alternativas de valorización de residuos sólidos orgánicos como el vermicompostaje o la implementación de biodigestores para mejorar el manejo de los residuos sólidos en la ciudad, los distritos y la provincia en general.



Referencias bibliográficas

- Abarra Taldea. (2004). *Manual práctico de técnicas de compostaje*.
<https://www.abarrataldea.org/manualpdf.pdf>
- André, F. y Cerdá E. (2006). *Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económicos y políticas públicas*. Cuadernos Económicos del ICE, N° 71, 71-91.
<http://www.revistasice.com/index.php/CICE/article/view/5880/5880>
- Cutervo Cajamarca Perú. (20 de marzo de 2017). *Contaminación del Medio Ambiente - Cutervo* [Video]. Facebook.
<https://www.facebook.com/watch/?v=636802759837832>
- Defensoría del Pueblo. (2019). *¿Dónde va nuestra basura?: Recomendaciones para mejorar la gestión de los residuos sólidos municipales* (N.o 181).
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1175483/INFORME-DEFENSORIAL-18120200801-1197146-1ec8wlv.pdf>
- Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos. (2022). *Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal – Meta 3 "Implementación de un Sistema Integrado de Manejo de Residuos Sólidos" – 2022*.
<https://sites.google.com/minam.gob.pe/dggrs/programa-de-incentivos-2022>
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. L., & Wiest, W. (2004). *Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas*. Revista Palmas, 25 (especial), 388-397.
- INEI. (2007). *Sistema de Consulta de Base de Datos de los Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*. <http://censos.inei.gob.pe/Censos2007/redatam/>
- INEI. (2017). *Sistema de Consulta de Base de Datos de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*.
<https://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- Klug, M. (2012). *Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa*. Revista de Química PUCP, v. 26, n. 1-2, p. 37-40.
- López, E., Andrade, A., Herrera M., Gonzalez, O., García de la Figal, A. (2017). *Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña*. Centro Agrícola, 44(3), 49-55.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852017000300007

- Mesias, V. y Quispe, J. (2015). *Caracterización de los residuos sólidos y verificación de las normas vigentes en el relleno sanitario del cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi, periodo 2013-2014*. Ingeniería en Medio Ambiente. UTC. Latacunga. 120 p.
- Ministerio de Salud. (2009). *Guía técnica de disposición final de residuos sólidos generados en establecimientos de salud y servicios médicos de apoyo*. Dirección General de Salud Ambiental
https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Peru/Documents/Publications/Manual_Manejo_de_Disposicion_SC.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2011). *Plan Nacional de Acción Ambiental. PLANAA – PERÚ 2011-2021*.
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/08/plana_2011_al_2021.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Guía metodológica para el desarrollo del Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Municipales (EC-RSM)*.
<https://redrrss.minam.gob.pe/material/20150302182233.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos Municipales*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-guia-caracterizacion-residuos-solidos-municipales>
- Municipalidad Provincial de Cutervo. (2018). *Informe de implementación de la valorización de residuos sólidos orgánicos municipales*.
- Municipalidad Provincial de Cutervo. (2019). *Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales del Distrito de Cutervo*.
- Municipalidad Provincial de Cutervo. (2020). *Reporte mensual de la cantidad recolectada de residuos orgánicos 2020*.
- Muñoz M., Calvachi V., Navarro N. y Aldás M. (2016). *Incineración de la fracción biodegradable de los residuos sólidos urbanos*. Revista CUMBRES 2, (2), pp. 09-15
- Oefa. (2018). *OEFA identifica 1585 botaderos informales a nivel nacional*. <https://www.oefa.gob.pe/oefa-identifica-1585-botaderos-informales-nivel-nacional/ocac07/>
- Oefa. (2022). *Somos OEFA*. <https://www.oefa.gob.pe/somos-oefa/>
- Oefa. (s.f.). *Áreas degradadas por Residuos Sólidos* [mapa]. <https://pifa.oefa.gob.pe/AppResiduos/>
- Röben, E. (2002). *Manual de compostaje para municipios*. Loja, Ecuador: DED, Ilustre Municipalidad de Loja, 68 p.

- Román, P., Martínez, M. y Pantoja A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe (Santiago de Chile). <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>
- Sánchez, I. (2014). *Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación*. Congreso Nacional del Medio Ambiente. CONAMA 2014. <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf>
- SENAMHI (2021). *Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional* <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
- SIGERSOL. (2021). *Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos*. <https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion>
- Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). (s. f.). *Portal Web SINIA*. <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>
- Urien, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Vargas Y. y Pérez L. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente*. Revista Facultad de Ciencias Básicas. 14(1), pp. 58-72
- Yepes, S., Montoya, L. y Orozco, F. (2008). *Valorización de residuos agroindustriales - frutas - en Medellín y el sur del Valle de Aburrá, Colombia*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 61, (1), pp. 4422-4431.



Apéndices





Apéndice 1. Programa de valorización de residuos orgánicos municipales

1. Ubicación

La valorización de los residuos sólidos orgánicos municipales se realiza en la planta de compostaje ubicada en el sector denominado Falso Paquisha.

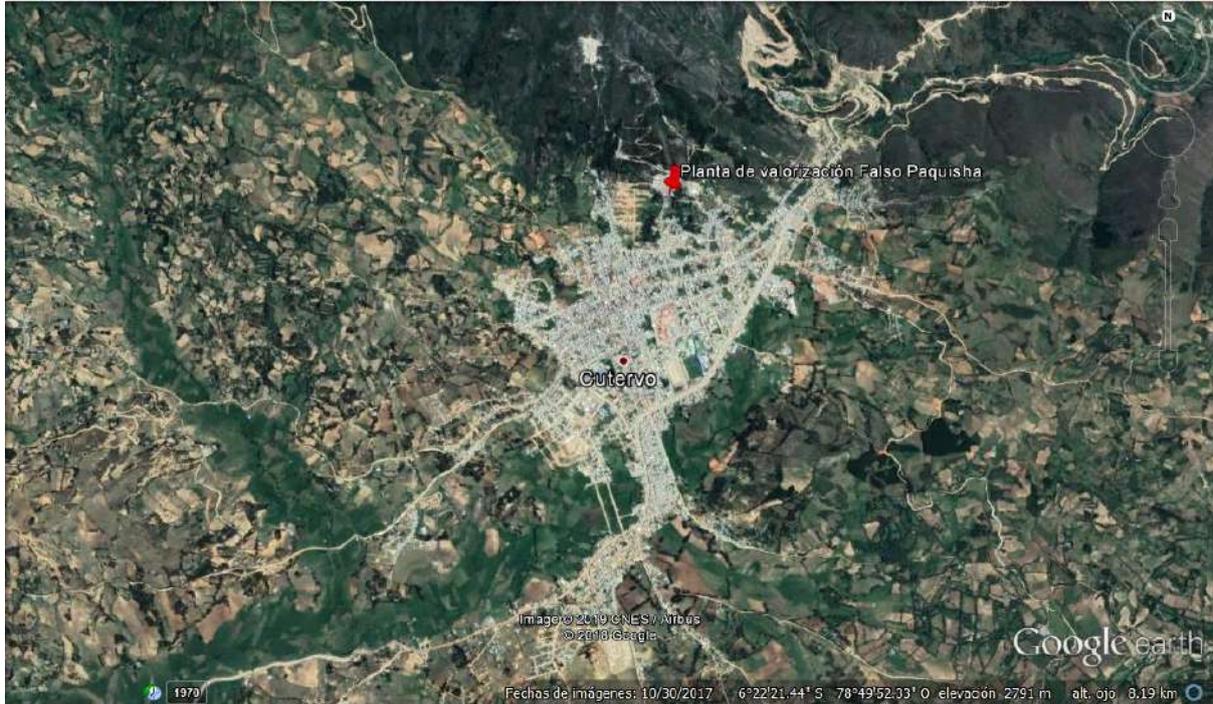


Figura 1. Ubicación de la planta de compostaje

Fuente: Google Earth (2018)

El compostaje se realiza mediante un sistema abierto de pilas estáticas, por lo que existe el riesgo de que pase por fases sin oxígeno y se produzcan malos olores; por lo tanto, debe considerarse una distancia mínima de 500 metros a los núcleos habitados.

Las instituciones educativas, centros de salud, servicios médicos, mercados y centros de concentración pública están ubicados a una distancia mayor a 500 metros de la planta de compostaje. En la Tabla 1 se presentan las distancias a las infraestructuras más cercanas.

Tabla 1

Distancia de las infraestructuras a la planta de compostaje

Infraestructura	Distancia a la planta (m)
Institución educativa inicial	590
Hospital Santa María	960
Policlínico San Marcos	1070
Mercado central	620

Infraestructura	Distancia a la planta (m)
Plaza Dos de mayo	730

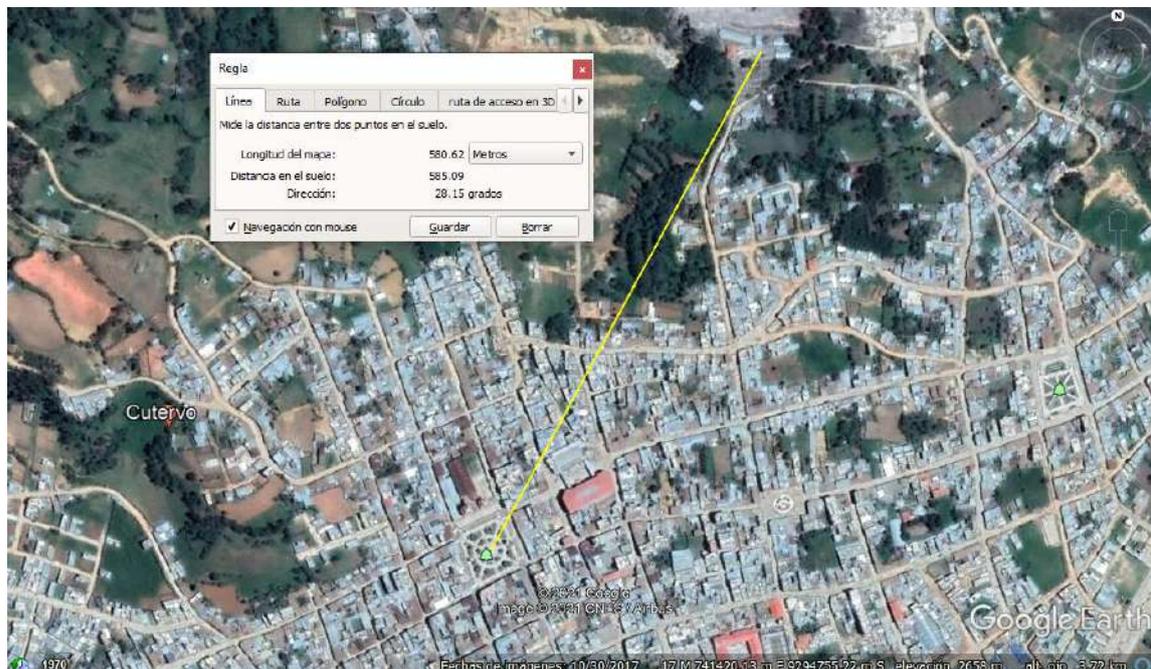


Figura 2. Distancia entre el centro de la ciudad y la planta de compostaje
Fuente: Google Earth (2021)

2. Distribución

2.1. Área de compostaje (205 m²)

En esta sección se realiza la descarga del material que ingresa a la planta, la segregación manual de los residuos que no favorecen el proceso, el picado del material orgánico, así como la formación de las pilas de compostaje.

El área cuenta con dos composteras cuyas dimensiones están expresadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Dimensiones de las composteras

Compostera	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m ²)
#1	14.50	6.00	87.00
#2	13.00	9.00	117.00

Su diseño consiste en un techo de calamina a dos aguas con vigas de madera como soporte, para proteger el material de las lluvias. Asimismo, se utilizó telas arpilleras de polipropileno para cercar el área y como barrera de protección frente vectores como perros y aves que circulan por la zona.

2.2. Almacén (35 m²)

Este espacio se utiliza para almacenar el producto final, y para la preparación y activación de los microorganismos eficientes. Asimismo, resguarda elementos como palanas, carretillas, guantes, mascarillas, botas, uniformes, etc.

2.3. Recepción (65 m²)

Se ha acondicionado esta área para la recepción de los visitantes. Habitualmente autoridades e instituciones llegan para conocer el proceso, ya que desean implementar este sistema de aprovechamiento de residuos.

2.4. Zarandeo (420 m²)

En esta área se expone la materia compostada para que se seque. Por otro lado, se realiza el zarandeo del material, obteniéndose abono fino, grueso y mixto.

2.5. Parcelas demostrativas (220 m²)

Son biohuertos destinados al cultivo de hortalizas, mediante las cuales se demuestra la calidad del abono que se produce en la planta.

3. Participantes

Tabla 3

Participantes del Programa de valorización de residuos orgánicos municipales 2021

	Origen	Participantes
Fuente domiciliaria	Viviendas	Barrio José Gálvez
		Barrio La Primavera
		Barrio Buena Vista
		Barrio Tomás Gálvez
Fuente no domiciliaria	Áreas verdes	Parque principal
	Mercados	Mercado Central
		Mercado Santa Celia
		Mercado Nuevo Oriente

4. Descripción y flujo del proceso desde la recolección hasta la obtención del producto

4.1. Recepción y descarga del material

La recolección de los residuos orgánicos se realiza en dos turnos (ver Figura 3), para luego transportarse a la planta de compostaje. Por otro lado, la descarga del material se realiza en la entrada, en plena vía de acceso.

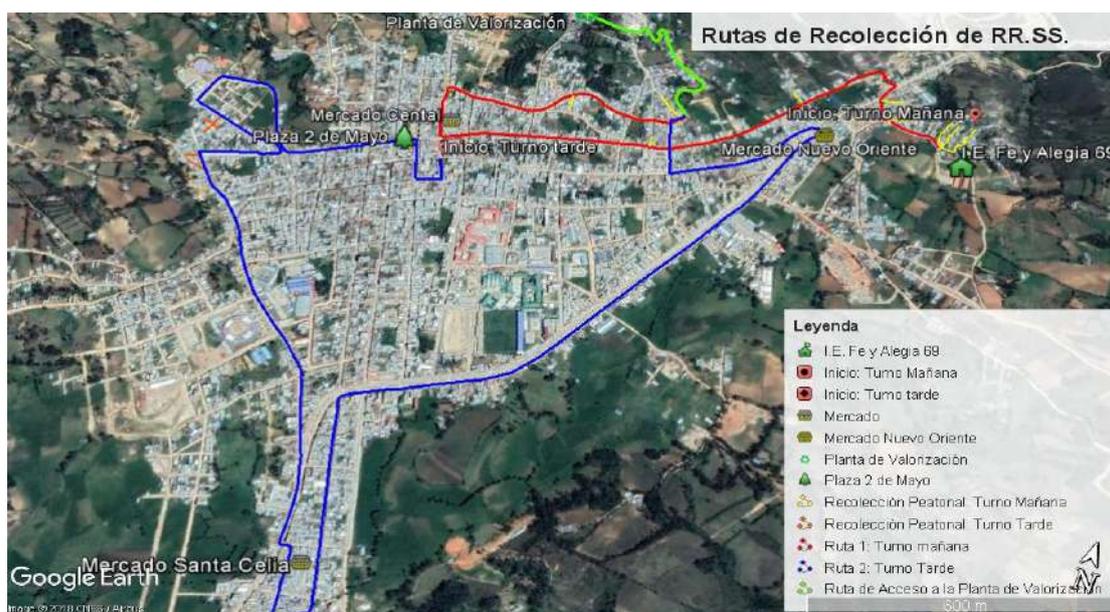


Figura 3. Mapa de las rutas de recolección de residuos sólidos orgánicos

Fuente: Municipalidad Provincial de Cutervo (2018)

4.2. Preparación de las pilas

Se traslada el material al interior de las composteras (ver Figura 4) y se separa el material impropio que se haya filtrado, como bolsas plásticas y empaques. Una vez completada la separación, se trozan los residuos para que tengan una mayor superficie de contacto con los microorganismos eficientes y propiciar un flujo de aire al interior de la pila (ver Figura 5 y Figura 6). Simultáneamente al trozado, se activa la mezcla con microorganismos eficientes (ver Figura 7).



Figura 4. Descarga del material recolectado



Figura 5. Trozado de los residuos orgánicos



Figura 6. Trozado y formación de las pilas de compostaje



Figura 7. Activación de la mezcla con microorganismos eficientes

4.3. Formación de las pilas composteras

El armado de la pila inicia con la inoculación microorganismos eficientes en el suelo, luego, a medida que se agrega material orgánico, se aplica microorganismos eficientes para que tengan en contacto total. El tamaño de la pila depende de la cantidad de material que se ha recolectado, llegando a medir entre 2.5 m de largo por 1.5 m de ancho, por 1 m de alto (por ejemplo, los lunes, que se recolecta aproximadamente 800 kilogramos) y 1.5 m de fondo por 1.5 m de ancho, por 0.5 m de alto (cuando se recolecta 300 o 400 kilogramos, un día normal).

Para la formación de las pilas de compostaje, se coloca una capa de material trozado y se le añade la mezcla de microorganismos eficientes (ver Figura 8 y Figura 9); este proceso se repite varias veces. Cabe resaltar que cada pila contiene los residuos recolectados en el día, por lo que puede contener entre 200 y 800 kg, que corresponden a los días de recolección más baja y más alta, respectivamente. En promedio se recolectan 450 kg diarios (ver Figura 10 y 11).

4.4. Inoculación de microorganismos eficientes

Con el fin de disminuir el tiempo del proceso y aumentar su eficiencia, se implementó la tecnología de los microorganismos eficientes, los cuales aceleran la degradación de la materia orgánica. Esto se evidencia en la duración del proceso, donde una pila puede ser compostada en 35 días aproximadamente.

La mezcla está compuesta por levadura de pan, suero de leche y melaza y su preparación es de forma práctica.



Figura 8. Formación de las pilas de compostaje



Figura 9. Inoculación de microorganismos eficientes



Figura 10. Pilas con 25 días de formación



Figura 11. Pilas de compostaje

4.5. Control del proceso y volteo del precompost

Una vez armada la pila, es necesario controlar principalmente la temperatura y la humedad, de modo que se determine el momento adecuado para realizar el volteo. En los apartados 5.1. y 5.3. se describen los métodos para la medición de la humedad y de la temperatura, respectivamente.

A partir del control temperatura/humedad se planea el volteo del material. Aproximadamente se realizan de 4 a 8 volteos durante los 35 días del proceso, pues se debe procurar que la temperatura de la pila no alcance valores por encima de los 65 °C. Asimismo, el volteo facilita la aireación y homogeneización del material, y permite la distribución de la carga microbiana en toda la pila.

Por otro lado, es necesario aplicar cargas de microorganismos eficientes para mantener las poblaciones de microorganismos que actúan sobre el material orgánico. El manejo adecuado de la temperatura garantiza la calidad microbiológica del producto final, ya que los agentes patógenos son eliminados tras alcanzar una temperatura superior a 60 °C.

4.6. Cernido y empaque:

Cuando la pila ha alcanzado de 35 a 40 días de formación, dependiendo de la época del año, se tamiza y se empaqueta en sacos de polipropileno de 45 kg (ver Figura 12 y Figura 13).

Después del tamizado (o cernido) se obtienen hasta tres tipos de abono: abono fino, abono grueso y abono mixto (aquel que aún no se ha zarandeado); de acuerdo a las necesidades del que lo solicite.

La Figura 34 muestra el diagrama de flujo del proceso desde la recolección de los residuos orgánicos de las viviendas empadronadas, hasta la obtención del producto final.



Figura 12. Zarandeo del compost



Figura 13. Compost empaquetado

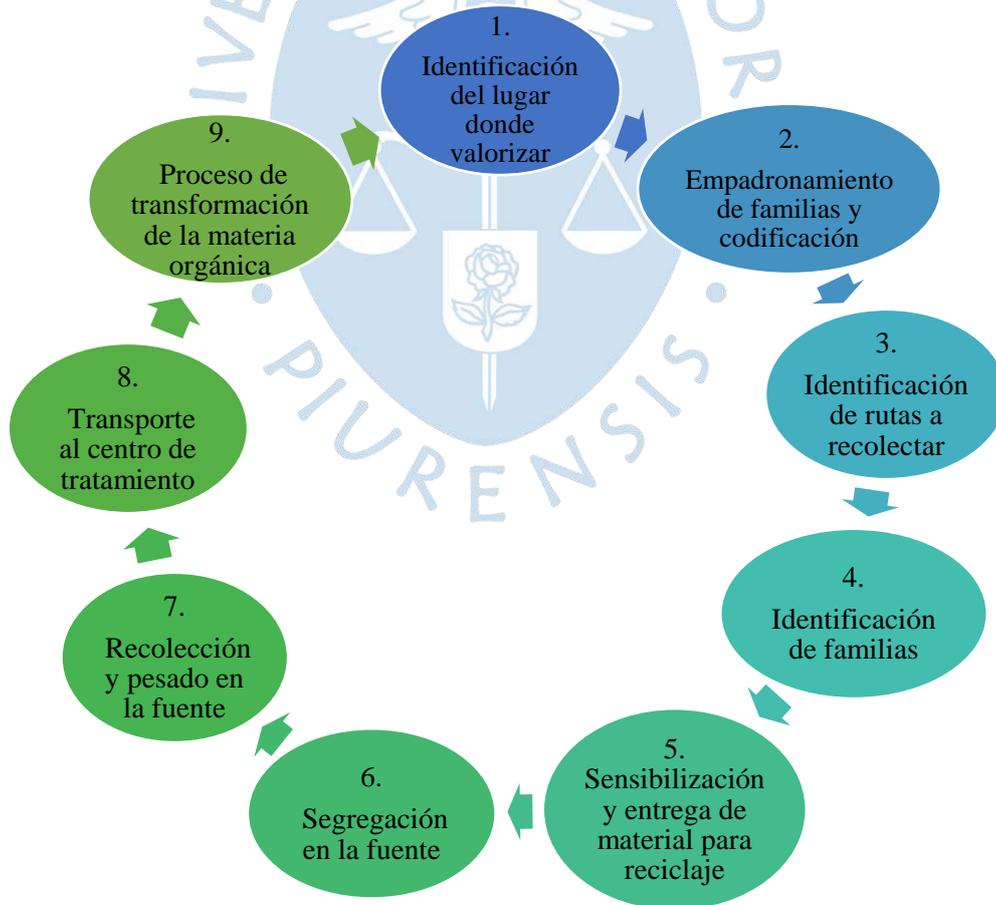


Figura 14. Flujo del proceso desde la recolección de residuos

5. Control del proceso

5.1. Humedad

El control de la humedad de la pila de compost es manual y se realiza a través de la “prueba del puño”, que consiste en tomar un puñado de compost y exprimirlo (ver Figura 15). De acuerdo a la cantidad de líquido que salga se evalúa la humedad de la pila. A pesar de no ser un método exacto, la experiencia permite saber si es necesario voltear o secar el material.



Figura 15. Prueba del puño para controlar la humedad

5.2. Aireación

Este factor depende de la temperatura, si alcanza los 65 °C, se recomienda hacer un volteo inmediato, aplicando la mezcla de microorganismos para mantener las poblaciones que actúan sobre el material orgánico (ver Figura 16 y Figura 17).



Figura 16. Volteo de la pila de compostaje



Figura 17. Volteo del material para la aireación

5.3. Temperatura

La temperatura se mide diariamente utilizando un termómetro tipo "T" (modelo HANNA HI 145) con una longitud de sonda de 125 mm y se realiza una vez finalizado el proceso correspondiente a la pila, es decir, al completar la formación, volteo e inoculación de microorganismos eficientes. Debe controlarse que no sobrepase los 65 °C - 70 °C para no perjudicar la actividad microbiana. En la Figura 18 se observa la evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje.

En la fase inicial (mesófila), los residuos orgánicos están a temperatura ambiente, con lo cual se deduce que inicia incluso antes de la formación de las pilas. Pues según se observa en la gráfica, durante los meses de julio, agosto y setiembre, que se controló la temperatura, el primer día de formación de la pila estaba con una temperatura mayor a 24.5 °C (o 21 °C que fue la mínima).

La fase termófila se inicia al tercer día del proceso, cuando la temperatura ha superado los 45 °C, y tal como se observa en la gráfica, el sistema de aireación por volteos permite mantener la temperatura por debajo de los 65 °C. De acuerdo a la gráfica, el aumento de la temperatura no es continuo, sino irregular, lo cual no permite determinar la duración exacta de esta fase, pero se puede deducir que ocurre en el día 24 del proceso, y en adelante empieza la fase de enfriamiento del material.

En cuanto a la maduración y estabilización del material, esta fase no está desarrollada, pues según indica la mayoría de autores, la característica principal es la disminución del material y requiere de 4 a 8 semanas adicionales al proceso, a temperatura ambiente. Sin embargo, en el caso de la planta en Falso Paquisha, en cuanto el proceso alcanza los 35 días, el compost es cernido y empacado. Es indiscutible el efecto acelerador de la inoculación de los microorganismos eficientes; sin embargo, debe dedicarse mayor tiempo a la fase de maduración del compost.

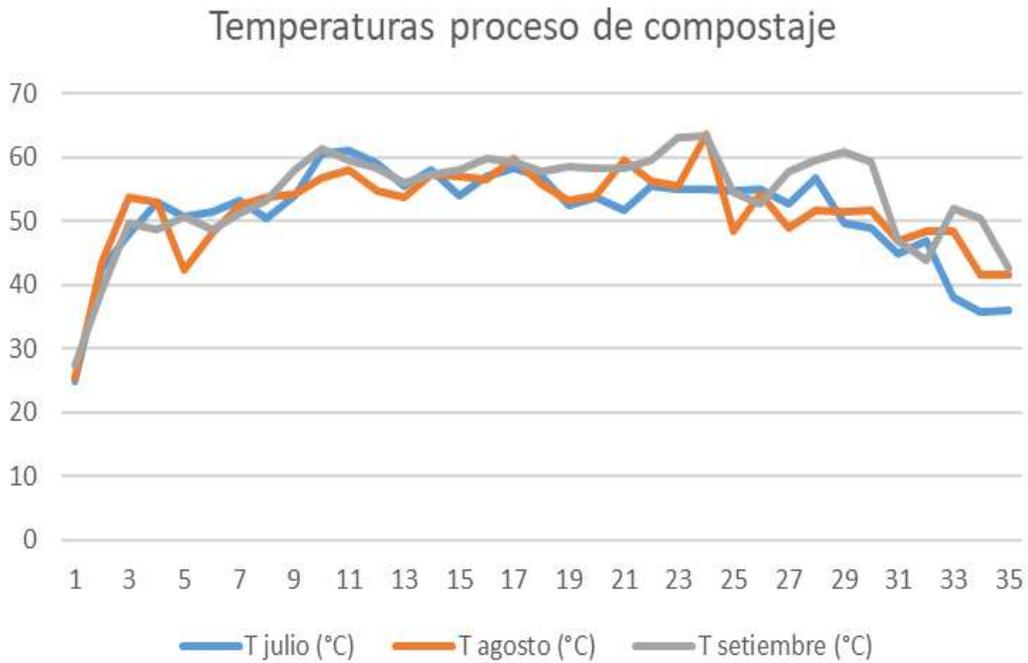


Figura 18. Gráfica temperatura (°C) vs tiempo (días) del proceso de compostaje



Figura 19. Toma de la temperatura

6. Evaluación de la calidad del compost – pruebas prácticas:

- Evaluación de aspecto: se homogeniza el material tornándose marrón.
- Evaluación de olor: se asemeja al de la tierra húmeda.
- Parámetros físico-químicos: a través de un laboratorio certificado.

7. Análisis físico-químico de la muestra:

Según el resultado del análisis del compost enviado al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (ver Anexo 1), para los fines del presente estudio, el compost tiene un pH fuertemente alcalino (8.70), recomendando su uso para suelos ácidos. Los valores de pH entre 7.5 y 8.5 indican indirectamente que el proceso se ha realizado en condiciones adecuadas de aireación (López et al., 2017), y un pH neutro es de mejor calidad.

El valor promedio de la conductividad eléctrica fue de 2.37 dS/m (23.68 mho/cm), indicando un nivel ligeramente alto de sales solubles, cuya conductividad eléctrica puede tener efecto leve sobre el crecimiento de plantas sensibles, mas no en plantas tolerantes. Si este indicador sobrepasara valores de 2.5-3 dS/m, la fuerza de succión de la planta, conocida como presión osmótica, es tan alta, que la raíz no será capaz de extraer agua ni nutrientes del suelo. Los valores ideales están entre 0.1 y 1 dS/m, sobre 4 dS/m el cultivo se hace imposible.

El compost muestra indicadores positivos de nutrientes, como nitrógeno (1.20 %), fósforo, (0.98 %), potasio (1.07 %), calcio (0.50 %) y magnesio (0.28 %). El porcentaje de materia orgánica es aceptable, pues la muestra de abono estuvo constituida por el 23.60 % de materia orgánica. La humedad de la muestra es un poco alta (33.08 %), siendo el valor recomendado de 25 a 30 %.

Finalmente, la relación carbono-nitrógeno (C/N) es buena (11.40 %), lo cual indica rápida descomposición y mineralización al entrar en contacto con el suelo. Este tipo de compost puede ser utilizado en agricultura, sobre todo en suelos de textura ligera.

8. Resultados

- Durante todo el proceso no se producen olores desagradables ni líquidos de fermentación o lixiviados.
- El tiempo del proceso es de 35 a 40 días, dependiendo de la época del año.
- La reducción del volumen de materia orgánica es del 40 %, debido a la descomposición de la materia.
- La supervisión de las actividades en la planta está a cargo de la Sub Gerencia de Residuos Sólidos.

La gestión integrada de los residuos sólidos implica el acopio, el reciclaje y la transformación de residuos, es ahí donde el manejo se hace rentable.



Anexos





Anexo A. Resultado del análisis de laboratorio



Instituto Nacional de Innovación Agraria
Estación Experimental Vista Florida - Chiclayo

LABORATORIO DE ANALISIS : AGUAS Y SUELOS

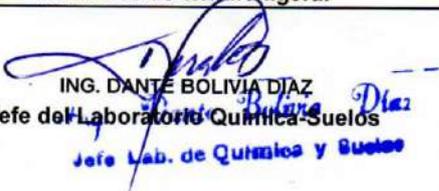
Tipo de Análisis **COMPLETOS**
Nombre **STEFANNY CASTRO RUBIO**
Muestra **COMPOST**
Procedencia **CUTERVO- CAJAMARCA**
Fecha de Emisión **2/05/2019**

Muestras	M-1
pH	8.70
Cec (Mhos/cm)	23.68
Materia Orgánica (%)	23.60
Nitrógeno (%)	1.20
Fósforo (P ₂ O ₅) (%)	0.98
Potasio (K ₂ O) (%)	1.07
Calcio (CaO) (%)	0.50
Magnesio (MgO) (%)	0.28
Materia Seca (%)	66.92
Humedad (%)	33.08
Cenizas (%)	13.94
Carbono (%)	13.68
Relación C/N (%)	11.40

Resultado: reacción fuertemente alcalino y nivel ligero alto de sales solubles, cuya conductividad eléctrica, puede tener un efecto leve sobre el crecimiento de plantas sensibles, más NO en plantas tolerantes. Hay que mejorar el pH y bajar un poco la humedad, es mejor 25 a 30 %.

E su composición química, presenta buenos nutrientes de nitrógeno, fósforo, y cenizas y aceptable tenor de materia orgánica.

La relación C/N es buena, indicando rápida descomposición y mineralización al entrar en contacto con el suelo. Se puede utilizar en agricultura, sobre todo en suelos de textura ligera.


ING. DANTE BOLIVIA DIAZ
Jefe del Laboratorio Química-Suelos
Jefe Lab. de Química y Suelos

Fuente: Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)