



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE
COMPOSTAJE AEROBIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS
SÓLIDOS ORGÁNICOS EN EL MUNICIPIO DE MACHETÁ CUNDINAMARCA

AUTOR

LEIDY TATIANA BONILLA MORENO
LEIDY DAYANNA TORRES MUÑOZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
ABRIL 2022

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE
COMPOSTAJE AEROBIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS
SÓLIDOS ORGÁNICOS EN EL MUNICIPIO DE MACHETÁ CUNDINAMARCA

AUTOR

LEIDY TATIANA BONILLA MORENO
LEIDY DAYANNA TORRES MUÑOZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIEROS AMBIENTALES

DIRECTOR

DAVID ORJUELA YEPES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
ABRIL 2022

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	5
2.	ABSTRACT	6
3.	INTRODUCCIÓN	7
4.	OBJETIVOS	8
4.1.	OBJETIVO GENERAL	8
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
5.	MARCO TEÓRICO.....	9
6.	METODOLOGÍA	18
6.1.	Diagnóstico de la situación actual del manejo de los RSO	18
6.2.	Análisis de alternativas para seleccionar la tecnología de compostaje	19
6.3.	Dimensionamiento de la planta de compostaje	21
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	22
7.1.	Diagnóstico de la situación actual del manejo de los RSO, analisis	22
7.1.1.	Estado actual del manejo de los RSO por medio del PGIRS	22
7.1.2.	Aspectos sociales frente a la dinámica de disposición de los RSO	22
7.1.3.	Lista de chequeo.....	23
7.1.4.	Levantamiento de datos frente a la opinión pública por medio de encuestas	23
7.1.5.	Análisis del servicio de aseo y aprovechamiento de RSO	25
7.2.	Análisis comparativo de las diferentes técnicas y tecnologías del compostaje.....	31
7.2.1.	Determinación de la cantidad de residuos a tratar por medio de proyecciones	31
7.2.2.	Identificación de técnicas y tecnologías de compostaje.....	35
7.2.3.	Matriz de decisión.....	36
7.2.4.	Estudio técnico.....	5
7.2.5.	Estudio Operativo	59
7.2.6.	Estudio económico.....	63
7.3.	Dimensionamiento de la planta de compostaje.....	70
8.	IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO.....	72
9.	CONCLUSIONES	72
10.	RECOMENDACIONES	73
11.	REFERENCIAS.....	74
12.	ANEXOS	5

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de residuos sólidos, Macheta-Cundinamarca.	23
Tabla 2. Datos iniciales proyección.	33
Tabla 3. Datos de población.....	33
Tabla 4. Cantidad de residuos producidos en función de la proyección poblacional	34
Tabla 5. Escala en función del tamaño y capacidad de tratamiento.	36
Tabla 6. Parámetros de control por tecnología de compostaje.	37
Tabla 7. Maquinarias y equipos por tecnología de compostaje.	38
Tabla 8. Costos totales de maquinaria y equipo por tecnología de compostaje.	39
Tabla 9. Ventas por tipo de tecnología.	39
Tabla 10. Desventajas por tipo de tecnología.	40
Tabla 11. Escala de calificación.....	42
Tabla 12. Matriz de decisión tipo de tecnología y criterios de selección.	42
Tabla 13. Dimensionamiento de la planta de compostaje.....	47
Tabla14. Área total para la planta de compostaje.	50
Tabla 15. Cantidad de aire requerido por el S. aireación forzada.....	50
Tabla 16. Cálculo de generación de lixiviados.	52
Tabla 17. Dimensionamiento Filtro FAFA.	53
Tabla 18. Dimensionamiento del tanque séptico.	53
Tabla 19. Factores de emisión.	58
Tabla 20. Personal para la planta de compostaje.	59
Tabla 21. Número de vehículos requeridos para la recolección.	63
Tabla 22. Precios de abono orgánico en el mercado.....	64
Tabla 23. Ingresos por venta de abono orgánico.	64
Tabla 24. Costos de construcción.	65
Tabla 25. Costos por maquinaria y equipo.	65
Tabla 26. Nómina del personal.	66
Tabla 27. Costos por servicios.	67
Tabla 28. Costos por servicios.	68
Tabla 29. Valor presente neto.	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de recipiente usado como compostera.	12
Figura 2. Métodos de cálculos permitidos según el nivel de complejidad	16
Figura 3. Zona y estrato socioeconómico en el municipio de Machetá.	26
Figura 4. Mapa de selección hogares del casco urbano en Machetá.	26
Figura 5. Conocimiento básico de la prestación del servicio de aseo municipal.	27
Figura 6. Conformidad de los usuarios del servicio de aseo.	28
Figura 7. Importancia del aprovechamiento de residuos.	29
Figura 8. Conductas de aprovechamiento en Machetá.	29
Figura 9. Educación ambiental.	30
Figura 10. Aceptación de implementación y aumento en la tarifa pública.	31
Figura 11. Aceptación del producto.	31
Figura 12. Ubicación para la planta de tratamiento de RSU.	45
Figura 13. Distribución de pilas.	49
Figura 14. Distribución del sistema de tuberías por pila.	51
Figura 15. Diseño tanque séptico.	54
Figura 16. Fases del compostaje.	56
Figura 17. Diagrama de proceso.	57
Figura 18. Diagrama de entradas y salidas.	59
Figura 19. Mapa ruta de recolección R.S.O.	62
Figura 20. Dimensionamiento planta de compostaje Macheta-Cundinamarca.	70

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Aplicación número de muestra.	25
Ecuación 2. Corrección de nutrientes pilas de compost.	46
Ecuación 3. Corrección de nutrientes solución.	46
Ecuación 4. Área de la cámara de recepción (AC).	47
Ecuación 5. Área transversal de la pila (AT).	47
Ecuación 6. Longitud de la pila.	47
Ecuación 7. Área total de degradación.	47
Ecuación 8. Área de espaciamiento.	48
Ecuación 9. Volumen de almacenamiento (V_{alm}).	48
Ecuación 10. Longitud total de la pila de maduración (L_m).	48
Ecuación 11. Área de maduración (AM).	48
Ecuación 12. Área de espaciamiento zona de maduración	49
Ecuación 13. Área total de maduración.	49
Ecuación 14. Área de oficina y servicios.	49

1. RESUMEN

El presente trabajo de grado se basa en la propuesta de un sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, a partir de la implementación de una planta de compostaje aerobio, debido a la problemática de manejo de los residuos; conociendo que en la totalidad de los residuos generados al año el 59,9% corresponden a la fracción orgánica, es decir 294,638 ton de residuos sólidos orgánicos (Plan de gestión integral de residuos sólidos [PGIRS], 2021, p.19). Mediante una revisión del PGIRS vigente del municipio, se evidencio que no se cuenta con estrategias para el aprovechamiento de residuos orgánicos. Se realizó un diagnóstico de percepción por medio de una encuesta dirigida a la población del municipio, con el fin de conocer la situación actual del manejo de los RSO y la opinión de estos frente a la problemática ambiental.

Adicionalmente se hizo un análisis comparativo de las tecnologías de compostaje y se aplicó una matriz de decisión para los diferentes sistemas de compostaje como lo son: aireación manual, aireación forzada, aireación convectiva y aireación mixta, dentro de las cuales fue escogida la aireación forzada por condiciones y requerimientos de este, ajustándose a las características del municipio.

Una vez identificado el sistema de compostaje se realizó un estudio técnico, operativo y económico; de manera que en el estudio técnico se describió el proceso mediante diagramas, se hicieron cálculos de dimensionamiento para las instalaciones, sistema de aireación, manejo de lixiviados y aguas residuales. Seguido a este, en el estudio operativo, se describe el personal de la planta teniendo en cuenta las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, se especifica la ruta de recolección y vehículo recolector.

Finalmente, en el estudio económico se calcularon los ingresos, los costos asociados a la construcción, maquinaria y equipo, nómina, servicios y la relación costo beneficio incluyendo diferentes indicadores económicos que demuestran la viabilidad de inversión en este proyecto asegurando un 11% de rentabilidad.

Con base en lo anterior se diseñó el plano de la planta de compostaje, donde se muestra la distribución de áreas ocupadas por cada proceso unitario.

Palabras Clave: aireación, aprovechamiento, compostaje, dimensionamiento, estudio económico, estudio operativo, estudio técnico.

2. ABSTRACT

This degree work is based on the development of a proposal for a system of organic solid waste utilization, from the implementation of an aerobic composting plant, due to the problem of waste management; knowing that in the total waste generated per year 59.9% corresponds to the organic fraction, i.e. 294,638 tons of organic solid waste (Plan de gestión integral de residuos sólidos [PGIRS], 2021, p.19). A review of the municipality's current PGIRS showed that there are no strategies for the use of organic waste. A perception diagnosis was made by means of a survey directed to the population of the municipality, in order to know the current situation of OWW management and their opinion regarding environmental problems.

Additionally, a comparative analysis of composting technologies was made and a decision matrix was applied for different composting systems such as: manual aeration, forced aeration, convective aeration and mixed aeration, among which forced aeration was chosen due to its conditions and requirements, adjusting to the characteristics of the municipality.

Having identified the composting system, a technical, operational and economic study was carried out, so that in the technical study the process was described by means of diagrams, dimensioning calculations were made for the facilities, aeration system, leachate and wastewater management. Following this, the operational study describes the plant personnel, taking into account the safety and health conditions at work, and specifies the collection route and the collection vehicle. Finally, in the economic study, income, costs associated with construction, machinery and equipment, payroll, services and the cost-benefit ratio were calculated, including different economic indicators that demonstrate the feasibility of investing in this project, ensuring an 11% profitability.

Based on the above, the plan of the composting plant was designed, showing the distribution of areas occupied by each unitary process.

Key words: aeration, utilization, composting, sizing, economic study, operational study, technical study.

3. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel mundial se ha visto la problemática a raíz de la generación de los residuos sólidos, pues “se estima que se producen anualmente 1,3 millones de toneladas de residuos sólidos, donde cerca del 46% son residuos sólidos orgánicos, de estos el 59% son dispuestos en rellenos sanitarios” (Chávez Porras & Rodríguez González, 2016), generando impactos ambientales que no solo contaminan el medio ambiente, sino que también causan problemas de salud pública, de hecho, “al descomponerse la materia orgánica genera gases de efecto invernadero” (C. C. A, Montreal, 2017), contribuyendo a la degradación ambiental y al cambio climático.

A nivel nacional se estima que la producción per cápita de residuos para los municipios es de 0,69 kg al día. Según Rodríguez (2019) se producen entre 918 toneladas y 1175 toneladas al día, tan solo en los municipios, excluyendo la ciudad de Bogotá; de esta generación solo el 12% deberían ir a disposición final a un relleno sanitario, el 22% podrían ser aprovechados y el 66% que corresponden a materia orgánica, los cuales deberían ser sometidos a un plan de tratamiento y aprovechamiento.

Para el caso particular del municipio de Machetá, a donde se orientó este trabajo, se estima que en promedio el casco urbano genera 1,41 toneladas al día, de este total, los materiales con mayor aporte son, la materia orgánica con (59,9%), plástico (13,3%), vidrio (6,6%), papel higiénico (5,5%), cartón (4,4%) y metales (4,44%) (PGIRS, 2021). A pesar de que el municipio cuenta actualmente con un plan de gestión, este no incluye actividades de aprovechamiento, por lo cual los residuos en su totalidad son dispuestos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo.

Como se pudo observar, el mayor porcentaje de residuos es atribuido a la materia orgánica (PGIRS, 2021), los cuales se derivan principalmente de actividades como, el comercio donde se encuentran los supermercados, restaurantes y la plaza de mercado, igualmente por parte del acondicionamiento de áreas públicas como poda de césped y los generados por los hogares.

Con base en lo anterior, se evidencia la gran problemática que conlleva no realizar aprovechamiento de los residuos orgánicos. Por esta razón, el presente documento plantea un estudio de factibilidad técnica, operativa y económica hacia un proceso de compostaje aerobio, con el fin de aprovechar los residuos sólidos orgánicos generados en el municipio de Machetá con una proyección de funcionamiento a 20 años.

4. OBJETIVOS

4.1.OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad técnica, operativa y económica de la creación de una planta de compostaje aerobio para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en el casco urbano del municipio de Machetá, Cundinamarca.

4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 4.2.1.** Elaborar un diagnóstico de la situación actual del manejo de los residuos sólidos orgánicos, identificando la estructura y composición de estos.
- 4.2.2.** Realizar un análisis de alternativas para seleccionar la tecnología de compostaje aerobio más adecuada para el tratamiento de los residuos, teniendo en cuenta los componentes técnicos, operativos y económicos.
- 4.2.3.** Dimensionar una estación de aprovechamiento de residuos orgánicos a partir de los resultados obtenidos del análisis de alternativas.

5. MARCO TEÓRICO

Para poder determinar si un proyecto es viable, es decir, que tiene altas posibilidades de ser realizado, es necesario implementar un estudio de factibilidad, ya que mediante este “se analizan aspectos como los recursos necesarios para lograr los objetivos propuestos, técnicas y la forma en que se operará cada parte planeada” (Luna y Damaris, 2001). Por dicha razón el estudio de factibilidad de la planta de compostaje se desarrollaron tres estudios centrales: técnico, operativo y económico.

El estudio de factibilidad técnica hace referencia a “los recursos necesarios como equipos, conocimientos, habilidades y experiencia, que son esenciales para la ejecución de las tareas o procedimientos requeridos para el proyecto” (Jiménez, 2005). Para realizar este estudio es muy importante tratar y definir aspectos relacionados con la localización, tamaño, tipo de proceso a desarrollar, servicios o productos prestados.

Por otro lado, mediante el estudio de factibilidad operativa se identificaron las actividades que permiten alcanzar las metas propuestas. De acuerdo con Baca (2012) “se establecieron los recursos humanos y procesos necesarios para la ejecución de la actividad”. Además, contribuyo al reconocimiento de aquellos recursos requeridos en la implementación del proyecto, donde se determinaron cuáles son necesarios respecto a la planta física, localización, equipos, recursos de dotación e instalaciones

Por último, el estudio de factibilidad financiera, hace referencia a todos aquellos “recursos económicos y financieros necesarios para llevar a cabo cada fase del proceso o actividades planeadas, dentro de este se incluyen los equipos necesarios para la actividad de interés” (Echeverría, 2017). Por medio de este se conoce “el efectivo inmediato con el que se cuenta y los recursos financieros, los cuales dan solvencia a gastos adquiridos, además se consideraron costos del estudio, costos del personal, inversión inicial e indicadores de rentabilidad” (Jiménez, 2005).

Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos

Este proceso se denomina como “el conjunto de actividades consecutivas para llevar a cabo un proceso, donde la materia prima es un residuo con el que se busca agregar un valor añadido a un producto reutilizable, incluyéndolo nuevamente al ciclo de vida para su comercialización” (Jaramillo y Zapata, 2008).

La generación de residuos sólidos en conjunto con el crecimiento poblacional, se ha convertido en un reto para toda la población, ya que ha generado problemas de salud pública; en consecuencia, se asignaron sitios de disposición final.

Jaramillo y Zapata (2008) afirman que los puntos de disposición se ven gravemente afectados debido a la disminución de la vida útil, gracias al aumento de la generación de residuos, agregado a esto se evidencia el gran consumo de recursos naturales afectando la conservación y preservación de estos. lo que también desencadena en la contaminación ambiental, “El aprovechamiento de los residuos garantiza mejores condiciones, tanto para los recursos naturales como para los sitios de disposición final, minimizando el riesgo a la salud pública y beneficiando a la sociedad” Alcaldía mayor de Bogotá - secretaría distrital de hábitat. (2007).

“El aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en Colombia es casi nulo, ya que esto se ve como un proceso fuera de la prestación del servicio de aseo público” (Castañeda y Rodríguez, 2017). Así mismo, este proceso posee falencias, debido a que “el tratamiento de estos se realiza en zonas minoritarias, donde se evidencia problemas de salud pública y pobreza” (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios [SSPD], 2018).

El municipio de Machetá cuenta con un programa de estrategias para educación de la población, enfocado a la separación de residuos en la fuente y la responsabilidad del manejo de estos, desde su generación hasta la disposición final. Cabe resaltar, que este municipio cuenta con un personal de apoyo para la recolección de los residuos aprovechables, siendo los recicladores de oficio los encargados en recuperar estos materiales, además este personal no se encuentra inscrito en ningún tipo de organización, asociación o agremiación. El gran problema que existe frente a este tema en el municipio es que no cuenta con un sistema de aprovechamiento de los RSO, por lo cual en su mayoría están siendo dispuestos en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo. Según lo afirma PGIRS (2021) el único aprovechamiento que se da es del 60% del residuo de la actividad de corte de césped y poda de árboles, es destinado a la actividad ganadera, ya que varias personas del municipio aprovechan el césped cortado para la alimentación de ganado bovino en su mayoría ubicado cerca de la zona urbana del municipio

Técnicas para el aprovechamiento de los RSO

Adarraga et al. (2011) asegura que el compostaje es una de las técnicas más usadas y reconocidas para la recuperación y transformación de la materia orgánica en Colombia. Por otro lado, Sepulveda y Alvarado (2013) afirman que el “compostaje es una alternativa con mayor aplicación debido a su gran alcance tecnológico y bajo costo”, siendo bastante asequible a proyectos de pequeña escala.

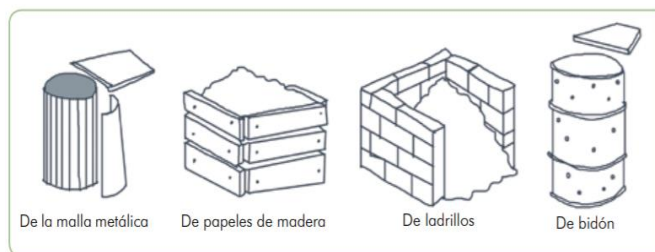
En la elaboración de compostaje se habla de cuatro fases esenciales para llevar a cabo este proceso, donde se “inicia sometiendo la materia orgánica a fermentación, cambiando la estructura molecular, generando un producto estable en estado sólido, libre de patógenos para ser utilizado como abono acondicionador de suelos” (Montreal, 2017). Estas fases garantizan la obtención de

un producto de calidad, el cual, dependiendo del tiempo de degradación, se determina el grado de madurez. A continuación, se presentan las cuatro fases para llevar a cabo el proceso de compostaje (Román et al., 2013):

- **Mesófila:** es la fase del proceso de compostaje donde los hongos y las bacterias inician la actividad microbiana, “esta empieza a temperatura ambiente y en poco tiempo se evidencia un aumento de temperatura entre 40 °C a 45 °C” (Jaramillo y Zapata, 2008). En esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de Carbono y Nitrógeno para generar calor, así mismo los microorganismos se van multiplicando, consumiendo los compuestos solubles, como azúcares, produciendo ácidos orgánicos, en consecuencia, a esto el pH baja a un rango entre 4 a 4,5.
- **Termófila:** en esta etapa, se eliminan algunas bacterias no resistentes a altas temperaturas, permitiendo que únicamente las bacterias con características termófilas permanezcan en el medio. Estas cumplen un papel muy importante, ya que son las que se encargan de la degradación de compuestos complejos, como lo son: la lignina y la celulosa, las cuales actúan en la transformación del nitrógeno y amoníaco, debido a estos procesos el pH aumenta, generando la eliminación bacterias contaminantes de origen fecal incluyendo los huevos y larvas que se puedan dar por reproducción obteniendo así un producto higienizado.
- **Enfriamiento:** terminando la degradación de los compuestos de carbono y nitrógeno, la temperatura tenderá a disminuir, permitiendo que la actividad de los organismos mesófilos se reactive, generalmente esta etapa mantiene un pH alcalino, esto perdura hasta el fin de la maduración, el enfriamiento puede tardar varias semanas.
- **Maduración:** el complemento final de la producción del compostaje es la maduración, esta fase puede durar entre 20 días o menos, dependiendo de la actividad metabólica generada por reacciones secundarias, como la fermentación (Jaramillo & Zapata, 2008), que favorece la condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos.

Cabe resaltar que para llevar a cabo el proceso de compostaje se puede desarrollar por alguno de los dos sistemas, los cuales según Jaramillo y Zapata, (2008) son el sistema abierto, que consiste en hacer una pila o varias de residuos orgánicos en un terreno determinado y el sistema cerrado, que se lleva a cabo en contenedores como se muestra en la **figura 1**, que sirven para el control de algunas situaciones como lo son: la recolección de aguas lluvia, facilitar la extracción de lixiviados y control de vectores como ratas o aves.

Figura 1. Tipo de recipiente usado como compostera.



Tipos de recipientes de sistema cerrado para la producción de compost según la FAO. Tomado de: Manual de compostaje, experiencia en Latino América (p. 61), por Román et al., 2013.

Sistema abierto: consiste en hacer una pila o varias de residuos orgánicos en un terreno determinado. Según Jarre Castro & Otal Salavent (2017) este tipo de sistema es de baja inversión y posee tecnologías sencillas, preferiblemente se realiza en suelos con pendiente para la recolección y almacenamiento de lixiviados, estas pilas poseen al menos 1 m^3 de residuos orgánicos y se realizan al aire libre. “Los sistemas abiertos también pueden ser clasificados por el control de parámetros de aireación que se realicen, es decir, con volteo o apilamiento estático, con aireación activa o pasiva” (Jarre Castro & Otal Salavent, 2017). Es importante decir que las metodologías aplicadas para el compostaje tienen algo en común y es el movimiento o alteración de capas de los distintos materiales presentes con el fin de lograr una mezcla homogénea y así favorecer la relación de carbono y nitrógeno dentro de la pila.

(Arcos et al., 2008 como se citó en Jarre Castro & Otal Salavent, 2017) afirman que es fundamental tener en cuenta el manejo y control de los parámetros como la temperatura y humedad, ya que, al estar expuesto a la intemperie y los cambios de condiciones meteorológicas, podría generar una variación significativa a la calidad y estabilidad del producto

- **Volteo manual:** el método de volteo manual se considera muy eficiente y bastante sencillo, este volteo se caracteriza por el movimiento constante y periódico de la pila, controlando la temperatura interna y el grado de humedad, homogeneizando las capas de material orgánico y aumentando la porosidad mejorando la ventilación de la pila, el volteo se debe realizar cada tres días en su etapa de compostaje, mientras que en su etapa de maduración se debe realizar el procedimiento cada cinco días. “Las características geométricas de la pila al inicio del proceso son: base 0,8 m.; altura 0,4 m y longitud 1m.” (Chaparro, 2013).
- **Volteo mecánico:** el sistema de volteo mecanizado utiliza bien sea volteadores laterales de tornillo adaptado a un vehículo que generalmente es un tractor, o una pala frontal, estos equipos genera un movimiento de las capas de los distintos materiales orgánicos presentes en la pila, rompiendo y mezclando los componentes mejorando la homogeneización y aumentando su porosidad, esto favorece la distribución de microorganismos, agua y nutrientes en el compost (Román, Martínez, & Pantoja, 2013) Es importante resaltar que

este método de volteo “requiere de mayor espacio debido a que necesita el suficiente área para el equipo y para realizar la maniobra de movimiento de la masa (Tortosa, 2015).

Dentro del sistema abierto de compostaje es necesario tener en cuenta el método de aireación, de manera que se puede clasificar en:

- **La aireación pasiva:** consiste en la aireación natural por medio de un flujo de aire exterior, es decir, por masas de aire, “este método se caracteriza por la incorporación de tuberías al sistema, permitiendo el flujo de aire desde el interior de la pila hacia la zona superior de la misma por medio de la convección natural” (Chaparro, 2013).
- **La aireación activa o forzada:** en este caso se dispone el material en una plataforma para proporcionar aire por medio de unos conductos que se encuentran en la parte interior de la plataforma, para así mantener los niveles óptimos de oxígeno (Román, Martínez & Pantoja, 2013).

Sistema cerrado: este sistema se lleva a cabo en contenedores, esto con el fin de poder controlar algunas situaciones como lo son: la recolección de aguas por lluvia, facilitar la extracción de lixiviados y control de vectores como ratas o aves, es importante tener en cuenta que en este tipo de métodos se podrían obtener temperaturas bastante altas por lo que el control de los parámetros se vuelve decisivo, lo más favorable para este tipo de casos es usar hasta un 10% de contenido de tierra para regular la temperatura. El sistema mediante reactores requiere de menos espacio, pero de mucha más inversión por ser un método muy tecnificado y el consumo energético es alto (Román, Martínez & Pantoja, 2013).

Reactores verticales

- **Continuos:** el material a compostar se encuentra en forma de masa única, el biorreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente; que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. El material se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador, a medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo (Castells, 2012). “El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (estos son aspirados por la parte superior del reactor), el tiempo de residencia es de 2 semanas” (Negro, 1996).
- **Discontinuos:** la masa en compostaje se sitúa en distintos niveles. Constan de un depósito cilíndrico de grandes dimensiones dividido en varios niveles. La materia que compostar se coloca en el piso más alto y mediante dispositivos mecánicos se voltea la masa a la vez que va descendiendo al piso inferior (Castells, 2012, p. 129). La humedad requerida para llevar a cabo el proceso se consigue o bien por evaporación del agua del material situado en los niveles inferiores, la cual se encuentra a una mayor temperatura, o bien, se dispone de sistemas de suministro de agua. Cuando la fracción orgánica ha descendido al último piso, se da por concluida la fermentación y el compost sale al parque de maduración. El tiempo

en el fermentador es de una semana. El inconveniente de este tipo de reactores es el elevado coste de instalación y de mantenimiento de la planta.

Reactores Horizontales

- **Estáticos:** el tiempo de compostaje de 15 a 30 días. El producto requiere un compostaje posterior
- **Dinámicos:** la forma de estos reactores puede ser rectangular o circular, además de poseer un sistema de aireación por la parte inferior, este sistema tiene un mezclador que agita los residuos; debido a la densidad que estos poseen, se necesitan grandes rodillos que puedan realizar el mezclado. Por lo anterior, el costo energético generado en el proceso es superior que en el caso de los reactores de flujo pistón (Del Carmen C., 2002). Los residuos permanecen en el reactor de 24 a 36 horas. El material es compostado posteriormente en pilas o reactores.
- **Sistemas mixtos:** conociendo los sistemas abiertos y cerrados, estos se pueden combinar para que las tres primeras fases se den en sistemas cerrados “así acelerar la degradación de la materia orgánica, y la última fase de maduración puede darse en un sistema abierto acomodado en pilas o hileras volteadas” (Behrentz y Giraldo, 2012 como se cita en Rentería, 2013).

Para la clasificación de los sistemas abiertos, según Jarre & Otal (2017) afirma que se puede evidenciar desde el control del parámetro de aireación que se realiza, es decir, la metodología de volteo o los métodos de aireación, ya sea pasiva o activa. La aireación activa o forzada, es aquella donde se dispone el material en una plataforma para proporcionar aire por medio de unos conductos que se encuentran en la parte interior de la plataforma (Román et al., 2013), mientras que la aireación pasiva es aquella que se airea de forma natural mediante el flujo de aire exterior (Chaparro, 2013).

De acuerdo con lo anterior, es importante decir que las metodologías aplicadas para el compostaje tienen algo en común y es el movimiento o alteración de capas de los distintos materiales presentes, con el fin de lograr una mezcla homogénea y así favorecer la relación de carbono y nitrógeno dentro de la pila (Román et al., 2013).

Ahora bien, frente al control y manejo de los parámetros como la temperatura y humedad, se deben de tener en cuenta las técnicas de volteo, ya que, al estar expuesto a la intemperie y a condiciones meteorológicas, estas podrían generar cambios o variaciones significativas a la calidad y estabilidad del producto final (Arcos et al., 2008 como se citó en Jarre & Otal, 2017). Según Román et al., 2013 cuando se habla de técnicas de volteo se clasifica en: volteo manual y volteo mecánico. El volteo manual es una técnica más sencilla pero bastante eficiente, se caracteriza por el movimiento constante y periódico de la pila, controlando la temperatura interna y el grado de

humedad, homogeneizando las capas de material orgánico y aumentando la porosidad, mejorando la ventilación de la pila (Chaparro, 2013).

Frente al volteo mecánico, es una técnica mecanizada, bien sea por volteadores laterales de tornillo adaptado a un vehículo o una pala frontal, estos equipos generan un movimiento de las capas de los distintos materiales orgánicos presentes en la pila, rompiendo y mezclando los componentes para mejorar la homogeneización y aumentando su porosidad (Tortosa, 2015).

Dentro del sistema cerrado de compostaje es importante resaltar los dos tipos de disposición que existe, se habla de la disposición vertical continua y de la disposición horizontal discontinua, donde la disposición vertical continua se da en un recipiente de forma vertical que descansa en su base, en este se agrega por la parte superior el material orgánico fresco para el compostaje, así mismo la extracción del producto se realiza por la parte inferior del recipiente y es importante aclarar que la entrada y la salida de materiales es constante (Román et al., 2013); mientras que la disposición horizontal discontinua se refiere al reposo de la compostera sobre el eje longitudinal, es decir una vez que se carga la compostera y ocurran todas las fases del producto final está listo y se descarga el recipiente (Román et al., 2013).

Aplicación de técnicas para el aprovechamiento de los RSO

Países Europeos desde los años 70 empezaron a implementar plantas de compostaje a gran escala, pero debido a problemas en la separación en la fuente no obtenían los resultados esperados, así que en los años 80 y 90 se empezaron a tomar medidas de obligatoriedad de la separación en la fuente para poder darles un tratamiento y aprovechamiento a través de técnicas como el compostaje y la digestión anaerobia, dentro de estos países se destacan Holanda, Alemania y Austria.

En países desarrollados, los biorresiduos corresponden entre el 50% y 70% de los residuos generados, tal es el caso de la India, donde las técnicas de compostaje no han sido efectivas debido a aspectos como el bajo costo del producto obtenido, la sencillez del proceso, falta de tecnologías, lo cual hace un factor diferencial entre los países desarrollados y en desarrollo, ya que las características fisicoquímicas con la que salen los productos del proceso de compostaje son mejores en los países desarrollados.

Los países en desarrollo presentan problemas con el proceso de compostaje debido al pH tóxico, el contenido de agua, la deficiencia total de COT y P total y la relación de C / N las cuales son inferiores a los recomendados (Marmolejo et al., 2016), lo que resulta en productos deficientes que dificultan o impiden su uso y comercialización, lo cual hace estos procesos inviables.

Las tecnologías para hacer uso y aprovechamiento de residuos orgánicos avanzan de manera que se permita hacer procesos más eficientes, que involucren menor mano de obra y que usen

técnicas más amigables con el medio ambiente, esta evolución se ha generado a raíz de que los procesos de compostaje también generan impactos negativos en el ambiente como lo son la producción de gases como el metano y la producción de lixiviados que afectan potencialmente el suelo y los cuerpos hídricos.

La empresa japonesa Smartcompo elabora equipos de compostaje los cuales son distribuidos a el sur de Europa, esta empresa atiende todos los problemas convencionales que sufren las plantas de compostaje ya que funciona de manera más eficiente y reduce los impactos producidos en las etapas del proceso, además de obtener un producto de mayor calidad que los estándares frente a otros expuestos en el mercado (SMARTCOMPO, 2019).

Por otra parte, a menor escala una compañía australiana creó un equipo innovador que facilita el compostaje de residuos, este equipo es conocido como compostador aerobio, el cual por su tamaño y su fácil forma de uso en donde solo se tiene que depositar los residuos orgánicos, este equipo está diseñado para eliminar olores e insectos sin necesidad de remoción o mantenimiento, lo cual lo hace apropiado para hogares (ecoinventos, 2019).

Aplicación de métodos de proyección poblacional

La estimación de la población por medio de proyecciones es fundamental, ya que por medio de esta se estima la población futura para un proyecto (RAS, 2000). Dada la temática del título F del RAS dedicada al sistema de aseo urbano se disponen de ciertas metodologías para hacer el cálculo de proyecciones, estos métodos van según el nivel de complejidad, el cual está en función del número de habitantes en la zona urbana, de la capacidad económica y del grado de exigencia técnica del sistema de la población a proyectar (EMSER, 2015).

El nivel de complejidad comprende el grado de desarrollo y crecimiento poblacional que puede tener un territorio, es por esto por lo que dependiendo del nivel de complejidad se elige el método de proyección poblacional (ver **figura 2**), los cuales se describen a continuación:

Figura 2. Métodos de cálculos permitidos según el nivel de complejidad

Método de cálculo a emplear	Nivel de complejidad del sistema			
	Bajo	Medio	Medio Alto	Alto
Aritmético	X	X		
Geométrico	X	X	X	X
Wappus	X	X	X	X
Gráfico	X ⁽¹⁾	X	X	
Exponencial	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X ⁽²⁾	
Detallar por zonas		X	X	X
Detallar por densidades		X	X	X

(RAS, título F 2000)

Nota: Se podrá emplear el método del DANE, para cualquier nivel de complejidad. X⁽¹⁾. Sujeto a justificación X⁽²⁾ Optativo, recomendable.

- El **método aritmético** supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración, este método de estimación de poblaciones futuras se corresponde con una línea recta, en el que la pendiente se corresponde con la tasa de crecimiento aritmética del último período intercensal. Es aplicable a poblaciones cuyo crecimiento se puede considerar estabilizado (con poca o ninguna área urbana de expansión). (RAS, 200)
- El **método geométrico** es útil en poblaciones que muestran una importante actividad económica, que genera un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión, las cuales pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades, supone que la población crece a una tasa constante, lo que significa que aumenta proporcionalmente lo mismo en cada periodo de tiempo (Celade, 1987). Este método es recomendable para poblaciones que se encuentran en pleno desarrollo y por períodos cortos en el futuro (10-15 años). (RAS, 2000)
- El **método Wappus** se basa en función de la tasa de decrecimiento anual y el periodo de diseño, se emplea para poblaciones pequeñas de hasta 5.000 habitantes hasta poblaciones mayores de hasta 100.000 habitantes (RAS, 2000).
- El **método gráfico** se utiliza principalmente cuando la información censal es insuficiente o poco confiable, consiste en comparar gráficamente la población del municipio en estudio con la de otros tres municipios del país que tengan características similares tales como el desarrollo, clima, tamaño, dos de estos municipios para comparar deberán tener una población mayor al municipio de estudio (RAS, 2017).
- El **método exponencial** se requiere conocer por lo menos tres censos para poder determinar el promedio de la tasa de crecimiento de la población, en donde el último censo corresponde a la proyección del DANE, se recomienda para poblaciones con apreciable desarrollo y abundantes áreas de expansión (RAS, 2000)
- Los **métodos de detallar por zonas y densidades** hacen parte de los métodos demográficos y son similares, ya que se basan en el crecimiento de la población no continuo o las condiciones externas que generen períodos demográficos cambiantes en el tiempo (RAS, 2000).

6. METODOLOGÍA

El municipio de Machetá pertenece a uno de los 116 municipios que conforman al departamento de Cundinamarca, es conocido como la puerta de oro del Valle de Tenza, pertenece a la provincia de los Almeadas, posee una superficie de 229 km² de la cual corresponden 5,35 km² al área urbana, tiene una población de 6.663 habitantes y una densidad poblacional de 29,7 hab/km² (Advercidy, 2019).

En la reciente actualización del PGIRS hecha en el año 2019 se tiene que la producción per cápita de residuos en el área urbana es de 0,71 kg/Hab*día. Dentro de la caracterización, el 59,9% pertenece a la materia orgánica (PGIRS, 2021). En su totalidad los residuos tanto orgánicos como inorgánicos son dispuestos directamente al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, el cual está ubicado en el Km 9 vía Mosquera a La Mesa, en el Municipio de Bojacá. A este relleno sanitario le ingresan desechos de 78 municipios con un promedio de disposición de 1.380 Ton, se estima que su vida útil contratada es de 32 años, los cuales iniciaron en el año 2007 y terminará en 2039 (Empresa de servicios públicos Cajicá, 2019).

6.1.Diagnóstico de la situación actual del manejo de los RSO, identificando la estructura y composición de estos.

6.1.1. Estado actual del manejo de los RSO por medio del PGIRS

Para llevar a cabo esta propuesta fue necesario conocer la situación actual de los residuos generados en el municipio. Mediante la caracterización de los residuos, se identificó la cantidad de RSO y la composición porcentual de los mismos. Este municipio cuenta con un documento actualizado al año 2021 PGIRS, el cual permitió obtener la información de la caracterización y también de la descripción de actividades de recuperación y aprovechamiento que lleva a cabo el municipio.

6.1.2. Aspectos sociales frente a la dinámica de disposición de los RSO y sus puntos de disposición.

Para esta actividad se realizó un recorrido por el municipio, en donde se pudo evidenciar físicamente las dinámicas de disposición (separación de residuos y puntos de disposición), se realizó un registro fotográfico, además se tuvo acercamiento a los habitantes y a empleados de servicios generales, se determinaron actores involucrados, fuentes generadoras de residuos como lo son la plaza de mercado, supermercados y hogares, la disposición de los residuos en puntos ecológicos, canecas y centro de acopio.

6.1.3. Estrategias de gestión usadas frente a los requisitos normativos de la prestación del servicio público de aseo y aprovechamiento.

Se elaboró una lista de chequeo, la cual contiene los aspectos relevantes que cumple el municipio según el documento del PGIRS 2021, frente a la normativa legal vigente en el ámbito de la gestión de los residuos, para poder realizar un levantamiento de datos con respecto al diagnóstico sistemático y reproducible para la identificación de los aspectos, actividades o procesos que cumple o no el municipio.

6.1.4. Levantamiento de datos frente a la opinión pública por medio de encuestas

Se llevó a cabo el levantamiento de datos frente a la opinión pública, donde se realizó un sondeo de opiniones y prefactibilidad del mercado del compost. Por medio de la encuesta también se incluyó información para conocer la aceptación de la propuesta de una planta de compostaje en el municipio.

Según Ramos (2009) para que el número de encuestas realizadas fuese representativo, se calculó el número de muestra por medio de la ecuación de tamaño de muestra finita, conociendo el número exacto de usuarios que hacen parte del servicio de aseo municipal

6.2. Análisis de alternativas para seleccionar la tecnología de compost más adecuada para el tratamiento de los residuos, teniendo en cuenta los componentes técnicos, operativos y económicos.

6.2.1. Determinar la cantidad de residuos a tratar por medio de proyecciones para el tiempo de funcionamiento de la planta.

En primer lugar, para el desarrollo de la actividad fue necesario realizar proyección poblacional frente al tiempo de la vida útil de la planta de compost, luego se realizó la proyección de generación de RSO, partiendo de esto, se calculó el volumen de residuos generados para tratar en planta. “Los métodos que se usaron para la proyección poblacional fueron: el método Aritmético, método Geométrico, método exponencial, método de Wappaus, gráfico, detallar por zonas y densidades” (RAS, 2000). Finalmente, se hizo una comparación con los datos registrados en el DANE logrando seleccionar el método más acertado para el cálculo poblacional.

6.2.2. Identificación de técnicas y tecnologías para el proceso productivo de la planta de compost.

Mediante una revisión de diferentes fuentes bibliográficas se identificaron las diferentes técnicas y tecnologías para llevar a cabo el tratamiento de residuos sólidos orgánicos para la implementación de una planta de compost, esta actividad se llevó a cabo por medio de recursos de búsqueda como herramientas electrónicas y documentos indexados.

6.2.3. Análisis comparativo de las diferentes técnicas y tecnologías del compostaje para determinar cuál se adapta a las condiciones del municipio.

Por medio de una matriz de decisión se evaluaron los siguientes aspectos: tamaño y capacidad, parámetros de control y costos de maquinaria y equipos de los diferentes sistemas de compostaje, como lo son los sistemas abiertos, pilas por volteo manual o mecánico, pilas estáticas, con succión de aire, aire insuflado o ventilación alternada.

Mediante matrices se evaluaron aspectos como lo son: la capacidad de tratamiento, variables de control, climatología, ventajas y desventajas, eficiencia y costos, esta valoración se hizo frente a cada tecnología, donde se le asignaron valores, permitiendo conocer la tecnología que más se ajustaba a los resultados esperados.

6.2.4. Estudio Técnico

Por medio del estudio técnico, se analizaron elementos que hacen referencia al producto o proceso que se desea implementar. Se realizó la descripción detallada del mismo con la finalidad de mostrar todos los requerimientos para que el proceso funcione de manera óptima. Por medio de este estudio se conoció la ubicación, cálculos de dimensionamiento de la planta y del sistema de aireación, manejo de lixiviados y aguas residuales, descripción del proceso mediante diagramas de proceso y diagrama de bloques. Se tuvo en cuenta la generación de residuos estimados por medios de las proyecciones, determinando la infraestructura necesaria para que el proceso de compostaje se lleve a cabo.

6.2.5. Estudio operativo

Por medio del análisis operativo, se identificó el personal requerido en la planta, velando por su seguridad y salud. También mediante este estudio se realizó el levantamiento de las rutas de recolección para los residuos sólidos orgánicos que posteriormente serán llevados a la planta de compostaje, la selección del vehículo con la capacidad necesaria para el transporte de los residuos y la descripción del cuerpo operativo necesarios para llevar a cabo el proceso de compostaje determinando el área de trabajo y cada una de sus actividades.

6.2.6. Estudio económico

En el estudio económico, se tuvieron en cuenta dos grandes aspectos como lo son los ingresos, que hacen referencia a la venta del abono orgánico obtenido y los costos, que son determinados por los gastos de infraestructura, costos de maquinaria y equipo, costos fijos como nómina y servicios. También se evaluaron indicadores de rentabilidad como el Valor Presente Neto

(VPN) y tasa interna de retorno (TIR). Por otro lado, se determinó la relación costo-beneficio en función del pago realizado por la prestación del servicio de tratamiento de residuos.

6.3.Dimensionamiento de la planta de compostaje

6.3.1. Diseñar el plano de la planta de compostaje mediante un software (AutoCAD)

Por medio del software AutoCAD versión 2019, se elaboró un plano en función del dimensionamiento de planta de compostaje que se implementaría en el municipio, esta planta está determinada por la cantidad de residuos que le ingresen y por las proyecciones realizadas para la vida útil de 20 años. En este plano se muestra cómo estará distribuida la planta, como son la cámara de recepción, un área de descomposición, un área de maduración, área de trituración y cribado, área de almacenamiento, el área de tratamiento para lixiviados y aguas residuales, adicional al área de procesamiento se incluirá un área administrativa, incluyendo las medidas de la planta, de manera que permita evidenciar estructuralmente el área que ocupa la planta.

6.3.2. Entrega de la propuesta de planta de compostaje a la alcaldía municipal

Al tener consolidado el estudio de factibilidad de la planta de compostaje para el municipio, se hizo entrega del documento oficial a la alcaldía municipal de Macheta, de manera que esta pueda conocer la propuesta y tenga la oportunidad de implementar un sistema de aprovechamiento como el que se plantea, para la adecuada gestión y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1.Diagnóstico de la situación actual del manejo de los RSO, identificando la estructura y composición de estos.

7.1.1. Estado actual del manejo de los RSO por medio del PGIRS

En el PGIRS elaborado en el año 2021 para el municipio de Machetá, se pudo reconocer qué tipo de manejo se estipula para los residuos generados por las actividades comerciales, industriales y domiciliarias en el municipio, teniendo en cuenta que hasta el momento de publicación del PGIRS no se encontraba ningún plan o actividad dirigida al aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos; durante varios años los residuos en su totalidad han sido recogidos por la empresa de aseo y llevados directamente al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, sin realizar ningún tipo de tratamiento.

En la actualización del PGIRS se encuentran actividades propuestas enfocadas hacia el aprovechamiento de los residuos sólidos aprovechables tales como: separación en la fuente, puntos de recolección y centro de clasificación, por otro lado, los residuos orgánicos cuentan con pocas propuestas para su adecuado manejo, cabe resaltar que la empresa encargada de realizar el corte de césped y poda de árboles de las áreas públicas permite que la población del municipio los aprovechan como alimento en actividades ganaderas.

7.1.2. Aspectos sociales frente a la dinámica de disposición de los RSO y sus puntos de disposición (trabajo de campo)

Se encuentran suscritos alrededor de 661 usuarios beneficiados con el servicio de recolección de residuos, de los cuales el 11% pertenece al sector rural y el 88% al sector urbano, por usuarios suscritos (hogares) hay un promedio de 2,7 personas. La recolección de los residuos para el sector urbano y rural se realiza dos veces a la semana, adicional a esto una fuente generadora de residuos orgánicos es la plaza de mercado donde está es usada los días lunes para la comercialización de frutas, verduras y más, lo cual conlleva a gran generación de residuos (PGIRS, 2021).

La recolección de los residuos se hace puerta a puerta y los residuos se encuentran generalmente al interior de bolsas o en algunos puntos comerciales en canecas de gran tamaño. Los residuos recogidos los días martes, son transportados al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo el día miércoles, el otro día de recolección es el viernes y este mismo día se llevan los residuos relleno sanitario.

Adicionalmente, del mantenimiento de las áreas verdes y áreas públicas se obtiene pasto y ramas de árboles, dicha actividad se realiza una vez al mes y el barrido de las calles se hace cuatro veces a la semana.

De acuerdo con la clasificación de residuos generados en el municipio, se observa en la **tabla 1**, la caracterización de los mismos en el PGIR-2021, los cuales son representados por porcentaje según el material.

Tabla 1. Caracterización de residuos sólidos, Macheta-Cundinamarca.

MATERIAL	CONTENIDO (%)
Cartón	4,4%
Caucho y cuero	0,6%
Cenizas	0,2%
Cerámica y ladrillo	0,5%
Hueso	0,7%
Madera	0,2%
Materia orgánica	59,9%
Papel higiénico	5,5%
Metales	4,4%
Papel	2,6%
Plástico	13,3%
Textil	0,7%
Vidrio	6,6%
Icopor	0,2%
Total	100%

(PGIRS, 2021).

7.1.3. Estrategias de gestión usadas frente a los requisitos normativos de la prestación del servicio público de aseo y aprovechamiento.

Para la identificación de las estrategias de gestión de los residuos generados por la población, se realizó una lista de chequeo teniendo en cuenta la normativa vigente, en función de la Resolución 1046 del 2003 y el Decreto 2981 de 2013 “Por el cual se reglamenta la prestación

del servicio público de aseo”, por último, el título F del RAS “Por el cual se reglamente sistema de aseo urbano”.

Esta lista de chequeo permitió identificar falencias que presenta el sistema de aseo municipal en Machetá, en primer lugar, no se cuenta con estrategias ni estudios de prefactibilidad y factibilidad frente al aprovechamiento de residuos, bien sea para materia prima en la agronomía, producción de energía o insumo industrial. También, es necesario reforzar el sistema de recolección y aprovechamiento de residuos reciclables, ya que es la única estrategia de aprovechamiento que tiene vigente el municipio y que está estipulado dentro del PGIRS.

Existe una problemática bastante evidente en el municipio y es con los recicladores de oficio, como lo estipula el título F del RAS, estas personas deben ser reconocidas y vinculadas formalmente en las actividades relacionadas con el aprovechamiento y valorización de residuos, pero esto no ocurre, pues son personas contratadas por la alcaldía; esto es bastante relevante ya que finalmente estas son el vínculo entre los generadores de residuos y terceras empresas que son las que realizan el aprovechamiento de los residuos reciclables que son recolectados.

Por último, el municipio presenta estrategias de educación que le da a conocer a la población ciertas actividades para disminuir la generación de residuos que están siendo dispuestos al relleno sanitario, esto únicamente con los residuos reciclables, ya que como se mencionó anteriormente, en su mayoría los residuos generados por la población se llevan a disposición final; por lo tanto, no existe otra estrategia de aprovechamiento de residuos en el municipio, con base en lo anterior, se afirma que el municipio no cuenta con planes o estrategias para el aprovechamiento de residuos orgánicos, sabiendo que estos representan el 59,9% de los residuos totales que se producen en el municipio.

7.1.4. Levantamiento de datos frente a la opinión pública por medio de encuestas

Para el levantamiento de datos se realizó una encuesta por medio electrónico de forma presencial, de este modo se pudo conocer la percepción y la opinión pública frente al sistema de aseo municipal y la propuesta de implementar una planta de aprovechamiento de residuos orgánicos en el municipio. Para el método de muestreo se escogió la opción de no probabilístico por cuotas, que permitió extraer un tamaño de población que mejor representa a la población de estudio.

En primer lugar, se determinó el número de encuestas utilizando la ecuación de tamaño de muestra, con base en los usuarios registrados en el PGIRS (587 usuarios). Son aquellos usuarios que se encuentran suscritos al servicio de aseo municipal, adicionalmente, son estratos dos, ya que según el plan de ordenamiento territorial este es el estrato socioeconómico que predomina en el municipio, también es el estrato que cuenta con el mayor número de personas suscritas a dicho servicio.

El nivel de confianza de esta encuesta es del 95% y margen de error del 5% para una población de 587 usuarios, estas variables fueron determinadas y modificadas posteriormente por varias razones, en primer lugar, cierta parte de la población objetivo, se negaron a responder la encuesta debido a la situación actual frente al covid-19, por lo cual la gente presentó incomodidad frente a la interacción con la encuesta, también la población asume que esta encuesta estaba dirigida a estudios para el aumento en los impuestos.

Frente a los parámetros de probabilidad de éxito y probabilidad de fracaso, se optimizó el número de muestra, por este motivo p y q tomaron valores del 50% para así obtener la probabilidad máxima, el resultado de esta ecuación nos arrojó un número de muestra de 147 (ver **ecuación 1**).

Ecuación 1. Aplicación número de muestra.

$$n = \frac{587 * 1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.05^2 * (587 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5} = 147$$

N: 587	Q: 50%
Z: 1.96	D: 5%
P: 50%	N: 147

Elaboración Propia

7.1.5. Análisis del servicio de aseo y aprovechamiento de RSO

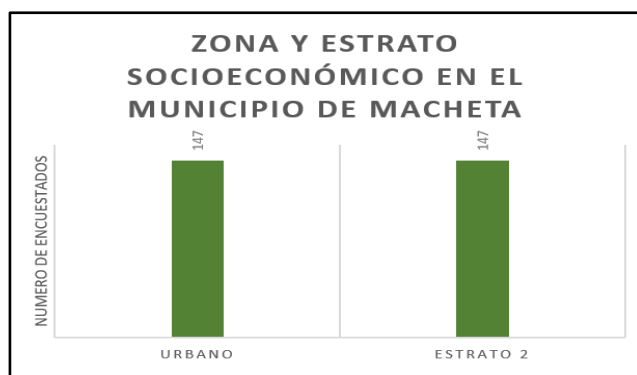
Para el análisis del servicio de aseo y aprovechamiento de los RSO, se realizó una encuesta con el fin de conocer la opinión pública frente a la prestación del servicio de aseo municipal del sector urbano, la percepción del servicio de aprovechamiento de residuos y la prefactibilidad que tendría la implementación de una planta de compostaje en el municipio de Machetá, adicionalmente se realizaron preguntas que permitieron conocer la conducta ecológica que tiene la población frente a los residuos sólidos urbanos.

Para iniciar la encuesta se le hizo al encuestado una pequeña reseña donde se le comentaba que la encuesta se realizaba con el fin de obtener información representativa para un trabajo de grado de la universidad Santo Tomás. Se le especificaba que no era necesario la toma de datos personales y que era únicamente importante su opinión. Por medio de una de las preguntas, se reafirmó la intención de participación y aceptaron la divulgación de la información con fines académicos. El 100% de la población objetivo estuvo de acuerdo con esta afirmación.

Como se puede observar en la **figura 3**, el 100% de los encuestados cumplen con los requisitos establecidos para la selección de número de muestra, ya que todos hacen parte de la zona urbana del municipio y están clasificados dentro del estrato socioeconómico dos.

Es importante tener en cuenta, que los comentarios realizados, a parte de las preguntas hechas en la encuesta también fueron sujeto de análisis de los datos obtenidos.

Figura 3. Zona y estrato socioeconómico en el municipio de Machetá.



Elaboración propia.

La identificación de los hogares que cumplen con los requisitos establecidos se realizó con ayuda de un mapa satelital, **Figura 4**. Este fue elaborado inicialmente para identificar los hogares que estuvieran dentro de la población objetivo.

Figura 4. Mapa de selección hogares del casco urbano en Machetá.

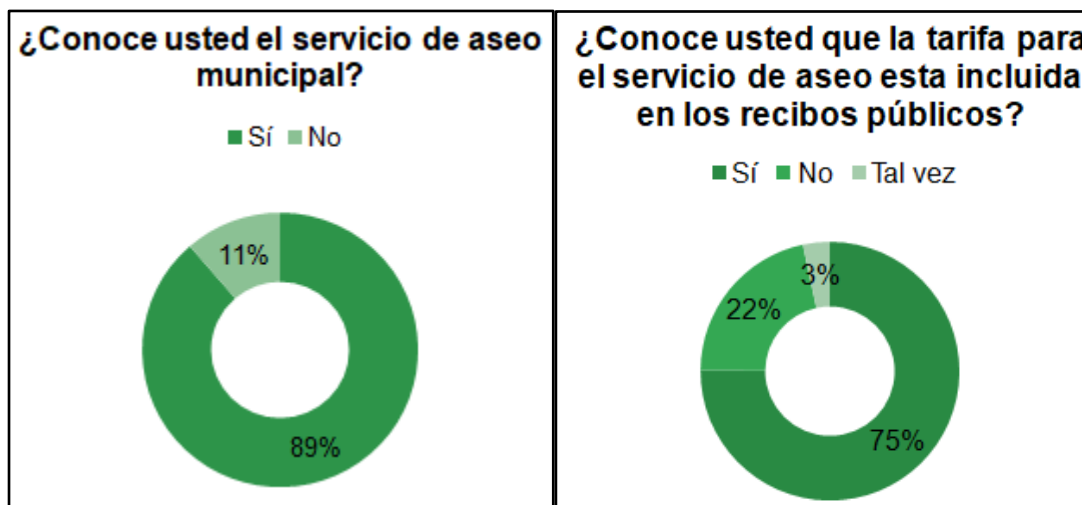


Elaboración propia con (Google, s.f.)

Se inicio comprendiendo la dinámica de la población frente al servicio de aseo municipal y sus actividades (ver **figura 5**), en primer lugar se pregunta si la población conocía que es el servicio de aseo municipal, en donde el 88,6% de los encuestados afirmaron conocer el servicio, haciendo referencia a la recolección de las basuras con el carro recolector compactador, actividades como barrido y lavado de áreas públicas, en función de esto, se aclaró que en parte el servicio de aseo estaba relacionado con lo que ellos pensaban y se dio a conocer su funcionamiento y actividades estipuladas por la empresa prestadora del servicio de aseo. Adicionalmente al 11,7% de los encuestados que respondieron que no conocían este servicio, se le daba una pequeña retroalimentación dando a conocer que “El servicio público domiciliario de aseo para RS y para otros residuos está compuesto por la recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de los RS, también comprende las actividades de barrido y limpieza de vías y áreas públicas y la recolección.” (Decreto N° 2981, 2013).

Dentro del mismo contexto se preguntaba si conocía que: dentro de la tarifa de los servicios públicos se cobra la prestación del servicio de aseo, el 75,2% de los encuestados respondieron que sí conocían y que esta se encontraba dentro del recibo del acueducto, el 21,5% afirmaron no saber que esta actividad se cobraba y que por su parte verificarían el recibo del agua para conocer la tarifa, las personas restantes se notaron indecisas, optando por la opción “tal vez”. Lo anteriormente descrito se evidencia en la **figura 5**.

Figura 5. Conocimiento básico de la prestación del servicio de aseo municipal.



Elaboración propia.

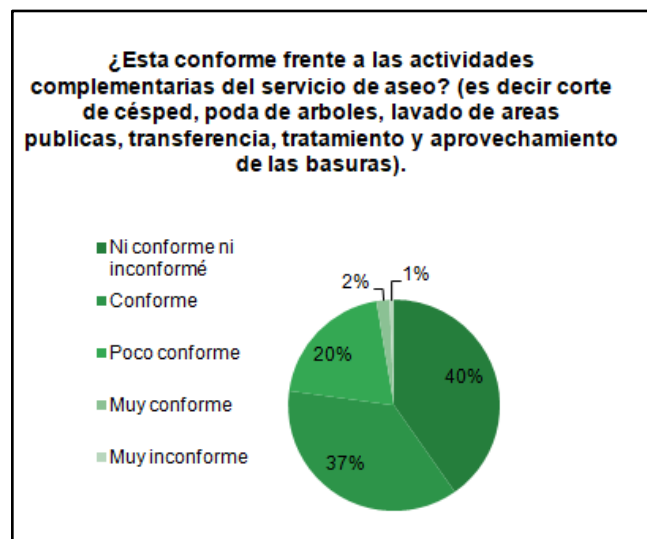
Para conocer el nivel de conformidad que tienen los usuarios del servicio de aseo, se realizaron dos preguntas (ver **figura 6**), la primera fue: ¿Está conforme con la prestación del servicio de aseo? (frente a la continuidad, calidad y cobertura), en su mayor parte con un porcentaje mayor equivalente al 45% se mostraron conformes, en un segundo lugar con un 40,9% se tiene

que no están conformes ni conformes, un 12,1% dijo estar poco conforme y tan solo el 2% está muy conforme. Seguido se tenía de manera transversal la pregunta de si ¿Se encuentra conforme frente a las actividades complementarias del servicio de aseo? (es decir corte de césped, poda de árboles, lavado de áreas públicas, transferencia, tratamiento y aprovechamiento de las basuras). De lo cual se obtuvo que la población en un 40,3% no se encuentra conforme ni inconforme, el 36,9% conforme, el 20,1% poco conforme y en menor proporción está el 2% con muy conforme y el 0,7% con muy inconforme.

Analizando estos resultados y añadiendo la opinión de los encuestados, se pudo observar que en ambas preguntas la gente se encuentra conforme o medianamente conforme, pues la población encuestada afirmó que el servicio de aseo más específicamente a la recolección de los residuos, se realizaba continuamente y en los horarios propuestos para la recolección, además añadían que estaban viendo nuevas actividades, como la recolección de materiales aprovechables tales como cartón, vidrio y plástico.

Pero por el otro lado, las personas que eligieron la opción “poco conforme o muy inconforme”, basaban su argumento en que algunas áreas del municipio eran priorizadas, en cuanto al barrido de calles y embellecimiento de áreas públicas, en su mayoría estos comentarios fueron aportados por personas que se encuentran en las áreas más alejadas del centro del pueblo, ya que como afirmaron, se presta mayor importancia a la parte central del pueblo.

Figura 6. Conformidad de los usuarios del servicio de aseo.

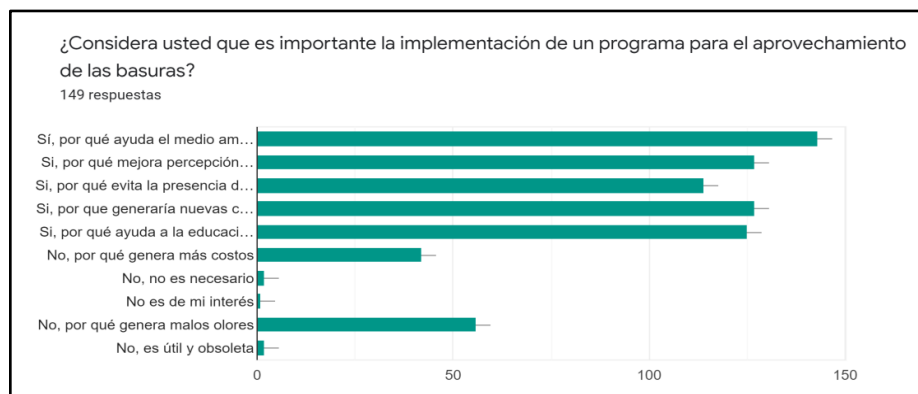


Elaboración propia.

Por otro lado, era de suma importancia tener conocimiento del punto de vista que tiene la población frente al aprovechamiento de las basuras, dado que esto demostraría si las personas consideran si es o no importante la implementación de un programa para el aprovechamiento, para

deducir las razones por las cuales atribuyen su elección (ver **figura7**), dado esto los resultados fueron los siguientes:

Figura 7. Importancia del aprovechamiento de residuos.

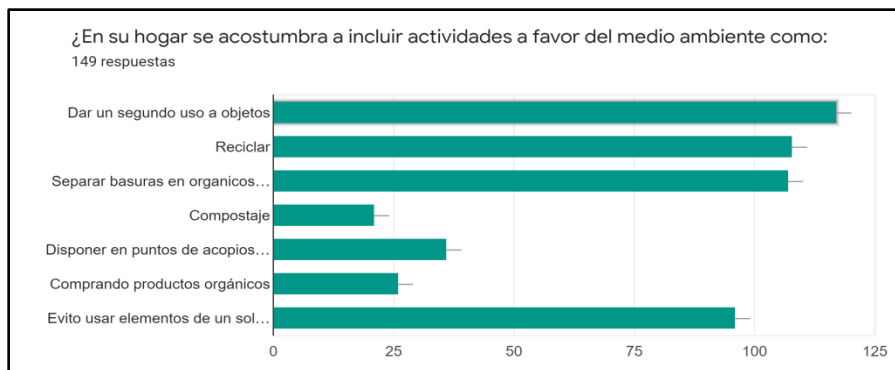


Elaboración propia.

Con estos resultados se evidencia que para la población es de gran importancia la implementación de un programa para el aprovechamiento de las basuras, debido a la cadena de beneficios que traería al municipio y sus habitantes, así mismo es importante resaltar que las personas ven como problema el aumento en los costos en la tarifa, ya que ellos mismos expresaban que se necesitaría una infraestructura y mano de obra para ejecutar un programa como estos, también, al ser una actividad a base de la degradación de los residuos preocupa el aspecto de la generación de malos olores.

Para conocer la conducta ambiental que se tiene en los hogares del municipio, se incluyó una pregunta dirigida hacia las actividades a favor del medio ambiente que se tienen establecidas en las casas o establecimientos (ver **figura8**).

Figura 8. Conductas de aprovechamiento en Machetá.



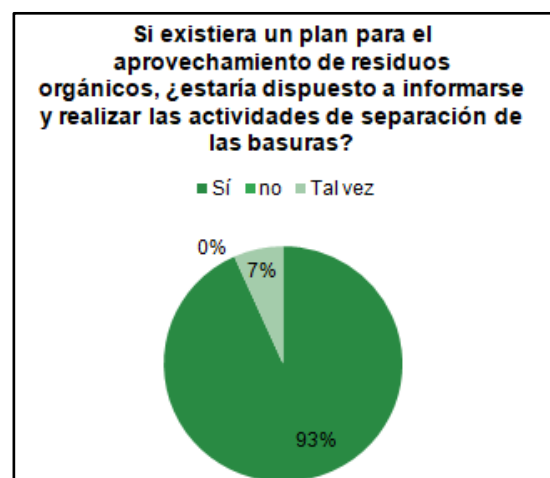
Elaboración propia.

Uno de los aspectos más importantes era conocer si se reciclaba o se hacía separación de residuos orgánicos e inorgánicos, lo que permitió saber si se realiza separación en la fuente (ver **figura8**).

Con estos resultados se evidencio que la comunidad cuenta con conductas que favorecen el aprovechamiento, fomentando la educación ambiental.

Se tuvo en cuenta que la población estuviese dispuesta a informarse y realizar actividades como la separación de residuos en la fuente (ver **figura9**), a lo cual, el 93,3% respondió que sí, comprometiéndose a informarse y llevar a cabo actividades propuestas para el aprovechamiento de los residuos, no se obtuvo ninguna respuesta negativa, por lo contrario, el 6,7% dijeron que tal vez realizar dichas actividades. Es evidente el compromiso de la población frente a la actividad de educación, facilitando así la primera fase del compostaje, evitando problemas en el proceso de selección para obtener un producto final de buena calidad.

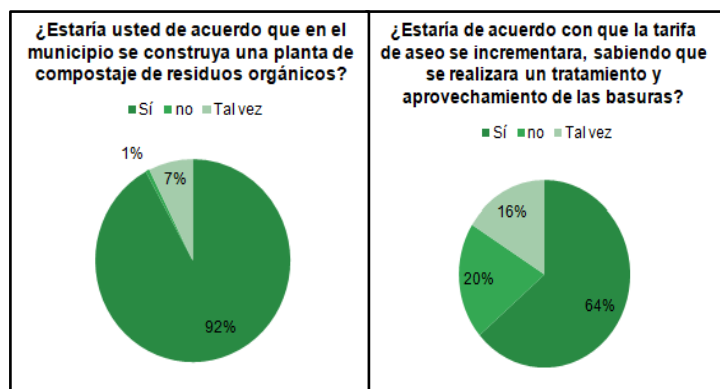
Figura 9. Educación ambiental.



Elaboración propia.

También se pudo observar por medio de la encuesta, que la población ve la necesidad de aprovechar los residuos generados, pues al preguntar si estaría de acuerdo con la implementación de una planta de compostaje en el municipio no se obtuvo ninguna respuesta negativa (ver **figura 10**), por lo contrario, el 91,9% afirmaron estar de acuerdo con esta iniciativa, de los cuales el 63,8% estarían dispuestos aportar por medio de la tarifa pública de aseo para la implementación, operación y mantenimiento de dicha planta, únicamente el 20,3% de los encuestados afirman no querer evidenciar el aumento en el recibo público.

Figura 10. Aceptación de implementación y aumento en la tarifa pública.



Elaboración propia.

Frente a la aceptación que tendría el producto en la población se dedujo que, si la población del sector urbano requiere el producto lo compraría, ya que el 92,3% de la población afirmó querer comprar el producto (ver *figura 11*).

Es necesario tener en cuenta que el producto principalmente está dirigido a aquellas personas que tengan cultivos de papa y cebolla debido a los componentes nutricionales del compostaje que se desea elaborar.

Figura 11. Aceptación del producto.



Elaboración propia.

7.2. Análisis comparativo de las diferentes técnicas y tecnologías del compostaje para determinar cuál se adapta a las condiciones del municipio.

7.2.1. Determinación de la cantidad de residuos a tratar por medio de proyecciones para el tiempo de funcionamiento de la planta.

Dada la temática del título F del RAS dedicada al sistema de aseo urbano, se disponen de ciertas metodologías para hacer el cálculo de proyecciones, según el nivel de complejidad, el cual

se da en “función del número de habitantes en la zona urbana, de la capacidad económica y del grado de exigencia técnica del sistema de la población a proyectar” (EMSER, 2015).

Se identificó que el municipio de Macheta posee un nivel de complejidad medio, por lo tanto, todos los métodos propuestos por el RAS se pueden aplicar.

Para la aplicación de un método de proyección, se tuvo en cuenta los datos investigados como lo es la densidad poblacional de la cabecera municipal de Machetá, tomando datos obtenidos de censos previos realizados en el año 2005 y 2018. Además, se consultó el RAS donde se estipula que para hacer proyecciones de estrategias relacionadas con el aprovechamiento de los residuos sólidos se debe hacer como mínimo para 20 años, por esta razón el método geométrico se descarta, ya que este aplica para hacer proyecciones de 10 a 15 años.

El método wappus al ser aplicado a poblaciones entre 5.000 y 10.000 habitantes no se adecua para hacer la proyección del casco urbano del municipio de Macheta, ya que según el Censo de 2018 se estima una población de 1.584 personas, la cual, es inferior a la requerida por este método. Como se tiene información poblacional de Censos de 2005 y 2018 no es necesario recurrir al método gráfico, al ser difícil encontrar un Censo previo al 2005 no se optó por escoger el método exponencial. Los métodos de detallar por zonas y por densidades, tampoco aplicaron a la población a proyectar, ya que esta tiene un crecimiento continuo. Por lo cual, el método que mejor se ajusta a la descripción del crecimiento poblacional es el método aritmético, además, que con este se realizaron las proyecciones en el último PGIR del municipio.

Se ingresó en Excel la fórmula del método aritmético con la población urbana censada para los años 2005 y 2018 (ver **tabla 2**). Donde también se incluyó la población flotante correspondiente a turistas, o migrantes no incluidos en el censo, ya que estos contribuyen a la generación de residuos y es necesario tenerlos en cuenta.

Este dato de población flotante se obtuvo por medio de información suministrada en la oficina de desarrollo social del municipio, en donde proporcionaron “datos previos a la pandemia, pues dadas las condiciones de salud pública, la cantidad de turistas en el pasado y presente año disminuyó” (Cáceres. C., comunicación personal, 9 de septiembre de 2021), en función de la normatividad se tomaron datos de años anteriores. Dicha población corresponde al promedio de personas que ingresaban al municipio en épocas especiales como navidad, año nuevo, festivales, ferias y fiestas, se incluyeron los mercantiles y personas deportistas que pasan en promedio de 1 a 4 días en el municipio.

Es importante tener en cuenta que también se incluye población migrante, ya que en los últimos años ha aumentado y esta no se encuentra dentro de la población censada, se estima que la población flotante corresponde al 3,3% de la población total del municipio (ver **tabla 3**).

Tabla 2. Datos iniciales proyección.

Información según Censos nacionales		
Población urbana	2018	1.584
	2005	1.415

Elaboración propia (DANE).

Tabla 3. Datos de población.

Año	Población urbana	Población flotante (3,3%)	Población urbana total proyectada
2022	1623	53,559	1676,559
2023	1636	53,988	1689,988
2024	1649	54,417	1703,417
2025	1662	54,846	1716,846
2026	1675	55,275	1730,275
2027	1688	55,704	1743,704
2028	1701	56,133	1757,133
2029	1714	56,562	1770,562
2030	1727	56,991	1783,991
2031	1740	57,42	1797,42
2032	1753	57,849	1810,849
2033	1766	58,278	1824,278
2034	1779	58,707	1837,707
2035	1792	59,136	1851,136
2036	1805	59,565	1864,565
2037	1818	59,994	1877,994
2038	1831	60,423	1891,423
2039	1844	60,852	1904,852
2040	1857	61,281	1918,281

2041	1870	61,71	1931,71
2042	1883	62,139	1945,139

Elaboración propia.

Conociendo la población que se espera por cada año según la proyección, se determinaron el número de usuarios, teniendo en cuenta que el promedio de habitantes por vivienda es de 2,7 personas para el casco urbano, esto según el último informe del PGIR. La proyección de la población urbana se hizo con el fin de multiplicarla por la producción per cápita de los residuos y de esta manera obtener la cantidad de residuos generados cada año, conociendo que la producción per capital es de 0,71 kg/Hab*día (PGIRS, 2021), recopilando esta información se obtuvo la **Tabla 4**, en esta se puede evidenciar la generación de residuos en función de la proyección poblacional para cada año.

Tabla 4. Cantidad de residuos producidos en Macheta en función de la proyección poblacional.

Año	Población urbana total proyectada	Número de usuarios	Producción total de residuos (Ton/año)	Cantidad correspondiente a los residuos orgánicos (Ton/año)
2022	1677	693	491,9	294,638
2023	1690	698	495,8	296,998
2024	1703	704	499,8	299,358
2025	1717	709	503,7	301,718
2026	1730	715	507,6	304,078
2027	1744	721	511,6	306,438
2028	1757	726	515,5	308,798
2029	1771	732	519,5	311,158
2030	1784	737	523,4	313,518
2031	1797	743	527,3	315,878
2032	1811	748	531,3	318,238
2033	1824	754	535,2	320,598

2034	1838	759	539,2	322,958
2035	1851	765	543,1	325,318
2036	1865	770	547	327,678
2037	1878	776	551	330,038
2038	1891	782	554,9	332,398
2039	1905	787	558,9	334,758
2040	1918	793	562,8	337,118
2041	1932	798	566,7	339,478
2042	1945	804	570,7	341,838

Elaboración propia.

7.2.2. Identificación de técnicas y tecnologías para el proceso productivo de la planta de compost

El proceso del compostaje es un proceso exotérmico, bien sea aerobio o anaerobio que permitirán la descomposición de la materia orgánica bajo algunas variables de control en determinado tiempo.

Dado el enfoque que se le ha dado a este trabajo de grado, que tiene como finalidad obtener un producto que sirva como enmienda para el suelo, que sea económico y orgánico para los cultivadores de la zona. Como lo afirma Barradas (2009) “el proceso aerobio tiene una finalidad diferente que el proceso anaerobio”, por lo que se decide seleccionar el proceso aerobio, ya que este tiene como fin producir humus por medio del proceso de degradación del compostaje, mientras que el proceso anaerobio tiene como finalidad la producción de energía, por medio del aprovechamiento del biogás generado por medio de digestores o fermentadores.

Con base en la revisión bibliográfica, se lograron reconocer cuatro alternativas de compostaje aerobio, que cumplen con las condiciones requeridas por el municipio, a continuación, se presenta el proceso de selección de alternativas, buscando elegir la más apropiada en términos operativos, técnico y económicos.

7.2.3. Análisis comparativo de las diferentes técnicas y tecnologías del compostaje para determinar cuál se adapta a las condiciones del municipio.

7.2.3.1. Criterios de selección del sistema de compostaje en función de su tamaño y capacidad

Luego de entender, que el tamaño y capacidad de una planta de compostaje, se refiere a la cantidad de residuos que esta pueda tratar en función del número de pobladores y la producción per cápita. Como se puede observar en la **tabla 5** las pilas por aireación mixta tienen una capacidad de tratamiento mayor a la requerida, por lo que se incurrirían en gastos innecesarios, ya que la capacidad requerida por el municipio es de 0,94 ton/día, mientras que las otras tres tecnologías restantes se encuentran en un rango apropiado de acuerdo con la generación diaria de RSO.

Tabla 5. Escala en función del tamaño y capacidad de tratamiento.

T. Tecnología	Tamaño	Capacidad
Pilas por aireación manual	Mediana	0 < 2 Ton/día
Pilas estáticas de aireación forzada	Mediana y grande	0,5 < 100 Ton/día
Pilas por aireación convectiva natural	Mediana	0,015 < 2,5 Ton/día
Pilas por aireación mixta	Grande	2 < 200 Ton/día

(Páez, 2021).

7.2.3.2. Criterio de selección por parámetros de control

Dentro del conjunto de los parámetros de control, existen dos tipos, los cuales hacen parte de uno de los criterios de selección más importantes para cada tecnología, estos son:

“parámetros de control, son aquellos parámetros que requieren de control y seguimientos, en los cuales se encuentran: temperatura, humedad, pH, aireación y espacio de aire libre; parámetros relativos a la naturaleza del sustrato, tales como tamaño de partícula, relaciones C/N y C/P, nutrientes y materia orgánica” (Madejon y Col, 2001).

Como se puede observar en la **Tabla 6**, se realizó una evaluación determinada por la facilidad de control de cada uno de los parámetros en función de una revisión bibliográfica previamente realizada.

El rango y criterio de evaluación es de uno a tres, donde 3 representa una mayor facilidad en el control del parámetro, mientras que 1 representa menor facilidad en el control del parámetro y dos es un estado neutro.

Tabla 6. Parámetros de control por tecnología de compostaje.

Parámetros	Tipo de tecnología			
	P. aireación manual	P. estáticas de aireación forzada	P. aireación convectiva	P. aireación mixta
Temperatura	2	3	1	2
Humedad	3	3	1	2
pH	3	3	2	3
Relación C/N	2	3	3	3
Oxígeno	3	3	1	2
Tamaño de partícula	2	2	2	2
Inyección de aire	3	1	3	2
Tiempo de degradación	1	3	2	2
Volteo	1	3	3	3
Total puntos	25	29	21	25

Elaboración propia, información obtenida de (Jeris y Regan, 1973; Madejón et al., 2001; RAS, 2000 en su título F).

7.2.3.3. Criterio de selección por costo de maquinaria y equipo

El factor económico es fundamental para la toma de decisiones, por lo tanto, se realizó la **Tabla 7**, donde se evidencia los equipos y maquinaria requerida para cada tecnología de compostaje, de igual manera se realizó la búsqueda en plataformas de venta que permitieran conocer el costo de estos elementos y así evidenciar la diferenciación de costos por tecnología.

Tabla 7. Maquinarias y equipos por tecnología de compostaje.

Maquinaria y equipo/cantidad	Tipo de tecnología			
	P. aireación manual	P. estáticas de aireación forzada	P. aireación convectiva	P. aireación mixta
Báscula	1	1	1	1
Termómetro	1	1	1	1
pH-metro	1	1	1	1
Higrómetro	1	1	1	1
Triturador	1	1	1	1
Medidor multi. oxígeno	1	1	1	1
Ventilador		4		4
Regulador de aire		4		4
medidor de presión		4		4
Palas para volteo	8			

Elaboración propia, información obtenida de (Asociación CAAE, 2005; Aldea verde, 2021; Tortosa, 2013).

Como se puede observar en la **Tabla 8**, los costos totales por tecnología de compostaje hacen referencia al número de equipos y máquinas requeridas por cada tecnología mencionada (ver **Tabla 7**). Para determinar los costos de cada uno de los elementos, se realizó una búsqueda por diferentes sitios web tales como: Mercado libre, Alibaba, Herpon.

Tabla 8. Costos totales de maquinaria y equipo por tecnología de compostaje.

Tipos de tecnología	Costo equipo y maquinaria (COP)
Pilas por aireación manual	\$3.643.341,00
Pilas estáticas de aireación forzada	\$10.800.141,00
Pilas por aireación convectiva natural	\$3.304.141,00
Pilas por aireación mixta	\$10.800.141,00

Elaboración propia con valores estimados de costos (Mercado libre, Alibaba, Herpon).

La tecnología de pilas estáticas con aireación forzada y las pilas por aireación mixta tuvieron los mismos costos en cuanto el equipo y maquinaria requerida, debido a que en ambas se debe hacer la instalación de un sistema de aireación asistida.

7.2.3.4. Comparación de ventajas y desventajas frente a cada tecnología

Con base en lo anterior, se realizaron dos tablas con las ventajas y desventajas que tendría cada uno de los sistemas en el proceso de operación (ver **Tabla 9 y Tabla 10**). Estas tablas se complementan con información encontrada por medio de una búsqueda bibliográfica.

Tabla 9. Ventas por tipo de tecnología.

Tipo de tecnología	Ventajas
Pilas por aireación manual	- Bajo costo de inversión. - Bajo costo de mantenimiento. - Facial control de los parámetros. - Requiere menor personal técnico o especializado. - Permite que la mezcla sea más homogénea. - Mayor generación de empleo. - No depende de un sistema de aireación. - No genera consumo de combustibles. - Mayor cantidad de micronutrientes.
Pilas estáticas de aireación forzada	- Menor tiempo de degradación. - Menor cantidad de mano de obra.

	- Menor exposición de los trabajadores. - Mayor capacidad de tratamiento. - Menos sensible a que las pilas de volteo sufran de deshidratación. - Mayor cantidad de macronutrientes. - Disminuye la generación de los sólidos volátiles.
Pilas por aireación convectiva natural	- Bajo costo de inversión. - Menor cantidad de mano de obra. - No genera consumo de combustibles. - No depende de un sistema de aireación. - Mayor control de olores. - Mejor control de los vectores. - Menor exposición de los trabajadores. - Disminuye la generación de los sólidos volátiles. - Mayor eficiencia en el proceso.
Pilas por aireación mixta	- Escasa generación de lixiviados. - Optimiza el consumo de energía. - Mayor capacidad de tratamiento. - Menor cantidad de mano de obra. - Optimización de espacio. - Menor exposición de los trabajadores. - Menos sensible a que las pilas de volteo sufran de deshidratación. - Mayor control de olores. - Mejor control de los vectores. - Mayor cantidad de macronutrientes. - Disminuye la generación de los sólidos volátiles. - Mayor eficiencia en el proceso.

Elaboración propia, información obtenida de (AGROWASTE, 2014; Castells, 2012).

Tabla 10. Desventajas por tipo de tecnología.

Tipo de tecnología	Desventajas
Pilas por aireación manual	- Mayor requerimiento de espacio. - Funcionamiento más lento en condiciones climáticas frías y de lluvias.

	- Requiere mayor contacto y exposición del personal. - Presenta dificultades para el control de la temperatura. - Difícil manejo de vectores. - Aumento de costos por contratación de personal. - Mayor sensibilidad a la deshidratación del material. - Mayor consumo de agua.
Pilas estáticas de aireación forzada	- Mayor consumo eléctrico. - Mayores costos de mantenimiento y operación. - Requiere mayor personal técnico y profesional. - Mayor inversión inicial. - Mayor frecuencia de mantenimiento. - Depende completamente del sistema de aireación. - Propenso a tener mala mezcla.
Pilas por aireación convectiva natural	- Mayor tiempo de degradación. - Generación de malos olores. - Propenso a tener mala mezcla.
Pilas por aireación mixta	- Mayores costos de mantenimiento. - Requiere mayor personal técnico y profesional. - Mayor inversión inicial. - Depende medianamente del sistema de aireación. - Propenso a tener mala mezcla.

Elaboración propia, información obtenida de (AGROWASTE, 2014; Castells, 2012).

7.2.3.5. Aplicación matriz de decisión

Una vez identificados y evaluados los criterios de selección como, el tamaño y capacidad de la planta, parámetros de control y costos de maquinaria y equipo, de cada una de las tecnologías, también con base en las ventajas y desventajas de cada tecnología en el desarrollo del proceso, se realizó la evaluación por medio de una matriz de priorización la alternativa más adecuada para implementar en el municipio de Machetá.

El rango y criterio de evaluación de esta matriz de priorización o matriz de decisión (ver **Tabla 11**), hace referencia a las condiciones más favorables o poco favorables frente al cruce entre criterio de selección y cada una de las tecnologías.

Tabla 11. Escala de calificación.

Rango	Criterio
1	Deficiente
2	Malo
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente

Elaboración propia.

A continuación (ver **Tabla 12**), se evaluaron individualmente los criterios de selección y las tecnologías en función de las características requeridas por el municipio y teniendo en cuenta las condiciones más viables para el proyecto. Resultado de esta evaluación se determinará la tecnología apropiada para implementar.

Tabla 12. Matriz de decisión tipo de tecnología y criterios de selección.

Tipo de tecnología/criterios de selección	Capacidad y tamaño de tratamiento	Parámetros de control	Costo de maquinaria y equipo	Sumatoria
Pilas por aireación manual	3	4	4	11
Pilas estáticas de aireación forzada	5	5	3	13
Pilas por aireación convectiva natural	4	3	5	12
Pilas por aireación mixta	2	4	3	9

Elaboración propia.

El primer criterio de selección evaluado corresponde al tamaño y capacidad de tratamiento que tiene cada sistema de compostaje, este es bastante importante ya que influye en los costos económicos y área requerida por el sistema.

Al comparar los cuatro sistemas propuestos dentro de la matriz de selección, se puede evidenciar que el sistema de pilas por aireación forzada es la tecnología que se adecua mejor a la capacidad de tratamiento, además, al tener un amplio rango de capacidad de tratamiento, permite que la planta pueda aumentar la cantidad de residuos que ingresan sin necesidad de cambiar el sistema de aireación o proceso de producción, siendo así, una de las alternativas más viables. Este criterio es bastante importante para su dimensionamiento, ya que en este se tienen en cuenta las áreas necesarias para su funcionamiento, lo cual influye directamente en la demanda económica que generaría la planta como inversión inicial.

El segundo criterio de selección, es fundamental para el proceso, ya que a partir de este se controla la degradación de la materia. El monitoreo de distintos parámetros se convierte en algo primordial durante el proceso, realizando toma de muestras y asegurando siempre que las variables se encuentren entre los rangos adecuados para garantizar la calidad del producto final. En función de la eficiencia de este proceso rutinario las pilas por aireación forzada es el sistema con mayor calificación, ya que al ser más tecnificado no requerir volteos frecuentes ni la implementación de un sistema de aireación natural, esto hace que el control de las variables sea más fácil.

El tercer criterio de selección está relacionado con los costos correspondientes a los equipos y maquinaria más relevantes para cada una de las tecnologías de compostaje, para determinar el costo total como inversión inicial, se indago cuáles y en qué cantidad eran requeridos para el apropiado funcionamiento de la planta de compostaje, ya teniendo estos datos, se buscó en páginas de compras los equipos que cumplieran con las características requeridas tales como la capacidad y funcionamiento.

Al obtener el valor total se identificó que la tecnología con menor costo de inversión en cuanto maquinaria y equipo fue la de pilas por aireación convectiva natural, la aireación es una variable de operación indispensable, así lo afirma Kulcu y Yaldis (2004; Bueno et al. 2008) pues esta variable es una de las que más influye frente a los costes de operación, ya que como afirman se incurre en costos entre el 32 - 46% de los costes totales del funcionamiento del proyecto a mediano y largo plazo.

Teniendo ya la valoración y análisis de cada tecnología frente a cada criterio de evaluación se determinó que la tecnología escogida es la de aireación forzada, ya que por medio de la calificación realizada en la **Tabla 12** se evidencia es la alternativa con más beneficios según la matriz de decisión.

7.2.4. Estudio técnico

7.2.4.1. Ubicación

La planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos propuesta para el municipio estará ubicada en el Departamento de Cundinamarca, Municipio de Macheta, vereda Resguardo Bajo vía Macheta - Guateque, cuenta con pendientes aproximadas de 5 a 10%, el área que delimita el predio es semiplano con vegetación superior a los tres metros alrededor y escarpado por donde atraviesa la Quebrada del Molino (Benavides C, 2018). Este terreno cumple con las características propuestas en el RAS título F del 2000, ya que está ubicado a una distancia mayor de 500 m de cualquier área residencial del municipio. Lo anterior descrito se demuestra en la **Figura 12**.

En la actualidad el municipio de Macheta no cuenta con un Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) actualizado ni en vigencia, por lo que no se tiene conocimiento del uso del suelo del terreno seleccionado, simplemente la denominación de uso potencial para actividades agrícolas; el proyecto de acuerdo para el EOT vigente hasta el 2019 destino en su artículo 27 una zona para el tratamiento y desarrollo detrás del perímetro urbano donde se esperaba desarrollar obras de infraestructura y saneamiento básico (Concejo municipal de Macheta, 2011). Además, según la oficina de planeación del municipio, dicho terreno está dispuesto en caso de implementar una planta de compostaje, ya que hoy en día en la zona se encuentran construidas y en funcionamiento las lagunas de oxidación de aguas residuales, las cuales darán paso a la construcción de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

La ubicación del lote garantiza el acceso hasta este terreno, pues cuenta con una vía sencilla conocida como vía Vereda-Lotavita, la cual tiene un desvío que permite la entrada y salida de vehículos a la ubicación del terreno, es relevante mencionar que, al ser una vía rural, el paso del vehículo recolector no tenga un mayor impacto sobre el tráfico de esta zona.

Es pertinente mencionar, que la velocidad y dirección del viento predominante en la zona donde se espera situar la planta, es de dirección Oeste noroeste (ONO) (Meteoblue, 2022), manteniendo una velocidad promedio de 14 Km/h (windfinder, 2022), de forma que permite garantizar que los olores ofensivos producidos por la planta de compostaje no afectaran directamente poblaciones aledañas.

Figura 12. Ubicación para la planta de tratamiento de RSU.



Elaboración propia (Google, s.f.)

7.2.4.2. Cálculos de dimensionamiento

A continuación, en la **Tabla 13**, se pueden observar los cálculos correspondientes al dimensionamiento de las áreas para la planta de compostaje, en la cual se tuvieron en cuenta las ecuaciones propuestas por el RAS, 2000 en su título F y el documento (Ávila y Moyano, 2019).

El área total de la planta está repartida en tres partes fundamentales según el RAS, 2000. La cámara de recepción, el área de degradación y el área de maduración. Para dar inicio al cálculo de dichas áreas se estableció la cantidad de materia que va ingresar al proceso de compostaje, se resalta que, para tener un producto final de buena calidad, se debe agregar al inicio del proceso un material para realizar la corrección de nutrientes, el cálculo de dicho material se realiza por medio de la **Ecuación 2**.

Ecuación 2. Corrección de nutrientes pilas de compost.

$$C1 * P1 + C2 * P2 = C3 * (P1 + P2)$$

Donde:

C1= relación C/N del material de entrada

C2= relación C/N del material de mezcla

C3= relación C/N óptimo del material de entrada

P1= Peso del material de entrada

P2= Peso del material de mezcla

(RAS título F ,2000).

A la semana se estima que entran, 6551,34 Kg de materia orgánica producto de la recolección, con una relación C/N de 20,9 de la biomasa, por lo que se le agrega 56,06 Kg/sem de aserrín con una relación C/N de 500 permitiendo así que la mezcla se encuentre entre los rangos establecidos. La suma del material de entrada más el aserrín, dan a conocer la carga total que conforma cada pila de degradación (6607,40 Kg/sem*pila). Por medio de la **Ecuación 3**, se realizó el cálculo correspondiente para conocer la cantidad de aserrín que se requiere en el proceso.

Ecuación 3. Corrección de nutrientes solución.

$$P2 = \frac{(25 * 6551,34 \text{ Kg/sem} - 20,9 * 6551,34 \text{ Kg/sem})}{(500 - 25)} = 56,06 \text{ Kg de Aserrín/sem}$$

Elaboración propia información obtenida de (RAS título F ,2000).

Tabla 13. Dimensionamiento de la planta de compostaje.

Ecuación para cámara de recepción		
Ecuación 4. Área de la cámara de recepción (A_c).	$A_c = \left(\frac{URSU \text{ orgánicos}}{\rho \text{ orgánico}} * H_c \right)$ Donde: (A_c)= Área de la cámara de recepción (m^2) $URSU \text{ orgánicos}$= Cantidad de residuos sólidos urbanos ($\frac{Ton}{día}$) $\rho \text{ orgánicos}$= Densidad de los residuos orgánicos ($\frac{Ton}{m^3}$) H_c = Altura de la cámara(m)	$A_c = \left(\frac{6,607 \frac{Ton}{sem}}{0,4 \frac{Ton}{m^3}} * 4 \right)$ $= 4,12 m^2$ $4,12 m^2 + 22 m^2 = 26,12 m^2$
Ecuación para área de descomposición		
Ecuación 5. Área transversal de la pila (A_T).	$A_T = \frac{B_p * H_p}{2}$ A_T = Área transversal de la pila (m^2) B_p =Base de la pila (m) H_p = Altura de la pila (m)	$A_T = \frac{4 m * 1,5m}{2} = 3 m^2$
Ecuación 6. Longitud de la pila.	$U_c = \left(\frac{URSU \text{ Orgánicos}}{\rho \text{ orgánico}} \right) / A_T$ U_c = unidad de compostaje diaria (Longitud de la hilera, m). ρ = densidad de los residuos orgánicos separados, ($\frac{Ton}{m^3}$) Q = cantidad de residuos orgánicos separados, Ton.	$U_c = \left(\frac{6,607}{0,4 \frac{Ton}{m^3}} \right) / 3 = 5,506 m$
Ecuación 7. Área total de degradación.	Cada unidad de compostaje (U_c) ocupa un área de $5,5m * 4 m$	$U_c = 5,5 * 4 = 22 m^2$
	$A_{comp} 4 U_c (30 \text{ días}) =$ número de U_c (30 días) * Área U_c	$A_{comp} 4 U_c (30 \text{ días}) =$ $(5 * 22) = 110,12 m$

Ecuación 8. Área de espaciamiento.	$A_E = (N^{\circ} \text{ Pilas} - 1 * S_h) * long$ A_E = Área de espaciamiento (m^2) $N^{\circ} \text{ pilas}$ = número de pilas S_h = Separación entre hileras(m) $long U_c$ = Longitud de la pila calculado (m)	$A_E = (5 - 1 * 1,5) * 5,506 m = 19,27 m^2$
Ecuación 9. Volumen de almacenamiento (V_{alm}).	$V_{alm} = \left(\frac{U_{RSU} \text{ Orgánicos} * t_{alm}}{\rho_{RSU} \text{ compostaje}} \right)$ V_{alm} = Volumen de almacenamiento (m^3) $U_{RSU} \text{ Orgánicos}$ = Cantidad de residuos sólidos urbanos ($\frac{Ton}{dia}$) $\rho_{compostaje}$ = Densidad de los residuos compostados ($\frac{Ton}{m^3}$) t_{alm} = tiempo de almacenamiento(días)	$V_{alm} = \left(\frac{6,607 \frac{Ton}{dia} * 17,20 \text{ días}}{0,4 \frac{Ton}{m^3}} \right) = 284,11 m^3$
Ecuaciones área de maduración		
Ecuación 10. Longitud total de la pila de maduración (L_m).	$L_m = \frac{V_{pila} * 1/2}{(B_p * H_p)/2}$ L_m = Longitud de la pila de maduración (m) V_{pila} = Volumen de la pila (m^3) B_p = Base de la pila (m) H_p = Altura de la pila (m)	$L_m = \frac{33,03 m^3 * \frac{1}{2}}{\frac{4m * 1,5 m}{2}} = 5,506 m$
Ecuación 11. Área de maduración (A_M).	$A_M = N^{\circ} \text{ pilas}_M * B_p * L_p$ A_M = Área de maduración(m^2) $N^{\circ} \text{ pilas}_M$ = Número de pilas de maduración B_p = Base de la pila (m) L_p = Longitud estándar de la pila (m)	$A_M = 5 * 4m * 5,506m = 110,12 m^2$

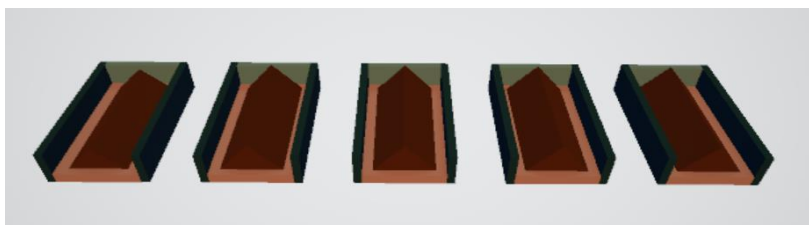
Ecuación 12. Área de espaciamiento zona de maduración	$A_E = (N^{\circ} \text{ Pilas} - 1 * S_h) * \text{long } U_c$ A_E = Área de espaciamiento (m^2) $N^{\circ} \text{ pilas}$ = número de pilas S_h = Separación entre hileras (m) $\text{long } U_c$ = Longitud de la pila calculado (m)	$A_E = (5 - 1 * 3 \text{ m}^2) * 5,506 \text{ m} = 11,01 \text{ m}^2$
Ecuación 13. Área total de maduración.	$A_{TM} = A_M + A_E$ A_{TM} = Área total de maduración (m) A_M = Área de maduración (m) A_E = Área de espaciamiento (m)	$A_{TM} = 11,01 + 110,12 = 121,13$
Ecuación 14. Área de oficina y servicios.	$A_{of} = 3 * A_{TA}$ A_{of} = Área de oficina y servicios (m^2) A_{TA} = Área de almacenamiento (m^2)	$A_{of} = 3 * 120 \text{ m}^2 = 360 \text{ m}^2$

Elaboración propia con información de (Ávila y Moyano, 2019; RAS, título F, 2000).

Con las ecuaciones anteriormente planteadas se puede estimar el área total de la planta de tratamiento. Es necesario tener en cuenta que en la cámara de recepción se realizó una modificación, ya que para poder hacer el descargue del material es necesario tener un área lo suficientemente grande, de forma que permita el ingreso del vehículo y además se pueda depositar el material fácilmente, por este motivo dicha área adicional es el equivalente a el área que ocuparía una pila de compostaje acumulada de una semana.

También otra de las modificaciones que se efectuó fue el área de espaciamiento entre pila y pila, como sugiere la normativa, esta distancia debe de ser de 3 m, mientras que en los cálculos se asigna una distancia de 1,5 m. Como se puede observar en la **Figura 13**, pues cada pila contará con cuatro muros de contención aproximadamente de un metro de altura cada uno, logrando una optimización del espacio, brindando un aspecto más ordenado y limpio en la planta, evitando el ingreso de roedores o animales a la pila.

Figura 13. Distribución de pilas.



Elaboración propia.

Debido a que en el RAS no se cuenta con las especificaciones necesarias para la determinación del área de molienda y cribado que se desarrolla en el proceso productivo, se asignan valores estimados en función del tamaño de los equipos utilizados en cada proceso 25 m^2 y 27 m^2 respectivamente. Finalmente teniendo los cálculos de cada una de las áreas. Se evidencia en la **Tabla 14**, el área total que ocuparía la planta de compostaje.

Tabla15. Área total para la planta de compostaje.

Ecuación 15. Área total planta de compostaje (calculada)	$At = A_C + A_{comp} + A_E + A_{TM} + A_{Of} + A_{Alm}$	$At = 808,64\text{m}^2$
--	---	-------------------------

Elaboración propia con información de (RAS, título F, 2000).

7.2.4.3. Sistema de aireación forzada

Para la instalación del sistema de aireación forzada, fue necesario calcular la cantidad de aire requerida en función de la cantidad de residuos a tratar. Se calcularon diferentes variables que influyen en la entrada y salida del aire, principalmente en el proceso de degradación (mesófila y termófila). A continuación, en la **Tabla 15**, se pueden evidenciar dichas variables:

Tabla 16. Cantidad de aire requerido por el S. aireación forzada.

Variables	Etapas de degradación
Temp. de entrada, del aire (°K)	290,950
Aire de entrada (mm Hg)	15,994
Temperatura de salida del aire (°K)	333,150
Aire de salida (mm Hg)	150,767
Humedad relativa del aire de entrada (18°C)	0,865
Presión de vapor de agua para el aire de entrada (mm Hg)	15,487
Humedad relativa a la salida (60°C)	0,990
Presión de vapor de agua para el aire de salida (mm Hg)	149,610
pt (mmHg)	760,500
Altitud m s. n. m	2094
Humedad específica del aire de entrada (lb agua/lb aire seco)	0,013
Humedad específica del aire de salida (lb agua/lb aire seco)	0,152
Cantidad diaria de sustrato tratado (Kg/sem)	6607,409
Humedad inicial de la mezcla a compostar %	0,550
Humedad deseada del material %	0,500

Masa de agua a remover (Kg)	3,320
Masa de agua a remover (lb)	7,257
Masa de aire (Kg de aire seco)	23,609
Densidad del aire (Kg/m³)	1,170
Flujo de aire (m³/día)	10,089
Horas de funcionamiento (día)	2
Flujo de aire (m³/h)	0,420

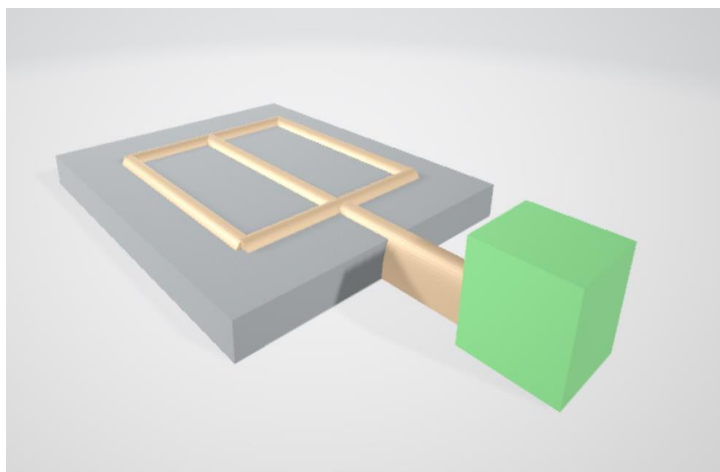
Elaboración propia con información de (Valverde, 2015, citado en Estrella, 2021).

El flujo de aire que requiere el sistema de aireación para una pila es $10,08 \text{ m}^3/\text{día}$, es decir que por hora se requiere $0,420 \text{ m}^3$. Así mismo, Chandler et al (2008) afirma que “2 horas diarias es el tiempo de aireación más adecuado para que el compostaje mantenga las variables dentro de los rangos establecidos y que exista menor pérdida de nutrientes por medio de lixiviación”.

Se establece como estrategia de aireación 5 minutos por cada hora del día para mantener encendido el aireador. Este equipo se distribuirá, de forma que permita el control del tiempo que dure encendido, dependiendo de la fase de degradación en la que se encuentre la pila. Se tendrán 2 aireadores, los cuales cuentan con tuberías y válvulas asegurando el suministro de aire.

Es importante tener en cuenta la distribución de la tubería de aireación, la cual será un sistema de tubería en paralelo que rodee el perímetro de la pila y también contará con tubería que se ubicará en el centro del sistema. Se busca que por medio de esta tubería exista una distribución uniforme del aire, por lo que cada rama del sistema tendrá la misma longitud, esto se puede observar en la **Figura 14**.

Figura 14. Distribución del sistema de tuberías por pila.



Elaboración propia.

Para la instalación de la tubería, según Cruz Frak (2006) se recomienda usar tubería de 4” en material de PVC, cada orificio deberá estar separado 50 cm sobre el primer tendido de material a compostar. “Los tubos deberán tener perforaciones de 5 mm de diámetro, a una distancia de 10 cm entre ellos” (Isaza et al., 2009).

Frente al sistema de ventilación, se evaluaron dos motoventiladores que “cuentan con una velocidad de salida de aire de 14,5 m/s y el flujo de aire de 1,5 m³/h, estos tienen tres conexiones” (Turboventilador TFV 3.0 - TROTEC, 2022), lo que permite distribuir el caudal uniformemente a las tres salidas de aire, entonces el flujo de aire por cada canal sería de 0,5 m³/h. Este motoventilador posee una válvula de cierre que permite suspender y graduar el flujo de aire según lo requiera el proceso.

7.2.4.4. Manejo de lixiviados y de aguas residuales

Para el control y manejo de los lixiviados se propone la implementación de un tanque séptico, el cual tiene como propósito minimizar el impacto ambiental y a la salud que las aguas residuales y lixiviados puedan generar. Este tanque estos compuestos inicialmente con una trampa de grasas prefabricada como sistema de pretratamiento, posteriormente se conducirá al tanque séptico que cuenta con dos cámaras y un filtro anaerobio de flujo ascendente, para que de esta forma la calidad del agua a verter sobre el cuerpo hídrico La Quebrada el Molino sea de buena calidad.

A continuación, en la **Tabla 17** se encuentra la **Ecuación 16**, donde se calculó la generación de lixiviados producidos por el proceso en un año.

Tabla 18. Cálculo de generación de lixiviados.

Ecuación 16. Volumen de lixiviados generados en el área de descomposición (V_{lixd})	$V_{lixd} = Qd * (0,05) \left(\frac{1 \text{ año}}{52 \text{ semanas}} \right) * Td * 1,5$ V_{lixd} = Volumen de lixiviado ($\frac{m^3}{año}$) Qd = Capacidad de diseño de la instalación, excluyendo el estructurante ($\frac{ton}{año}$) % lixiviado= Cantidad de lixiviado generado por tonelada es de 5% (<i>no porcentual</i>) Td: Tm = Duración de la etapa de descomposición y maduración respectivamente 1,5 = Factor de seguridad $V_{lixd} = 341,8 \frac{ton}{año} * (0,05) \left(\frac{1 \text{ año}}{52 \text{ semanas}} \right) * 8 \text{ semanas} * 1,5 = 4 \frac{m^3}{año}$
---	--

Elaboración propia con información de (Ávila y Moyano, 2019).

Para conocer la generación aproximada de lixiviados y aguas residuales a tratar, se realizó una sumatoria frente al consumo de agua en diferentes actividades en la planta, como lo son: las duchas, lava manos y sanitarios, también se incluyó el lavado del camión recolector, el lavado de áreas y el lavado de equipos. Finalmente, se tratará un caudal de 846,25 m³/año.

7.2.4.5. Cálculos diseño tanque séptico

En función del caudal, se realizó el dimensionamiento del tanque séptico con sus dos cámaras y un Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) (ver **Tabla 17 y Tabla 18**). Debido a las operaciones de lavado fue necesario implementar una trampa de grasas como pretratamiento a las aguas residuales generadas.

Tabla 19. Dimensionamiento Filtro FAFA.

Cámara filtro ajustado		
0,84625	m3/día	
V.filtrante	0,16925	m3
V.filtrante	0,3385	m3
Longitud	0,281	m
profundidad	1,20	m
Larg. filtro	0,23	m

Elaboración propia.

Tabla 20. Dimensionamiento del tanque séptico.

Dimensiones tanque		
V. Útil	2,46	m3
Profundidad útil	1,20	m
A. útil	2,05	m2
R. largo ancho	3,0	
Ancho	0,83	m
Largo	2,48	m
Cámara 1		
V. cam. 1	1,64	m3
A cam.1	1,36	m2
Largo cam. 1	1,65	m
Cámara 2		
V. cam. 2	0,82	m3
A cam.2	0,68	m2
Largo cam. 2	0,83	m

Elaboración propia con información de (Res. 908, 2021).

Figura 15. Diseño tanque séptico.



54

7.2.4.6. Descripción del proceso

Para llevar a cabo el proceso de compostaje por aireación forzada, es necesario tener en cuenta varios procesos que permitirán obtener un producto final de buena calidad:

En primer lugar, se realiza la recolección de los residuos sólidos orgánicos, por medio de una recogida puerta a puerta (PaP) y recolección de esquina o parada, donde se ubicarán contenedores para disponer los residuos, lo que permitirá tener un mejor control de estos cuando lleguen a la planta. Dicha recogida se hará por medio de un camión de carga (volqueta tipo Chana), el cual tiene una capacidad suficiente para transportar los residuos acumulados de una semana sin derrame de lixiviados.

Una vez los residuos llegan a la planta, son depositados en el área de recepción, donde se hará una primera separación, retirando aquellos materiales que no se consideran aptos para el proceso, en esta misma fase, también se hará la trituración de la materia orgánica disminuyendo el tamaño del material y facilitando así su descomposición, el tamaño idóneo de los residuos en este proceso debe de ser entre 20 mm y 10 mm, ya que según Sztern y Pravi (2008) “los residuos de un tamaño de 80 mm tienen un incremento significativo de la biodisponibilidad y del tiempo de compostaje en comparación con partículas de menor tamaño”. Teniendo la materia orgánica ya clasificada y triturada se procederá al pesaje de la materia, lo que permitirá llevar un control sobre la cantidad de residuos que ingresan al proceso.

Posteriormente, la materia orgánica será puesta en pilas, permitiendo realizar la mezcla con otros componentes como lo es el aserrín, ya que como afirma Garzón Marín et al. (2005) “este material hace un aporte importante de nutrientes como el carbono y el nitrógeno absorbiendo también el exceso de humedad del compost”. En función de la **Ecuación 3**, se calculó la relación Carbono Nitrógeno de la mezcla para garantizar la correcta degradación de la materia orgánica por medio de la actividad microbiana. Según parámetros establecidos en el (RAS título F, 2000) “la relación carbono nitrógeno del compostaje aerobio se considera adecuada cuando está en un rango de 20 - 30, si este se encuentra por debajo del rango adecuado, se deben agregar materiales con alto contenido de carbono y si está por encima, se deben agregar materiales con alto contenido de nitrógeno”.

Cuando se realiza la corrección de nutrientes, se reservará el compost dentro de una compostera, la cual funcionará con la técnica de aireación forzada que permitirá la descomposición de los residuos en sus primeras dos fases (mesófila y termófila).

La fase de latencia y crecimiento o también conocida como “fase mesófila tardará de 1 a 2 semanas, en esta etapa comienza la aclimatación de los microorganismos y su multiplicación” (Benavides R. J, 2017). El material fresco “tarda hasta 3 días en alcanzar la temperatura ambiente 20°C y empieza elevándose paulatinamente hasta alcanzar temperaturas aproximadas de 50°C lo que generará la emanación de vapor de agua” (MMAMRM, 2012).

“Para la fase termófila se espera que tarde entre 2 a 3 semanas, a lo largo de este tiempo se espera que la temperatura alcance el rango de 60°C a 70°C lo que permitirá la eliminación de gérmenes patógenos, larvas y semillas, pero las bacterias y hongos benéficos pueden soportar las altas temperaturas produciendo una rápida degradación de la materia” (Benavides R.J., 2017).

En estas dos fases de degradación es fundamental el ingreso de aire a la pila, ya que esto permitirá una correcta actividad microbiana, aparte de esto, regulará las temperaturas y niveles de oxígeno que logre alcanzar la pila, de esta forma permitiendo un mejor control de las variables de la pila. El sistema de aireación se activará por 5 minutos con intervalos de 55 minutos, esto durante las 24 horas del día, tal como se muestra en la **Tabla 15**.

Cuando se alcanzan temperaturas aproximadas de 70°C es necesario entrar a la fase de enfriamiento, cabe resaltar que durante todo el proceso se realizará diariamente un control de temperatura, humedad, oxígeno y pH para garantizar la calidad del producto final. Cuando se extraiga el material de la compostera para pasar a la fase de enfriamiento y maduración serán puestas en pilas donde disminuirá considerablemente su temperatura (Temperatura ambiente aproximadamente 20°C), ya que como afirma Muñoz y Cotacio, (2015) “el cambio de temperatura activará nuevamente las bacterias mesófilas permitiendo la degradación total de la materia orgánica que no logró descomponerse en su totalidad, esta fase dura aproximadamente 1 mes, hasta que el material se enfríe completamente”. Dichas fases de compostaje anteriormente mencionadas se pueden observar gráficamente por medio de la **Figura 16**.

Figura 17. Fases del compostaje.



(Agencia de Residuos de Cataluña, 2016).

Seguidamente, se tritura el compostaje, garantizando un tamaño de partícula uniforme para el producto final, “el material compostado debe estar entre un rango de granulometría de 3 mm a 5 mm para dar paso a la siguiente etapa de cribado” (Corantioquia, 2010).

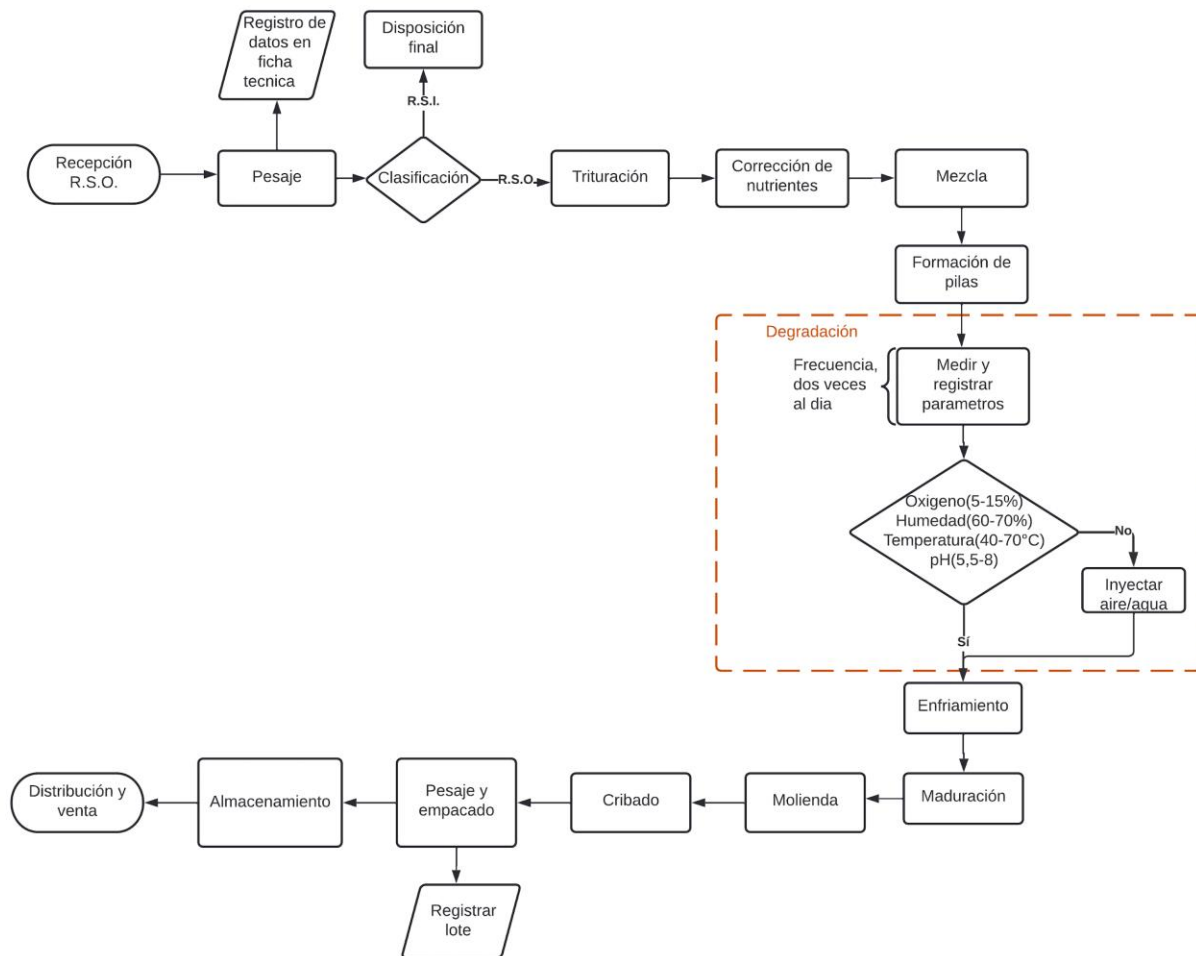
Para este punto se habrán degradado los compuestos orgánicos, tóxicos y metales pesados y todos los componentes de la mezcla son transformados en sales minerales y ácidos húmicos. Es

necesario tamizar el producto final para así eliminar residuos no deseados, retirando así cualquier material que haya pasado la segregación inicial, tales como fragmentos de vidrio, metales, plástico, textiles, entre otros. Esta actividad permite mejorar la uniformidad y apariencia del compost. Alcolea y González (2000) recomiendan que el tamaño para los poros de la criba con la cual se tamizará el compostaje sea de 0,5 – 1 cm de luz.

Finalmente, se lleva el material al área de empaque, el cual irá en lonas de fibra con capacidad de 40 Kg, estos serán ubicados en la zona de almacenamiento sobre estibas para evitar que se contamine el producto final; la capacidad de almacenamiento de esta área está diseñada para 4 meses de producción.

Con base en lo anterior, se presenta a continuación la **Figura 18**, que contiene el diagrama de procesos donde representa el flujo de la actividad de compostaje:

Figura 19. Diagrama de proceso.



Elaboración propia.

7.2.4.7. Diagrama de bloques

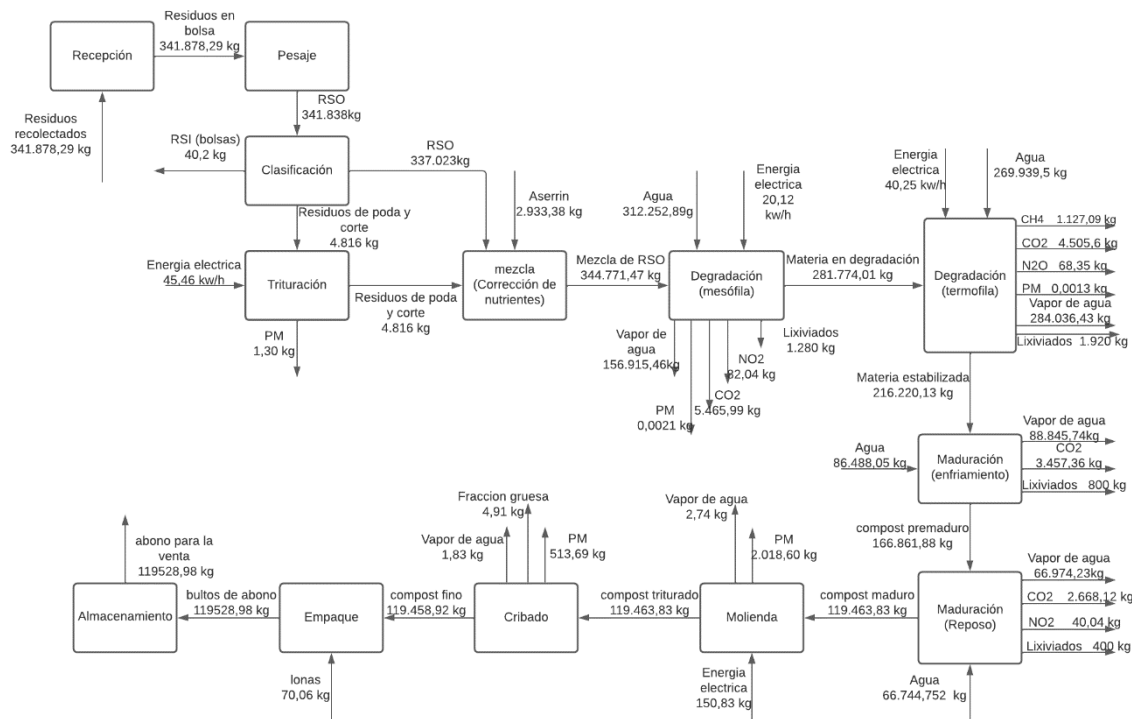
Teniendo claro el proceso por el que va a pasar la materia orgánica hasta la obtención de los bultos de compostaje, se realizó el cálculo de las materias primas e insumos que serán las entradas y salidas del proceso, incluyendo los contaminantes generados. Siendo así, en la **Tabla 19**, se evidencia el aporte de contaminantes por kg de residuo tratado dependiendo la actividad, de esta manera se obtuvo la base de cálculo con la cual se determinaron las cantidades que entran y salen del proceso durante un año, las cuales se evidencian en la **Figura 18**.

Tabla 21. Factores de emisión.

Contaminante/ Operación	Factor de emisión	Unidades
CH ₄	4,00	Kg de CH ₄ /kg en masa de residuos tratados
N ₂ O	0,24	Kg de N ₂ O/kg en masa de residuos tratados
CO ₂	0,01599	Kg de N ₂ O/kg en masa de residuos tratados
PM (tritución)	0,01599	Kg de PM ₁₀ /kg en masa de residuos triturados
PM (molienda)	0,0169	Kg de PM ₁₀ /kg en masa de residuos triturados
PM (cribado)	0,0043	Kg de PM ₁₀ /kg en masa de residuos tamizados

(S. E.I., 2021; Departamento de medio ambiente y ordenación del territorio
gobierno de vasco, 2020).

Figura 20.Diagrama de entradas y salidas.



Elaboración propia.

7.2.5. Estudio Operativo

7.2.5.1. Descripción del cuerpo operativo

El cuerpo operativo con el que contará la planta está compuesto por tres operarios, un auxiliar contable y administrativo, un técnico en servicios generales y un ingeniero ambiental que encabeza este equipo de trabajo. En la **Tabla 20**, se realiza la descripción de las funciones de cada uno de los trabajadores, cabe resaltar que el equipo de trabajo va acorde a la cantidad de residuos que se espera tratar.

Tabla 22.Personal para la planta de compostaje.

Cargo	Descripción
Operarios	La planta de compostaje contará con dos operarios, los cuales realizarán las actividades que van desde la recolección de los residuos hasta el tratamiento de estos, además estarán dispuestos a acatar recomendaciones y observaciones dadas por el ingeniero ambiental para que el proceso de compostaje se realice de la mejor manera.

Auxiliar contable y administrativo	Este trabajador se encargará de la parte económica y administrativa del establecimiento donde se realizará el compostaje, teniendo la contabilidad de todo material, equipo, insumo, pago de servicios, nómina, adicionalmente administrará la venta del compost.
Ingeniero ambiental	Se encargará de hacer seguimiento y control de cada una de las etapas que atraviesan los residuos orgánicos hasta obtener el resultado final, hará las mediciones de oxígeno, temperatura y humedad y tomará las decisiones según sea el caso, permitiendo que el proceso tenga una mejora continua. Además, este tendrá a cargo el personal de la planta y será el mediador entre la situación de la planta y el cuerpo administrativo de la alcaldía.
Técnico en servicios generales	La persona encargada de este cargo hará revisiones y reparaciones de las instalaciones y equipos, garantizando que el proceso del compostaje se realice de manera idónea.

Elaboración propia.

7.2.5.2. Seguridad y salud en el trabajo

Los trabajadores de las plantas de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos pueden estar expuestos a agentes químicos como a agentes biológicos que se producen durante el proceso. Debido a esto se deben tener en cuenta algunos protocolos o medidas de prevención y seguridad al estar dentro y fuera de la planta (López et al., 2016). Dichas medidas se mencionan a continuación (M.T.A.S.E, 2001):

Organización del trabajo

- Establecer procedimientos de trabajo adecuados por cada proceso operativo.
- Reducir el tiempo y el número de trabajadores que puedan estar expuestos a agentes químicos y biológicos que se produzcan durante el proceso.
- Medidas de protección colectiva o cuando no sea posible de protección individual.
- Vigilancia de la salud de los trabajadores.
- Vacunación de los trabajadores expuestos a agentes biológicos.

Medidas higiénicas

- No comer, beber o fumar en el área de trabajo.
- Evitar tocarse los ojos, nariz o boca con los dedos.
- Lavarse las manos antes de comer o fumar.

- Proveer a los trabajadores de dotación y determinar una periodicidad de cambio de estas prendas.
- Implementación de un elemento de protección para evitar la deposición y acumulación de polvo en la cabeza.
- Disponer de zonas de aseo apropiadas y adecuadas para uso de los trabajadores, que incluyan productos para la limpieza ocular y antisépticos para la piel.
- Tiempo para el aseo personal incluido en la jornada laboral (diez minutos antes de la comida y otros diez minutos antes finalizar la jornada).
- Disponer de lugares para guardar la ropa de trabajo separados de la ropa u otras pertenencias personales.
- Disponer de lugares adecuados para guardar los equipos de protección y verificar que estos estén limpios y en buen estado.
- Recomendar a los trabajadores no llevar la ropa y el calzado de trabajo a su domicilio.
- Al salir del área de trabajo, el trabajador deberá quitarse la ropa de trabajo y los equipos de protección personal que puedan estar contaminados por agentes biológicos y deberá guardarlos en lugares que no contengan otras prendas.

Protección individual

- Uso de guantes impermeables en operaciones que impliquen la manipulación de residuos y operaciones de limpieza.
- Uso de mascarillas auto filtrantes apropiadas para evitar la inhalación de partículas de menor tamaño.
- Uso de Gafas ajustadas.

Protección colectiva (Alonso et al., 2010):

- Reducción del polvo en el lugar de trabajo, por medio de una ventilación eficaz y sistemas de extracción localizada.
- Proveer a las cabinas de los vehículos empleados de ventilación a través de filtros que impidan la entrada de microorganismos al interior, así como un adecuado mantenimiento de estos.
- Mantener cerradas las puertas y ventanillas de los vehículos.

7.2.5.3.Ruta de recolección

Para llevar a cabo la recolección de los residuos orgánicos, se determinó mantener la ruta que el municipio ya tiene establecida para la recolección de los residuos sólidos (ver **Figura 19**),

esta fue obtenida por medio de una visita realizada a la oficina de Servicios Públicos del municipio de Macheta (Siatoya A., comunicación personal, octubre 20 del 2020).

Dentro del mapa la línea roja punteada corresponde a la ruta del vehículo recolector, en este caso un camión de carga tipo chana, el cual recoge los residuos orgánicos. Como se puede evidenciar en la **Figura 19** hay espacios dentro del mapa que no cuentan con este símbolo, es decir que el vehículo recolector no pasa por dichas calles, esto se debe a que por factores como pendientes o estado de las vías no permitan la recolección de los residuos, por esta razón los usuarios que se encuentran en estas zonas donde no llega la cobertura, deben llevar los residuos al punto más cercano de recolección o en dado caso a un contenedor.

Para dar a conocer los días y horarios de recolección a los usuarios, se plantea anexar un pequeño cartel informativo al recibo público del agua, adicionalmente, se especificara que los residuos a recolectar son aquellos que no tengan un proceso de cocción. Dicha recolección se hará una vez a la semana el miércoles. Como plan de contingencia a la ruta de recolección establecida, se dispondrán contenedores en puntos específicos para que, en dado caso, los residuos que estén generando molestias en los hogares o espacios comerciales puedan ser depositados en estos puntos específicos.

Los colores establecidos dentro del mapa representan los horarios en que los usuarios deberán previamente dejar los residuos a puertas de su casa o punto más cercano.

Figura 21. Mapa ruta de recolección R.S.O.



(Oficina de servicios públicos Machetá, 2021).

7.2.5.4. Vehículo recolector

Dado que la recolección de los residuos se hará puerta a puerta y una vez a la semana, el vehículo recolector apropiado para realizar esta actividad es una volqueta tipo chana con una capacidad de 8,5 toneladas, la cual cuenta con un sistema mecánico para volcar la carga transportada, además las características de su platón al no ser tan alto, permite que los operarios encargados de la recolección puedan disponer sin mayor esfuerzo las bolsas o canecas que contienen los residuos sólidos orgánicos, por otra parte, el interior del platón de la volqueta contará con un geotextil plastificado el cual evitará el derrame del lixiviado generado por los residuos.

Tabla 23. Número de vehículos requeridos para la recolección.

Vehículo	Volqueta tipo Chana	$N.Vehiculos = \frac{6,6}{8,5} = 0,776$
Capacidad de carga del V.	8,5	
Residuos generados (Ton/Sem)	6,6	

Elaboración propia.

Como se puede evidenciar en la **Tabla 21**, se requiere de un solo vehículo que realice la recolección de los residuos orgánicos acumulados de una semana.

7.2.6. Estudio económico

7.2.6.1. Ingresos

Teniendo en cuenta la producción anual de compost que tendrá la planta, se realizó una proyección a 20 años de funcionamiento. Para determinar el precio sugerido al público por bulto de abono orgánico se investigó en el mercado, el precio actual del abono orgánico permitiendo conocer algunas marcas del mercado y así sacar un promedio del precio de venta que estas (Ver **Tabla 22**).

Para el cálculo del ingreso anual por venta del producto, se tuvo en cuenta la inflación que el banco de la república establece y que tiene como meta para el año presente 2022, “esta meta hace referencia a la inflación de precios al consumidor a fin de cada año, midiendo la variación de doce meses del Índice de Precios al Consumidor (IPC), conociendo así que para el 2022 la meta es del 3%” (Banco De La República, 2022), este porcentaje fue incluido año a año en la proyección de los ingresos por la venta de abono orgánico como se evidencia en la **Tabla 23**.

Tabla 24. Precios de abono orgánico en el mercado.

Marca	(\$/kg)
Fertipec	\$ 979
Tumatera	\$ 1.064
Avisana	\$ 1.230
Promedio	\$ 1.091

(Fertipec,2021; Tumatera,2021; bioagroinsumos, S.F)

Tabla 25.Ingresos por venta de abono orgánico.

INGRESOS PROYECTADOS (venta de abono orgánico)			
Año	# de bultos (40 kg)	Precio (bulto)	Ingresos (\$)
2022	2576	\$43.640	\$112.418.752
2023	2597	\$44.949	\$116.718.067
2024	2617	\$46.298	\$121.174.163
2025	2638	\$47.687	\$125.792.579
2026	2659	\$49.117	\$130.579.043
2027	2679	\$50.591	\$135.539.482
2028	2700	\$52.108	\$140.680.026
2029	2720	\$53.672	\$146.007.017
2030	2741	\$55.282	\$151.527.016
2031	2762	\$56.940	\$157.246.808
2032	2782	\$58.649	\$163.173.413
2033	2803	\$60.408	\$169.314.093
2034	2823	\$62.220	\$175.676.357
2035	2844	\$64.087	\$182.267.974
2036	2865	\$66.009	\$189.096.980
2037	2885	\$67.990	\$196.171.685
2038	2906	\$70.029	\$203.500.685
2039	2927	\$72.130	\$211.092.870
2040	2947	\$74.294	\$218.957.436
2041	2968	\$76.523	\$227.103.892
2042	2988	\$78.819	\$235.542.074

Elaboración propia.

7.2.6.2. Costos de infraestructura

Los costos de construcción se calcularon inicialmente con la búsqueda del valor del terreno, el cual se obtuvo por medio de comunicación personal con habitantes del municipio que se dedican a la compra y venta de finca raíz, estas personas proporcionaron un valor promedio del m2 de tierra dependiendo la ubicación, posteriormente con ayuda de la plataforma CYPE ingenieros, este se

enfoca en generar precios relacionados con arquitectura, ingeniería y construcción. Con base en la anterior búsqueda descrita se elabora la **Tabla 24**, que permite evidenciar los costos por construcción que tendría el proyecto:

Tabla 26. Costos de construcción.

Costos de construcción	valor (\$)
Terreno	\$209.000.000
Materia prima e insumos de construcción	\$273.761.501
Mano de obra	\$23.962.408
Total	\$506.723.909

(CYPE Ingenieros,2021; SIROC,2020).

Dentro de los costos de construcción se contemplan el adecuamiento de las instalaciones según las medias de protección personal y colectiva que se estipulan en el estudio operativo.

7.2.6.3.Costos de maquinaria y equipo

La **Tabla 25** se elaboró en función del procedimiento para la elaboración de compostaje por aireación forzada, se tuvo en cuenta cada proceso unitario y se extrajo el requerimiento de maquinaria y equipo.

Tabla 27. Costos por maquinaria y equipo.

Maquinaria y equipo/cantidades	Equipo requerido	Costo
Machete	1	\$19.000
pH-metro	1	\$40.000
medidor de presión	2	\$78.000
Carretilla	2	\$84.800
Criba	1	\$100.000
Termómetro	1	\$105.000
Palas	4	\$169.600
Manguera	1	\$189.000
Higrómetro	1	\$209.141
Dotación	5	\$219.000
Regulador de aire	2	\$240.000

Báscula	1	\$400.000
Medidor multiparámetro oxígeno	1	\$550.000
Moto ventilador	2	\$2.050.552
Triturador	2	\$4.000.000
Estibas	50	\$4.500.000
Camión recolector	1	\$96.500.000
Total		\$109.454.093

Elaboración propia con valores estimados con los costos en las páginas: Mercado libre, Alibaba, Herpon.

7.2.6.4. Costos asociados a nómina

Conociendo el proceso que se lleva a cabo en la planta de compostaje y su capacidad de producción, se determinó el personal requerido, tanto operacional como administrativo. Se buscó por medio de la página indeed el salario promedio vigente para el 2022 que devengará cada uno de los trabajadores, lo anteriormente descrito se encuentra en la **Tabla 26**.

Tabla 28. Nómina del personal.

Cargo	Cantidad	Turno (Horas)	Salario 2022 (COP)	Valor anual 2022 (COP)
Operarios	2	8	\$ 1.014.980	\$ 24.359.620
auxiliar contable y administrativo	1	8	\$ 1.060.018	\$ 12.720.216
Ingeniero Ambiental	1	4	\$ 1.093.700	\$ 13.124.880
Técnico en servicios generales	1	8	\$ 1.014.980	\$ 12.179.760
			Total, anual (COP)	\$ 62.384.376

Elaboración propia con información de (Indeed, 2022).

7.2.6.5. Costos asociados a servicios

Para determinar el costo de los servicios públicos de agua y energía eléctrica, se tomaron en cuenta los valores de consumo y gasto que tiene la planta de compostaje. Para el servicio de agua se sumaron los consumos que tiene el proceso, lavado de vehículo recolector, lavado de áreas

e instrumentos y baños; para el servicio de energía se tuvo el consumo de electricidad que tienen los equipos de la planta teniendo en cuanto a las horas de funcionamiento según sea el proceso y todo lo relacionado con iluminación, incluyendo el equipo de cómputo, conectores y alumbrado público; un servicio adicional que se tuvo en cuenta fue el de internet.

Según la producción anual de compostaje se determinaron dichos consumos, el precio de m³ de agua es sugerido por la oficina de servicios públicos domiciliarios, el precio del kwh de energía gastada es dado por la empresa Codensa.

Para determinar el valor a pagar de cada año se incluyó la inflación, la cual “es del 3% para el año 2022” (Banco De La República, 2022). Lo mencionado anteriormente se expresa en la **Tabla 27**.

Tabla 29. Costos por servicios.

Año	Costo servicio agua (m3/año)	Costo servicio energía eléctrica (KW/año)	Pago total servicios
2022	\$ 1.267.642	\$ 2.826.226	\$ 4.153.868
2023	\$ 1.277.823	\$ 2.848.864	\$ 4.188.486
2024	\$ 1.287.977	\$ 2.871.501	\$ 4.223.078
2025	\$ 1.298.131	\$ 2.894.139	\$ 4.257.669
2026	\$ 1.308.284	\$ 2.916.777	\$ 4.292.261
2027	\$ 1.318.438	\$ 2.939.414	\$ 4.326.852
2028	\$ 1.328.592	\$ 2.962.052	\$ 4.361.444
2029	\$ 1.338.746	\$ 2.984.690	\$ 4.396.036
2030	\$ 1.348.900	\$ 3.007.327	\$ 4.430.627
2031	\$ 1.359.054	\$ 3.029.965	\$ 4.465.219
2032	\$ 1.369.207	\$ 3.052.603	\$ 4.499.810
2033	\$ 1.379.361	\$ 3.075.240	\$ 4.534.402
2034	\$ 1.389.515	\$ 3.097.878	\$ 4.568.993
2035	\$ 1.399.669	\$ 3.120.516	\$ 4.603.585
2036	\$ 1.409.823	\$ 3.143.153	\$ 4.638.176
2037	\$ 1.419.977	\$ 3.165.791	\$ 4.672.768
2038	\$ 1.430.131	\$ 3.188.429	\$ 4.707.359
2039	\$ 1.440.284	\$ 3.211.066	\$ 4.741.951
2040	\$ 1.450.438	\$ 3.233.704	\$ 4.776.542
2041	\$ 1.460.592	\$ 3.256.342	\$ 4.811.134
2042	\$ 1.470.746	\$ 3.278.979	\$ 4.845.725

Elaboración propia

7.2.6.6.Relación costo beneficio

Para el cálculo de la relación costo beneficio se tomó como referencia la resolución CRA 720 de 2015, en donde se estipula el costo promedio por disposición final que deben pagar los usuarios suscritos por tonelada de residuo que se disponga en el relleno sanitario Nuevo Mondoñedo. En función de las proyecciones de residuos y conociendo que la contribución de materia orgánica es el 59,9% del total de los residuos generados en el municipio, si se aprovecha los residuos por medio de la planta de compostaje consecuentemente la cantidad de residuos que el municipio aporta al relleno sanitario disminuiría en un 60% al igual que el costo que se paga por el servicio (Ver *tabla 28*).

Tabla 30. Costos por servicios.

Año	Producción total de residuos (Ton/año)	Cantidad correspondiente a los residuos orgánicos (Ton/año)	Ton/año		
			Costo para reconocer por disposición final (\$)	Costo para disminuir por hacer aprovechamiento de RSO (\$)	Costo total para reconocer por disposición final haciendo aprovechamiento de los RSO (\$)
2022	491,9	294,638	\$11.264.682	\$6.747.313	\$4.517.369
2023	495,8	296,998	\$11.354.008	\$6.801.367	\$4.552.641
2024	499,8	299,358	\$11.445.609	\$6.855.412	\$4.590.198
2025	503,7	301,718	\$11.534.921	\$6.909.456	\$4.625.464
2026	507,6	304,078	\$11.624.232	\$6.963.501	\$4.660.731
2027	511,6	306,438	\$11.715.834	\$7.017.546	\$4.698.288
2028	515,5	308,798	\$11.805.145	\$7.071.591	\$4.733.554
2029	519,5	311,158	\$11.896.747	\$7.125.636	\$4.771.111
2030	523,4	313,518	\$11.986.058	\$7.179.681	\$4.806.377
2031	527,3	315,878	\$12.075.370	\$7.233.726	\$4.841.644
2032	531,3	318,238	\$12.166.971	\$7.287.771	\$4.879.201
2033	535,2	320,598	\$12.256.283	\$7.341.816	\$4.914.467
2034	539,2	322,958	\$12.347.884	\$7.395.861	\$4.952.024
2035	543,1	325,318	\$12.437.196	\$7.449.905	\$4.987.290
2036	547	327,678	\$12.526.507	\$7.503.950	\$5.022.557
2037	551	330,038	\$12.618.109	\$7.557.995	\$5.060.113
2038	554,9	332,398	\$12.707.420	\$7.612.040	\$5.095.380
2039	558,9	334,758	\$12.799.022	\$7.666.085	\$5.132.937
2040	562,8	337,118	\$12.888.333	\$7.720.130	\$5.168.203
2041	566,7	339,478	\$12.977.645	\$7.774.175	\$5.203.470
2042	570,7	341,838	\$13.069.246	\$7.828.220	\$5.241.026

Elaboración propia.

7.2.6.7. Indicadores de valor presente Neto y tasa interna de retorno

El Valor Presente Neto al ser un indicador de inversión, que permite evidenciar en qué año se recupera la inversión inicial del proyecto, como se muestra en la **Tabla 31**, este tiempo de retorno de la inversión es de 6 años aproximadamente, donde a partir del año 2028 los ingresos a la planta por la venta de compostaje serán ganancias para el proyecto.

Tabla 32. Valor presente neto.

AÑO	VPN
2022	- \$513.041.532
2023	- \$414.802.271
2024	- \$321.233.584
2025	- \$232.118.949
2026	- \$147.251.531
2027	- \$66.433.766
2028	\$10.523.026
2029	\$83.799.025
2030	\$153.566.272
2031	\$219.989.023
2032	\$283.224.081
2033	\$343.421.120
2034	\$400.722.997
2035	\$455.266.044
2036	\$507.180.358
2037	\$556.590.074
2038	\$603.613.624
2039	\$648.363.991
2040	\$690.948.950
2041	\$731.471.300
2042	\$770.029.081

Elaboración propia.

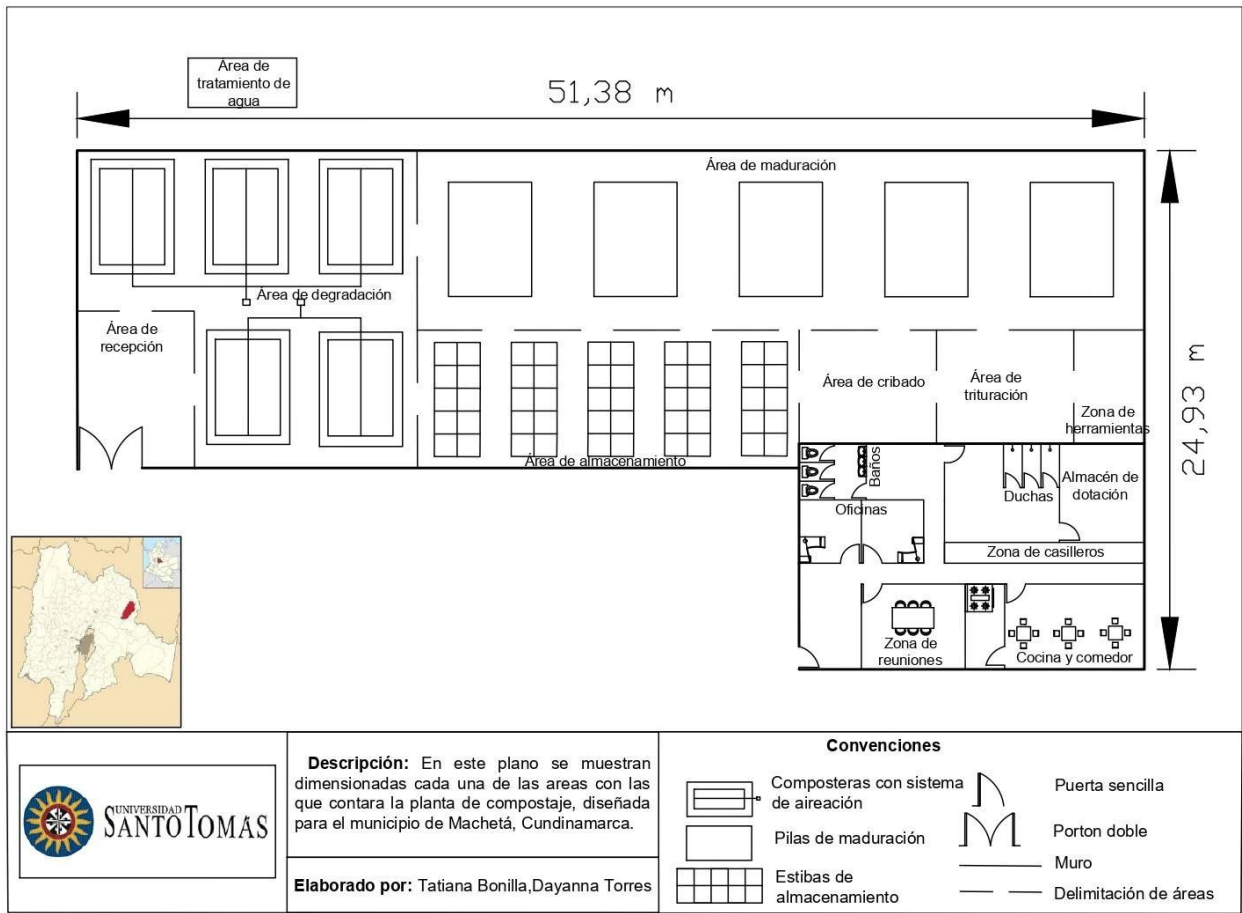
La tasa interna de retorno (TIR), al ser una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para comparar la factibilidad de diferentes opciones de inversión (Puga, 2019). Esta se usó para evidenciar que el proyecto tiene un alto porcentaje de beneficio, ya que este indicador se encuentra en un 11% de rentabilidad sobre la inversión del proyecto, esto quiere decir que son mayores los beneficios de este proyecto en función del flujo de caja. También es importante resaltar que el valor de la TIR es inversamente proporcional a la probabilidad de pérdidas en el proyecto, es decir, que entre mayor sea la TIR el riesgo de pérdida es menor.

Es por esto que se afirma, que realizar una inversión en el proyecto garantiza la recuperación de la inversión inicial y se asegura un porcentaje de ganancia a lo largo del proyecto, con poca probabilidad de perdidas.

7.3.Dimensionamiento de la planta de compostaje

Para el dimensionamiento de esta planta se realiza la recopilación de toda la información anteriormente descrita, de este modo se plasma en la **Figura 20**, la distribución de áreas de: recepción, degradación, maduración, molienda, cribado, almacenamiento y zonas de oficina y aseo, también se incluye dentro del plano la zona de ubicación del tanque séptico y zona de parqueadero para realizar diferentes maniobras de la volqueta recolectora.

Figura 22.Dimensionamiento planta de compostaje Macheta-Cundinamarca.



Elaboración propia

Como se puede evidenciar en la **Figura 20**, cada una de las áreas corresponde a una etapa del proceso productivo, las cuales se explican a continuación:

- **Área de recepción:** en esta área el vehículo recolector ingresa para descargar los residuos recolectados, aquí mismo se le retiran los empaques donde vienen contenidos, posteriormente los residuos serán pesados y llevados a trituración para disminuir el tamaño de la partícula. Una vez triturados, se realiza la corrección de nutrientes mediante una mezcla con aserrín. Por último, con ayuda de carretillas se transportará a la siguiente área.
- **Área de degradación:** esta área se constituye por cinco pilas contenidas en composteras, que cuentan con una red de distribución de aire con ventilación forzada, donde están dispuestos los residuos provenientes de la etapa de recepción que durarán aproximadamente un mes, donde se realiza el proceso de degradación de la materia orgánica, pasando así por dos etapas principales, la etapa mesófila y la etapa termófila.
- **Área de maduración:** esta área está formada por cinco pilas no contenidas, de igual tamaño que las pilas de degradación, con la única diferencia es que su área de espaciamiento es más grande, ya que al no estar contenida el material suele desbordarse, los residuos son llevados a esta área con fines de enfriamiento y de reposo durante un mes, para así obtener un compost maduro.
- **Área de molienda:** al obtener el compostaje maduro, el material es llevado a un triturador, el cual homogeneiza la textura y el tamaño del material, para así dar paso a la siguiente etapa.
- **Área de cribado:** en esta área se instalará una criba con las dimensiones descritas dentro del proceso, esta criba estará sujeta de techo a piso con una inclinación de 65°, de manera que le permita al operario tomar el material resultante de la molienda y de esta forma separar aquellos residuos de mayor tamaño que no están acorde con el resto de material. Posteriormente, el material cribado será empacado y pesado en bultos de 40Kg.
- **Área almacenamiento:** esta área cuenta con cinco bloques de estibas con una capacidad de almacenamiento para cuatro meses, en esta se encontrarán los bultos de 40Kg que serán reservados para posteriormente ser comercializados.
- **Área de tratamiento de agua residual:** aquí se encontrará la zona donde estará situado el tanque séptico con su trampa de grasas y el filtro de flujo ascendente para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la planta.
- **Área de oficinas:** el área de oficinas estará dispuesta para el uso de todo el personal, está diseñada con el fin de suplir las necesidades de los empleados, de manera que cuenta con áreas para su alimentación como lo es el casino, también tiene dispuesto un área de limpieza como lo son los baños y las duchas, se incluye una zona de casilleros para guardar los elementos personales de cada trabajador, no obstante, cuenta con oficinas para el personal administrativo y el ingeniero.

8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Un sistema de aprovechamiento como este serviría como incentivo social, ya que motivaría a la población a hacer una mejor separación en la fuente, lo cual facilita la labor de los recolectores, además fomentaría la educación de la cultura ciudadana enfocada hacia el cuidado del medio ambiente, donde todos se interesarán por el cuidado de este bien común. Además, desde un enfoque educativo se podría inculcar un valor de pertinencia social, desde niveles de educación primaria, hasta los niveles más altos de escolaridad, permitiendo que los estudiantes conozcan el proceso de compostaje y los beneficios que trae esta actividad. Por otro lado, los cultivadores que implementen dichos productos en los suelos también se verían beneficiados, ya que de una manera orgánica estarían mejorando las propiedades del suelo y así mismo la productividad de los cultivos, añadido a esto la salud pública se vería favorecida de manera que se reduciría la propagación de vectores, malos olores dados por la mala gestión de los residuos.

9. CONCLUSIONES

- ❖ Con base en la lista de chequeo y la revisión del PGIRS- 2021 del municipio, se encontró con un diagnóstico, donde se puede observar que no se cuenta con actividades de manejo ni aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, siendo estos un porcentaje significativo sobre la generación total de residuos del municipio.
- ❖ Por medio de la encuesta se logró identificar que la población, ve como necesidad generar un aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos y que así mismo estarían dispuestos a realizar las actividades pertinentes que este proceso requiere, ya que este proceso trae consigo beneficios no solo ambientales sino económicos y sociales, afianzando y fortaleciendo las dinámicas de aprovechamiento de residuos en el municipio de Machetá.
- ❖ Frente a la comparación de los sistemas de aireación mixta y forzada, que obtuvieron igual puntaje en la matriz de decisión, fue pertinente elegir el sistema de aireación forzada, ya que, a pesar de su alto costo, esta permite una optimización en el tiempo de procesamiento y la disminución en la generación de lixiviados que finalmente se convierte en una problemática de contaminación en cuerpos hídricos aumentando su complejidad y el costo de tratamiento de las aguas residuales. No obstante, el dimensionamiento de la planta se diseñó optimizando la mayor cantidad de espacio, para no incurrir en mayores gastos en construcción y mano de obra, así mismo, le brinda a la planta un aspecto de origen y limpieza, reduciendo el riesgo de presencia vectores.
- ❖ El estudio económico demostró que la ejecución de este proyecto es viable, ya que el indicador de rentabilidad TIR, que compara el valor actual de los gastos con los ingresos que se han proyectado a los 20 años de funcionamiento de la planta de compostaje, da un valor del 11% lo cual refiere a que es seguro realizar inversión, así mismo el VPN demostró que en 6 años se retorna la inversión inicial y a partir de este año se empiezan a generar las

ganancias. Además, con la relación costo beneficio se logró resaltar que el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos disminuye en un 60% al año los costos que el municipio debe pagar al relleno sanitario Nuevo Mondoñedo, por la disposición de los residuos, así mismo se reduce las emisiones contaminantes provocadas de los residuos dentro del relleno sanitario.

- ❖ Como resultado final, se obtuvo el dimensionamiento de la planta de compostaje aerobio para residuos sólidos orgánicos en el municipio de Macheta-Cundinamarca, en la cual se puede evidenciar cada proceso y su interacción en función de la distribución de áreas. Esta planta está dimensionada a escala real para una proyección de residuos a 20 años.

10. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda el diseño y la implementación de biofiltros dentro de las pilas para que se pueda disminuir la generación de gases contaminantes producidos por la degradación de la materia orgánica.
- ❖ La implementación de sistemas de recuperación de gases en el proceso de degradación del compostaje y la generación de gases por parte del tanque séptico es una alternativa de generación de energía sostenible dentro de la planta, la cual puede ser evaluado a futuro.
- ❖ Es necesario educar y capacitar constantemente a la población y a los operadores de la planta sobre el aprovechamiento y los beneficios que conlleva el tratamiento de los residuos desde lo social, lo económico y lo ambiental, creando así en ellos un hábito de responsabilidad ambiental.
- ❖ Como método de educación ambiental, se recomienda hacer recorridos por la planta, donde se informe y se eduque sobre el proceso de compostaje aerobio que se lleva a cabo en la planta y así generar ingresos económicos a la planta.
- ❖ Realizar un estudio de mercado con el fin de ampliar los compradores potenciales del abono orgánico, si estos pertenecen a la zona de influencia de Macheta o si se deben buscar nuevos canales de venta y distribución, lo cual influiría en el precio del producto.
- ❖ Es pertinente que se realice una revisión mas detallada en como la dirección del viento influye sobre la ubicación propuesta de la planta de compostaje, de esta manera poder evitar problemáticas futuras por afectación a la población.

11. REFERENCIAS

- Adarraga J., Aguas D., Molina E. y Penagos J. (2011). Rev. Uni. Ingeniare: Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido. DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.11.643>
- Agencia de Residuos de Cataluña (2016). *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje*. Cataluña. ARC. https://residus.gencat.cat/web/.content/home/agencia/publicacions/form/GuiaPC_web_E_S.pdf
- Alcaldía de Machetá (2021). *Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos – PGIRS - del municipio de Machetá Cundinamarca* [Archivo]. Machetá.
- Alcaldía mayor de Bogotá secretaría distrital de hábitat (2007). *Guía Técnica Para El Aprovechamiento De Residuos Orgánicos A Través De Metodologías De Compostaje Y Lombricultura Hábitat*. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf
- Baca Urbina G. (2012) *Evaluación de proyectos*. https://www.academia.edu/13450952/Evaluacion_de_Proyectos_6ta_ed_Gabriel_Baca_Urbina
- Banco de la República. (Feb. 2022). *Inflación total y meta*. <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>
- Barradas A. (2009). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales*. Estado de Arte. [Tesis de pregrado, Universidad politécnica de Madrid]. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/gestion-integral-de-residuos-solidos-municipales-estado-del-arte>
- Behrentz E. y Giraldo E. (2012). *Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio, en pila estática y con aireación forzada desarrollo teórico de 63 implementación de laboratorio*. Revista colombiana de biotecnología. [Revista indexada]. Colombia. (Pag.72-90). <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/30052/30251>

- Benavides C., (2018). *Levantamiento topográfico de un área total de 2.200 mts y topobatimetría de la quebrada el molino y tres lagunas de la PTAR del municipio de Macheta, departamento de Cundinamarca* [Archivo]. Machetá
- Benavides, R. J. (2017). *Diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica para la producción inteligente de abono orgánico*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja]. Ecuador. <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/16998>
- Brown, G. (2000). Manual de reciclaje, compostaje y lombricompostaje. *Acta Zoológica Mexicana, Rev. Cie. Scielo*. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php>
- Bueno P., Cabrera F. y Diaz J., (2008). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Universidad de Huelva. Sevilla.
- Cano A., Gálvez R., González N., López M. y Ocampo S. (2008). Estudio Técnico. Elemento indispensable en la evaluación de proyectos de inversión
- Castañeda Torres S, Rodríguez Miranda J.P. (2017). Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia. *Rev. Univ. Salud*. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171901.75>.
- Castells X. E. (2012). Aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales: reciclaje de residuos industriales. Editorial: Diaz de Santos. Madrid.
- Celade M. d., (1987). Técnicas de proyección de población de áreas menores aplicación y evaluación.
- Chandler, Cintia, Ferrer, José, Mármol, Zulay, Páez, Gisela, & Ramones, Eduardo, & Perozo, Rocendy (2008). Efecto de la aireación en el compostaje del bagacillo de la caña de azúcar. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90480103>
- Chaparro Urrutia, J. (2013). Evaluación de la biodegradación de residuos sólidos ganaderos tratados mediante pilas de compostaje.
- Chávez Porras, Á, Rodríguez González, A., (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia Y Virtualidad*, 9(2), 90-107. <https://10.18359/ravi.2004>
- Comisión para la Cooperación Ambiental, (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte. Montreal. Library and Archives Canada: <https://978-2-89700-232-9>
- CORANTIOQUIA. (2010). Cartilla técnica de compostaje. Medellín.

- Corporación Autónoma Regional CAR, (2018). Abono orgánico que sale de nuestras vidas. Disponible en Internet: <https://www.car.gov.co/saladeprensa/abono-organico-que-sale-de-nuestras-vida>
- CYPE Ingenieros S.A. (2022). Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A. http://www.colombia.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/
- Del Carmen C., (2002) “Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje”. Memoria de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Chile.
- Echeverría, C. (2017). Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto.4 (No 13. No. 2. 2017, 172-188), 181,184,185. https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/836/pdf_604
- Ecoinventos, (2019). Innovadora tecnología para facilitar el compostaje de residuos orgánicos.
- Empresa de servicios públicos Cajicá. (2019). Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo RSNM.
- EMSER. (2015). Proyección de la población. Tolima.
- Estrella D., (2021). Estudio de factibilidad operativa, técnica y económica para el aprovechamiento de residuos orgánicos en el casco urbano del municipio de Ricaurte – Cundinamarca. Universidad Santo Tomas, Repositorio universitario. Bogotá.
- Garzón Marín, G., Montenegro Riveros, E. P., López Botía, F. (2005). Uso de aserrín y acículas como sustrato de germinación y crecimiento. Colombia Forestal.
- Huerta O, López M, Soliva M, Zaloña M. 2008. Compostaje de Residuos Municipales–Control del proceso, rendimiento y calidad del producto. Agencia de Residus de Catalunya. CD.
- Isaza Arias GC, P. M. (2009). Comparison of two ventilation techniques in the decomposition of organic matter. Universidad y Ciencia Trópico Húmedo.
- Jaramillo Henao, G. y Zapata Márquez, L.A. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Universidad de Antioquia.
- Jarre Castro, E. J., y OtaSalavent, E. (2017). Planta de compostaje de RSU y residuos cítricos industriales.
- Jeris J.S., Regan R.W. (1973). Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting. Part II, Compost Sci. 14 (March-April): 8-15.
- Kulcu, R. and Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. Biores. Technol.

- López Villalobos, I. D., Muñoz, A. M. y Muñoz, M. (2016). Riesgos biológico y químico en planta de compostaje de ingenio azucarero, Valle del Cauca. Colombia. vol. 2 Institución Universitaria Antonio José Camacho.
- Luna R. y Chaves D. (2001). Guía para elaborar estudios de factibilidad de proyectos ecoturísticos.
- Madejón E., Díaz M.J., López R. and Cabrera F. (2001). Co-composting of sugar beet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Biores. Technol.*
- Marmolejo L. F., Oviedo E. R. y Torres P. (2016). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *lecciones de Colombia. Ingeniería Investigación Y Tecnología*, XVIII (1), 12.
- Meteoblue. (s.f.). Tiempo Macheta. Obtenido de:
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/machet%C3%A1_colombia_3675757
- Meter. M. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. Vol. 7(Pag 67-85).
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2012). Manual de compostaje. Secretaría General Técnica.
- Ministerio de trabajo y asuntos sociales España, 2001. NTP 597: Plantas de compostaje para el tratamiento de residuos: riesgos higiénicos. España.
- Monroy Felipe, A. y Prada, Liliana, L. (2019). Optimización del proceso de compostaje para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el parque Jaime Duque ubicado en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca.
- Muñoz A. y Cotacio J. (2015). Evaluación de diferentes tiempos de ventilación en compostaje utilizando un sistema de inyección de aire a presión en una finca la Rejoya. Universidad del Cauca.
- Nº 010, 2011. Acuerdo [Por medio de la cual se adopta el esquema de ordenamiento territorial, se aprueba en toda su extensión el documento técnico de soporte y los planos generales]. 30 de octubre de 2011.
- Nº 450, 2018. Concepto [superintendencia de servicios públicos domiciliarios]. 25 de junio del 2018.

- Nº 908, 2021. Resolución [Por medio de la cual se corrige y modifica parcialmente la Resolución No. 0635 de 2021, del Programa de Promoción de Acceso a la Vivienda]. 29 de abril del 2021.
- Núñez Jiménez E. (2005). Guía para la preparación de proyectos de servicios públicos municipales. Instituto Nacional De Administración Pública. Pag 232.
- Ordoñez Guzmán, C. (2019). Panorama de los abonos orgánicos en Colombia. Oportunidades y desafíos 2012-2020. Bogotá: ASOCOMPOST. Grupo Monteverde.
- Páez, O (2021). OPA Natura. Obtenido de <https://opanatura.com/sistemas-de-compostaje-y-su-clasificacion/>
- Puga Muñoz M., (2019). *Fundamentos Básicos de Finanzas*, VAN y TIR. Universidad Arturo Prat. Chile.
- Ramos, A. (2009). Cálculo del tamaño óptimo de las muestras.
- Reglamento técnico de saneamiento título F, [RAS]. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2000. (Colombia).
- Rentería R. I. (2013). Diseño y modelado de un reactor tubular de lecho empacado para la desinfección de biosólidos durante el compostaje. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.
- Rodríguez Gutiérrez, L. (2019, Nov 30,). La generación de residuos orgánicos en Cundinamarca y sus mecanismos de aprovechamiento en la generación de energías limpias.
- Román, P., Martínez, M.M., y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje de agricultores. Santiago de Chile.
- Romero Rojas, S. (2012). Estudio de factibilidad de la implementación de una planta municipal de compostaje para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para el municipio de une, Cundinamarca. U. Santo Tomas. Bogotá
- Sepúlveda, L. & Alvarado, J. (2013). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el valle de Aburrá (1.a ed.). Medellín: Acodal, seccional Noroccidente.
- SIROC. (2020). Costos de mano de obra por metro cuadrado 2020 - SIROC IMSS - Servicio Integral de Registro de Obras de Construcción - PAL Group.
<https://sirocmss.com/2020/03/04/costos-de-mano-de-obra-2020>
- Sistema Español de Inventario (2021). Metodologías de estimación de emisiones. España.

SMARTCOMPO (2019). Valorización de subproductos orgánicos.

Superintendencia de servicios domiciliarios (2008). Diagnóstico Sectorial de Plantas de Aprovechamiento de Residuos Sólidos. Sectorial. Bogotá: Documento de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Colombia; Report. No.: <http://www.superservicios.gov.co/>

Tortosa G. (2015). Sistemas de compostaje. Recuperado de: <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>

Valverde, V. (2015). Diseño y automatización de un sistema de aireación forzada para el co-compostaje de residuos hortícolas en la comunidad de Gatazo Cantón Colta. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4861/1/96T00334>

Windfinder. (s.f.). Previsiones del viento. Obtenido de: https://es.windfinder.com/forecast/macheta_cundinamarca_colombia/birdseye

Zuluaga, C. (2007). 08 capítulo 4: Compostaje 1. IDEAM.

Zurcan V. (2010). *Estudio experimental en planta piloto del proceso de co-compostaje de residuos agroalimentarios*. Uruguay: Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo.

12. ANEXOS

Empresa prestadora del servicio de Aseo: Empresas públicas de Cundinamarca S.A. E.S.P.						
Lista de chequeo: requisitos normativos de la prestación del servicio público de aseo y aprovechamiento para el municipio de Macheta.						
REQUISITO			CUMPL E			OBSERVACIONES
			S I	N O	N/ A	
Requisitos mínimos de PGIRS						
1	Se incluye la descripción de la organización municipal para la elaboración del PGIRS		x			El PGIRS del municipio de macheta no cuenta con un análisis de brechas
2	Dentro del diagnóstico se incluye las condiciones actuales técnicas, financieras, institucionales, ambientales y socioeconómicas de la entidad territorial en relación con la generación y manejo de los residuos producidos.		x			Cumple en su totalidad
3	Contiene proyecciones demográficas, de generación de residuos, de zonas de expansión urbana y de usos del suelo.		x			No se evidencia información frente a expansión y usos del suelo
4	Los objetivos y metas generales están conciliados con las políticas definidas por el Gobierno Nacional y la autoridad ambiental respectiva.		x			Cumple en su totalidad
5	Los objetivos y metas específicas están definidas a través de programas.		x			Cumple en su totalidad
6	Cuanta con análisis y selección de alternativas soportada en estudios de prefactibilidad y factibilidad			x		No se evidencia información frente a la prefactibilidad y factibilidad de estudios

7	Dentro de la Estructuración del Plan: ▪Se encuentran Proyectos específicos, los cuales conforman los programas, que incluyan una descripción del resultado esperado, las actividades a realizar, cronograma de ejecución, presupuesto, duración y responsables. ▪ Presupuesto y Plan de Inversiones de cada programa que conforma el PGIRS ▪ Plan financiero viable.	x			Cumple en su totalidad
8	Posee plan de contingencias	x			Cuentan con plan de contingencia actualizado y en vigencia hasta el 2031
9	Contiene mecanismos para la implementación, actualización, seguimiento y control del PGIRS	x			Se evidencia en el cronograma la estipulación de informes mensuales frente al seguimiento y control del programa
10	La revisión del PGIRS se debe hacer al inicio del periodo constitucional del alcalde municipal o distrital, la cual podrá dar lugar a su actualización (Res. 754 de 2014, Núm.8)	x			Cumple con los tiempos estipulados siendo esta la segunda actualización después de la realizada en el año 2015, 5 años atrás y siendo evidente la falta de programas y acciones relacionadas a la buena disposición de residuos sólidos
Requisitos de recolección					
11	La empresa presta un servicio eficiente a toda la población con continuidad, calidad y cobertura (Decreto 2981 de 2013, Art. 3, 4, 5, 6, 7 y 8.)	x			El servicio de aseo municipal presta un servicio continuo, pero presenta falencias frente a la calidad con la que tratan los residuos y la cobertura del servicio es bastante deficiente ya que este solo cubre el 11% de la zona rural del municipio
12	La empresa prestadora del servicio de aseo formuló e implementó el programa para la Prestación del Servicio acorde con el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos municipal según el caso, la regulación vigente	x			En el PGIRS se estipula rutas y puntos de recolección, frecuencia y transporte

1 3	La empresa prestadora del servicio de aseo realiza actividades complementarias de transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de tales residuos.	x		Realizan la actividad de transporte hasta la disposición final, frente al tratamiento y aprovechamiento este solo se realiza con material reciclado como actividad informal
1 4	La empresa prestadora del servicio de aseo incluye las actividades complementarias de corte de césped y poda de árboles ubicados en las vías y áreas públicas; de lavado de estas áreas, transferencia, tratamiento y aprovechamiento de los residuos de estas.	x		Únicamente realiza actividades de corte de césped, poda de árboles ubicados en las vías y limpieza áreas públicas (no en todas las zonas del municipio), añadido a esto cuenta con un programa de recuperación para residuos aprovechables
1 5	La empresa prestadora del servicio de aseo garantiza la participación de los usuarios en la gestión y fiscalización de la prestación del servicio, desarrollando una cultura de la no basura; fomentando el aprovechamiento; minimizar y mitigar el impacto en la salud y en el ambiente que se pueda causar por la generación de los residuos sólidos. (Decreto 2981 de 2013, Art. 9).	x		El municipio cuenta con diferentes estrategias para la educación e información de programas que incentivan a la reutilización, reciclaje y a la no generación de residuos
1 6	El municipio de macheta en conjunto con la empresa prestadora del servicio de aseo adapta en su respectivo plan de gestión integral de residuos sólidos [PGIRS], una economía de escala en función de las variables establecida en el Decreto 2981 de 2013, Art. 10.	x		Cumple en su totalidad
1 7	Los usuarios del servicio público de aseo cumplen con las obligaciones y requisitos establecidas en la normativa vigente, incluyendo también las obligaciones de las autoridades sanitarias. (Decreto 2981 de 2013, Art. 17. ítems del 1 al 7, Art. 18, 19, 20 y Parágrafos del 1° al 4°).	x		Cumple en gran medida con la normativa vigente, pero no cumple requisitos como programas de aprovechamiento de residuos, mantener registrados y asegurados recicladores de oficio y la cobertura del servicio de aseo en la totalidad del municipio
1 8	El municipio en conjunto con la empresa prestadora del servicio de aseo implementó estrategias de aprovechamiento dentro del plan de gestión integral de residuos sólidos [PGIRS].	x		Se evidencia estrategias de aprovechamiento para plástico, cartón y materiales reutilizables, pero no para residuos orgánicos.

19	Si la anterior respuesta es afirmativa, entonces la empresa prestadora del servicio de aseo realiza la recolección de los residuos de forma separada con forma a las estrategias de aprovechamiento de los residuos, así como se especifica en el (Decreto 2981 de 2013, Art. 27, 29.)	x			La recolección para plástico, cartón y materiales reutilizables lo realiza la asociación de recicladores machetunos los cuales están a cargo de la iniciativa contratados por medio de la alcaldía
20	La recolección se efectúa según horarios y frecuencias en las macro rutas y micro rutas establecidas previamente en el programa de prestación del servicio, las cuales deberán se socializaron previamente con los usuarios. (Decreto 2981 de 2013, Art. 33, 34, 35 y 36.)	x			Cumple en su totalidad
21	La empresa prestadora se servicio de asea cuenta con un programa de aprovechamiento para los residuos de actividades complementarias como la poda de árboles y corte de césped	x			Cumple en su totalidad
22	La empresa prestadora del servicio de aseo cuenta con unas bases de operación que cumpla con las características establecidas en el Decreto 2981 de 2013, Art. 51, parágrafo 1° y 2°.	x			Cumple en su totalidad
Requisitos para el aprovechamiento					
23	La empresa prestadora del servicio de aseo municipal se encarga de las actividades de recolección, transporte y separación de residuos sólidos que serán sometidos a procesos de reutilización, reciclaje o incineración con fines de generación de energía, compostaje, lombricultura o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales, sociales y/o económicos en el marco de la Gestión Integral de los Residuos	x			El municipio de Machetá únicamente cuenta con una iniciativa de recolección de material reciclable, los cuales son vendidos por los recolectores de oficio a terceros para llevar a cabo su tratamiento
24	Los productos a los que se le realiza un tipo de aprovechamiento son materia prima secundaria con valor comercial, considerada como insumo o subproducto para otros procesos productivos, sujeta a las condiciones de oferta y demanda del mercado.	x			Se estipula como responsabilidad de terceros

	El destino de esta materia prima de manera directa o como resultado de otro proceso, son valorizados, ya sea para la agronomía, producción de energía o insumo industrial.	x		Se estipula como responsabilidad de terceros
	Se realiza la clasificación del residuo aprovechable en función de las tecnologías existentes para el tratamiento generando así un valor agregado y un mercado para los productos obtenidos.	x		Se ha concientizado he informado a la comunidad frente a la clasificación, pero no se comercializa
2 5	La determinación del aprovechamiento de los residuos se encuentra dentro del marco de los planes de gestión de residuos sólidos (PGIRS).	x		Se estipula como responsabilidad de terceros
	Al realizar el aprovechamiento se integran los generadores, los transformadores y los consumidores para promover e incentivar las partes de manera que sirva como instrumentos económicos considerando el ciclo de vida. (Título F, RAS, Capítulo 5., 5.1., D)		x	
2 6	Los recicladores de oficio son reconocidos y vinculados formalmente en las actividades relacionadas con el aprovechamiento y valorización de residuos.	x		Los recicladores de oficio hacen parte del sistema y son contratados por la alcaldía de Machetá, pero no se encuentran vinculados
	El servicio público de aseo y la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos promueve la cultura de consumo responsable de residuos sólidos, fortaleciendo la reutilización de envases y empaques, entre otros	x		Cumple en su totalidad
2 7	El servicio público de aseo y la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos promueve procesos de separación en la fuente, recolección y transporte selectivo en estaciones de aprovechamiento que incorporen valor agregado a los materiales con potencial de reciclaje	x		Cumple en su totalidad
2 8	El servicio público de aseo dispone en los rellenos sanitarios la menor cantidad posible de residuos	x		Ya que aún siguen disponiendo residuos aprovechables y no cuentan con una estrategia a mediano o largo plazo para evitar la generación de estos

	El servicio público de aseo y la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos analizaron y evaluaron la viabilidad de realizar proyectos sostenibles de aprovechamiento y valorización de los residuos ya sea como iniciativa municipal			x	
	Los residuos sólidos cumplen con la caracterización y con los siguientes criterios estipulados para la óptima realización de actividades destinadas al aprovechamiento de estos (Título F, RAS, Capítulo 5., F.5.2.1.4.)			x	