

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS DEL INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL Y LA UNIVERSIDAD DE  
AMÉRICA, EMPLEANDO UN REACTOR DE LABORATORIO**

**DANIELA GARZÓN VALENCIA  
GISELLE PAOLA TORRES PRIETO**

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director  
FELIPE CORREA MAHECHA  
Ingeniero Químico  
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible**

**Codirector  
DIANA MARCELA CUESTAS PARRA  
Ingeniera Ambiental  
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2024**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Felipe Correa Mahecha  
**Director de tesis**

---

Nombre  
**Jurado 1**

---

Nombre  
**Jurado 2**

Bogotá D.C. , febrero de 2024

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Consejero Institucional

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica

**Dr. María Fernanda Vega de Mendoza**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro**

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

**Dr. Susan Margarita Benavides Trujillo**

Secretario General

**Dr. José Luis Macías Rodríguez**

Decana Facultad de Ingenierías

**Ing. Naliny Guerra Prieto**

Directora Departamento de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Química

**Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme paciencia, fortaleza y calma en los momentos que más necesité durante la realización de este proyecto.

A la vida por todas las personas que puso en mi camino durante todo este tiempo, por enseñarme que todo tiene su momento, que siempre vendrán cosas mejores y que todo pasa por algo.

A mi mamá por acompañarme en todo momento, por escucharme y darme aliento en los momentos difíciles, por esforzarse tanto para sacarme adelante y evitar que me faltara algo.

A mi familia porque siempre estuvo presente y pendiente de mí, enviándome bendiciones y buenas energías en mi carrera y en mi vida, por ser tan especiales y por recordándome lo capaz que soy.

A mis amigos con quienes he pasado los mejores momentos, me han acompañado en momentos difíciles y me han sacado risas infinitas.

Y finalmente me quiero dedicar este trabajo en honor a todo el esfuerzo que puse en él, en los sacrificios que me costaron y tuve que hacer y en las enseñanzas para la vida que me deja.

Giselle Paola Torres Prieto

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto principalmente a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este viaje académico. Agradezco su constante presencia y bendiciones en mi vida.

A mi familia, por sus esfuerzos, por ser mi mayor fuente de apoyo, paciencia y amor incondicional a lo largo de esta travesía académica. Sin ustedes, este logro no hubiera sido posible.

A mi pareja, por su constante aliento, motivación y por estar a mi lado en los momentos de estrés y agotamiento. Gracias por creer en mí y por celebrar este logro conmigo.

A mi director de tesis, el Ing. Felipe Correa Mahecha, por su guía experta, sabiduría y dedicación en cada etapa de este proyecto, y a la Universidad de América, por brindarme las herramientas y oportunidades necesarias para culminar esta etapa de mi vida. Estoy agradecida por la educación de calidad que he recibido.

Daniela Garzón Valencia

## **TABLA DE CONTENIDO**

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. GENERALIDADES	16
1.1 Clasificación de residuos orgánicos	16
1.2 El problema de los residuos	17
1.3 Proceso de compostaje	23
1.4 Materia prima para el proceso de compostaje	27
1.5 Sistemas de compostaje	30
1.6 Justificación	34
1.7 Marco legal	37
2. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS	40
2.1 Metodología	40
2.2 Resultados y análisis de la caracterización de la materia prima	47
3. VARIABLES Y PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE Y DISEÑO EXPERIMENTAL	51
3.1 Variables y parámetros en el proceso de compostaje	51
3.2 Diseño experimental	60
4. INDICADORES DE CALIDAD Y DESEMPEÑO DEL COMPOSTAJE OBTENIDO	80
4.1 Balance de masa	80
4.2 Calidad del compostaje	88
5. CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
GLOSARIO	101
ANEXOS	103

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Principales características de la materia prima usada	29
<b>Tabla 2.</b> Condiciones aceptables e ideales de la materia prima para compostaje	29
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas de los sistemas cerrados horizontales y verticales	33
<b>Tabla 4.</b> Normativa complementaria a la NTC 5167	38
<b>Tabla 5.</b> Principales características fisicoquímicas obtenidas para las materias primas usadas	49
<b>Tabla 6.</b> Resumen de equipos usados en la experimentación	61
<b>Tabla 7.</b> Características del reactor	64
<b>Tabla 8.</b> Densidad de los residuos y de la mezcla de residuos	65
<b>Tabla 9.</b> Cantidad de residuos cargados al reactor	66
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de biodegradación experimentación	75
<b>Tabla 11.</b> Resumen análisis de resultados fisicoquímicos al inicio de la experimentación	89
<b>Tabla 12.</b> Resumen análisis de resultados fisicoquímicos al final de la experimentación	90
<b>Tabla 13.</b> Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de humedad	104
<b>Tabla 14.</b> Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de cenizas	104
<b>Tabla 15.</b> Datos necesarios para el cálculo de la densidad	104
<b>Tabla 16.</b> Equipos y materiales complementarios	105
<b>Tabla 17.</b> Temperatura del sustrato registrada por el reactor en la experimentación	107
<b>Tabla 18.</b> Temperatura en la entrada registrada por el reactor en la experimentación	107
<b>Tabla 19.</b> Temperatura en la salida registrada por el reactor en la experimentación	107
<b>Tabla 20.</b> Lecturas de pH registradas por el reactor experimentación	107
<b>Tabla 21.</b> Lecturas de pH tomadas por las autoras experimentación	107
<b>Tabla 22.</b> Porcentaje de humedad en el sustrato registrada por el reactor experimentación	108
<b>Tabla 23.</b> Porcentaje de humedad entrada del reactor experimentación	108
<b>Tabla 24.</b> Porcentaje de humedad salida del reactor experimentación	108
<b>Tabla 25.</b> Porcentaje de humedad calculada por las autoras experimentación	108
<b>Tabla 26.</b> Consolidado mediciones porcentaje de cenizas base seca experimentación	108
<b>Tabla 27.</b> Emisiones O <sub>2</sub> entrada del reactor experimentación	108
<b>Tabla 28.</b> Emisiones O <sub>2</sub> salida del reactor experimentación	109
<b>Tabla 29.</b> Emisiones CO <sub>2</sub> entrada del reactor experimentación	109
<b>Tabla 30.</b> Emisiones CO <sub>2</sub> salida del reactor experimentación	109
<b>Tabla 31.</b> Emisiones H <sub>2</sub> S salida del reactor experimentación	109



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Generación de residuos proyectada por región (millones de toneladas/año)	18
<b>Figura 2.</b> Composición global de los residuos	19
<b>Figura 3.</b> Principales ciudades que generaron desechos en Colombia entre 2010 y 2020	20
<b>Figura 4.</b> Manejo de la fracción de los residuos sólidos en Colombia	21
<b>Figura 5.</b> Composición de los residuos sólidos en Bogotá para 2020	22
<b>Figura 6.</b> Entradas y salidas del proceso de compostaje	24
<b>Figura 7.</b> Temperatura y pH en el proceso de compostaje	26
<b>Figura 8.</b> Principal composición de las plantas incluido el pasto	28
<b>Figura 9.</b> Pila de compostaje estática	30
<b>Figura 10.</b> Pila con volteador de hileras accionado por un tractor	31
<b>Figura 11.</b> Sistema cerrado de compostaje en reactor	32
<b>Figura 12.</b> Colores para la separación de residuos en Colombia	39
<b>Figura 13.</b> Residuos de alimentos cocidos	40
<b>Figura 14.</b> Residuos tras la molienda	40
<b>Figura 15.</b> Método de muestreo realizado a la mezcla de residuos	41
<b>Figura 16.</b> División zonas del reactor para la extracción de muestras	41
<b>Figura 17.</b> Diagrama método de muestreo por cuarteo	42
<b>Figura 18.</b> Muestras listas día 1 para medición de pH	43
<b>Figura 19.</b> Muestras para la medición del porcentaje de humedad	43
<b>Figura 20.</b> Muestra día medición de porcentaje de cenizas	43
<b>Figura 21.</b> Diagrama medición de pH	45
<b>Figura 22.</b> Diagrama de medición porcentaje de humedad	46
<b>Figura 23.</b> Diagrama de medición porcentaje de cenizas	46
<b>Figura 24.</b> Ubicación del reactor en la experimentación	47
<b>Figura 25.</b> Entorno de las partículas del compostaje	52
<b>Figura 26.</b> Curva del consumo de oxígeno durante el proceso de compostaje	53
<b>Figura 27.</b> Efecto de una alta concentración de humedad en el transporte de oxígeno	56
<b>Figura 28.</b> Degradabilidad relativa de los compuestos orgánicos	60
<b>Figura 29.</b> Vista frontal reactor	62
<b>Figura 30.</b> Pantalla programadora del reactor	62
<b>Figura 31.</b> Vista frontal y lateral con mediciones del reactor	63
<b>Figura 32.</b> Temperaturas registradas por el reactor durante la experimentación	67
<b>Figura 33.</b> Lecturas pH experimentación	69
<b>Figura 34.</b> Porcentaje de humedad del aire en la experimentación	71
<b>Figura 35.</b> Porcentaje de humedad del sustrato en la experimentación	72
<b>Figura 36.</b> Medición porcentaje de cenizas experimentación	73
<b>Figura 37.</b> Concentraciones O <sub>2</sub> experimentación	76
<b>Figura 38.</b> Emisiones CO <sub>2</sub> experimentación	77
<b>Figura 39.</b> Emisiones H <sub>2</sub> S experimentación	78
<b>Figura 40.</b> Balance de masa general	80
<b>Figura 41.</b> Balance de masa de agua	83
<b>Figura 42.</b> Balance de masa de carbono	85
<b>Figura 43.</b> Balance de masa nitrógeno	86
<b>Figura 44.</b> Balance de masa tras proponer un secado del 30% del compostaje obtenido	87
<b>Figura 45.</b> Resultados análisis Agrilab al inicio de experimentación	110



## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo 1.</b> Datos necesarios para el cálculo de las características fisicoquímicas de la materia prima	104
<b>Anexo 2.</b> Equipos y materiales complementarios	105
<b>Anexo 3.</b> Tablas de resultados experimentación	107
<b>Anexo 4.</b> Informe completo análisis de materiales orgánicos de residuos cargados al reactor al inicio del proceso	110
<b>Anexo 5.</b> Informe completo análisis de materiales orgánicos del producto obtenido tras la finalización del proceso	112

## RESUMEN

Cada vez más personas en el mundo se preocupan por la huella ambiental que están dejando a las futuras generaciones. Una estrategia que se está implementado para reducir los impactos dañinos al ambiente son el reciclaje. El presente proyecto se centra en evaluar el proceso de compostaje aeróbico realizado a partir de residuos sólidos orgánicos obtenidos principalmente de la Fundación Universidad de América y del Instituto Técnico Central (ITC) haciendo uso de un reactor que contaba con un sistema de medición de variables como temperatura, porcentaje de humedad, pH, entre otros. Se partió de una búsqueda bibliográfica exhaustiva con el fin de conocer la problemática de los residuos en el mundo y en Colombia, teniendo un mayor enfoque en la ciudad de Bogotá. Posteriormente se estudió el proceso general de compostaje aeróbico y las principales características de la materia prima y de la mezcla de residuos usada durante el proyecto.

La experimentación tuvo una duración de 21 días en los cuales se tomaron muestras de la mezcla de los residuos cargados al reactor para su posterior caracterización fisicoquímica. El proceso se inició con un análisis fisicoquímico de la materia prima y de la mezcla de residuos. Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, aquellos parámetros que más influían en el proceso de compostaje son la temperatura, el pH, el porcentaje de cenizas, el porcentaje de humedad, la rotación, la aireación y la relación carbono – nitrógeno; sin embargo, de las mencionadas solo fueron medidas las cuatro primeras. Posteriormente se analizaron los resultados obtenidos y se compararon con el rango permitido por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167.

Del reactor se tomó una muestra significativa de 30 gramos de diferentes zonas del reactor y se aplicaba el método de muestreo por cuarteo cada 3 días y se le realizaba la caracterización fisicoquímica. Es importante tener en cuenta que los resultados arrojados por el reactor y los calculado de las autoras presentan diferencias entre sí, por lo que se llegó a la conclusión de que el reactor presentaba fallas en su funcionamiento.

**PALABRAS CLAVE:** Compostaje aerobio, residuos sólidos orgánicos, análisis fisicoquímicos, emisión de gases de efecto invernadero.

## INTRODUCCIÓN

Si se analizan las actividades que se llevan a cabo diariamente en los hogares, trabajos o lugares de estudio, se evidencia que se genera una alta cantidad de residuos tales como alimentos, cartón, papel, entre otros. Estos residuos si no son clasificados y dispuestos de la manera adecuada pueden causar grandes problemas ambientales e incluso de salud pública. Entre 2010 y 2020 Bogotá fue la ciudad de Colombia que generó más desechos [12] y para 2022 según datos de Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), el 51% de los residuos generados en los hogares, eran de tipo orgánico, lo cual se ve reflejado en la producción de alrededor de 3 440 toneladas diarias de residuos. [14]

El consumismo ha provocado la generación de muchos residuos y a hacer uso de ciertos productos los cuales una vez cumplen su objetivo principal son desechados. Sin embargo, cada vez más personas en el mundo están tomando conciencia de la problemática que conlleva no clasificar los residuos y encasillar todo lo que cumple su vida útil principal como un desecho que debe ser enviado a un relleno sanitario e incluso ser quemado. Cada vez se conocen más estrategias que buscan darle otros usos a los residuos y con ello reducir su cantidad en los rellenos sanitarios. El compostaje es una táctica que cada vez toma más fuerza en el mundo ya que es sostenible porque siempre se van a generar residuos, además de que su implementación no es costosa, ni se requiere de un gran espacio, con la aclaración de que depende del tipo de proceso de compostaje que se quiera llevar a cabo.

El presente proyecto es una evaluación del proceso de compostaje a partir de residuos sólidos orgánicos alimenticios y de poda. Para la selección del tipo de proceso que se llevó a cabo se realizó un cuadro comparativo en el que se contemplaron las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de procesos de compostaje, llegando a la conclusión de que la mejor opción para el presente proyecto era un sistema cerrado con orientación horizontal ya que ni la longitud ni el espacio requerido para este tipo de reactores debe ser amplio, además de que ofrece la ventaja de tener un mayor control de variables como la temperatura y la rotación y evitar que el sistema se contamine al ser cerrado.

Durante el proceso es fundamental la caracterización fisicoquímica no solo del compostaje obtenido sino también de la materia prima debido a que permite tener un seguimiento de lo que ocurre con los residuos que fueron cargados al reactor y que finalmente serán obtenidos como compostaje.

## OBJETIVOS

- **Objetivo general**

Evaluar el proceso de compostaje de residuos orgánicos urbanos del Instituto Técnico Central (ITC) y la Universidad de América, empleando un reactor de laboratorio.

- **Objetivos específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente los residuos orgánicos que serán utilizados para el proceso de compostaje.
- Determinar las variables y parámetros influyentes en el proceso de compostaje de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, mediante revisión bibliográfica y un diseño experimental.
- Valorar los indicadores de desempeño del proceso de compostaje y de calidad del compost obtenido teniendo en cuenta la normatividad aplicable.

## 1. GENERALIDADES

En este primer capítulo se trata el problema de los residuos tanto en el mundo como en Colombia, enfocándose principalmente en Bogotá ya que es la ciudad de donde se colectaron los residuos para la experimentación. Posteriormente se encuentra una introducción al proceso de compostaje, las fases presentes con respecto a la temperatura, las principales características de los residuos sólidos utilizados en el proceso, se encuentra una tabla de comparación de los diferentes tipos de reactores, realizada con el fin de escoger el reactor que mejor se ajusta a las necesidades y los requerimientos del proceso. Finalmente se encuentran los Objetivos de Desarrollo Sostenible con los se está contribuyendo a cumplir y las normas, resoluciones y leyes que aplican al proyecto

### 1.1 Clasificación de residuos orgánicos

#### 1.1.1 Según su origen

Teniendo en cuenta la GTC (Guía Técnica Colombiana) 53-7 de 2006 [4] la cual habla del aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos se presenta la siguiente clasificación.

- **Naturales:** Generados por la naturaleza, sin la intervención del humano. [4]
- **Agrícolas:** Generados por los ganaderos o las agroindustrias. [4]
- **Industriales:** Generados por la actividad industrial manejada por el humano. [4]
- **Domésticos:** Generados en los hogares. [4]

#### 1.1.2 Según sus características fisicoquímicas y biológicas

- **Residuos peligrosos:** Son aquellos que por sus características tóxicas, corrosivas, explosivas, inflamables o infecciosas pueden causar riesgos a la salud humana o deteriorar el medio ambiente hasta tal nivel que cause un riesgo a la salud humana. [5]
- **Residuos aprovechables:** Son los materiales, objetos o sustancias sólidas que no tiene un uso directo o indirecto. Puede ser susceptible a la incorporación a un proceso productivo. [5]
- **Residuos no aprovechables:** Son los materiales o sustancias de origen orgánico e inorgánico, que no ofrecen posibilidad alguna de aprovechamiento, reutilización o reincorporación en un proceso productivo. No tiene un valor comercial, requiere de un tratamiento y una disposición final lo cual genera costos adicionales. [5]



## **1.2 El problema de los residuos**

La gestión de los desechos sólidos resulta ser un problema universal para todos los habitantes del planeta, aún más cuando el 90% de los desechos van a parar en rellenos sanitarios o incluso se queman a cielo abierto, especialmente en países de bajos ingresos. [7]

La gestión inadecuada de los desechos produce contaminación en los océanos, obstruye los drenajes causando inundaciones, transmite enfermedades, perjudica los animales y afecta el desarrollo económico.

Se prevé que la generación diaria de residuos per cápita en los países de altos ingresos aumentará un 19% para 2050 y en los países de ingresos más bajos se espera que aumente aproximadamente un 40%. [7]

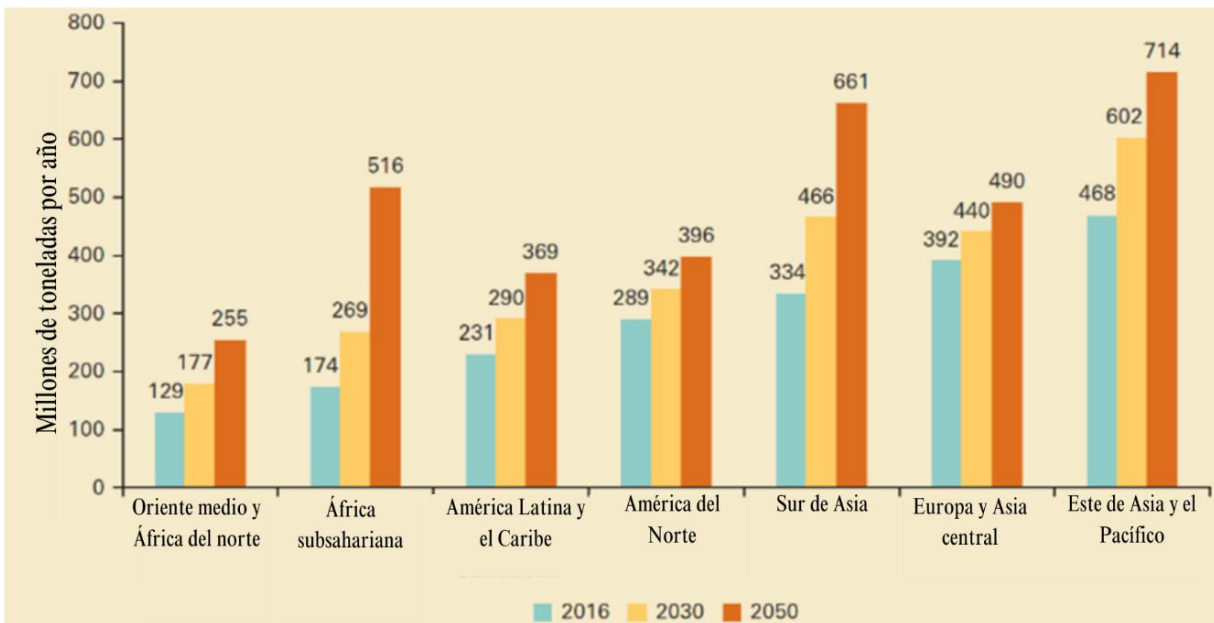
Para 2020 se estimó que en el mundo se generaron 2 240 millones de toneladas de residuos, lo cual equivale a una huella de carbono de 0,79 kilogramos por persona al día. Con el crecimiento poblacional y la urbanización, se espera que la generación aumente un 73% para 2050. [8]

Si se comparan los países desarrollados y los países en desarrollo, especialmente los más pobres de las zonas urbanas, los últimos se ven más afectados debido a la inadecuada gestión de los residuos. En los países de ingresos más bajos, más del 90% de los residuos van a parar a vertederos e incluso se queman. Estas prácticas tienen graves consecuencias para la salud, la seguridad y el medio ambiente y como se sabe, los residuos mal gestionados sirven como caldo de cultivo para vectores de enfermedades, contribuyen al cambio climático e incluso a promover la violencia urbana. [9]

La gestión adecuada de los rellenos sanitarios es importante para construir ciudades sostenibles y habitables, aunque en ocasiones resulta un desafío para muchos países ya que es costoso y representa entre el 20% y el 50% del presupuesto municipal. [9]

**Figura 1.**

*Generación de residuos proyectada por región (millones de toneladas/año)*

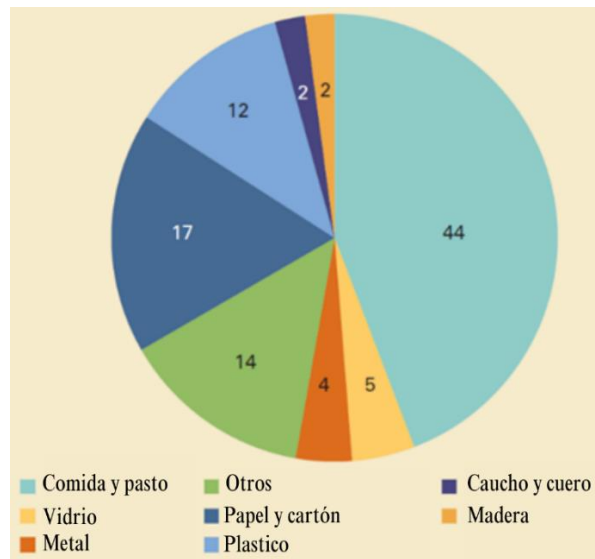


**Nota.** Proyección de la generación de residuos en el mundo en millones de toneladas por año hasta 2050. Tomado de: What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050, The World Bank. [En línea]. Disponible en: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html) [8]

La figura 1 representa la generación de residuos en el mundo por región en millones de toneladas por año, con datos reales de 2016 y proyecciones para 2030 y 2050. La región de Asia Oriental y el Pacífico ha sido históricamente la que más produce desechos e incluso la que más proyección de aumento tiene y la región de Medio Oriente y África del norte es la que menos ha producido y por lo tanto la que menos proyección de aumento tiene.

**Figura 2.**

*Composición global de los residuos.*



**Nota.** Composición general de los residuos en el mundo. Tomado de What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050, The World Bank. [En línea]. Disponible en: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html) [8]

Como se observa en la figura 2, la mayor parte de los residuos generados en el mundo corresponde a restos de alimentos y recortes de poda con un 44% y en el otro extremo, los que menos se generan son el caucho, el cuero y la madera con un 4% en total.

El compostaje a partir de los desechos sólidos orgánicos cada vez toma más fuerza en el mundo ya que es una solución sostenible para la gestión de los residuos urbanos. Como consecuencia de la expansión de la población mundial y de la urbanización, para 2016 se generaron 2,01 mil millones de toneladas métricas de residuos en el mundo y se espera que para 2030 esta cantidad aumente hasta producir unos 2,59 mil millones de toneladas métricas. [10]

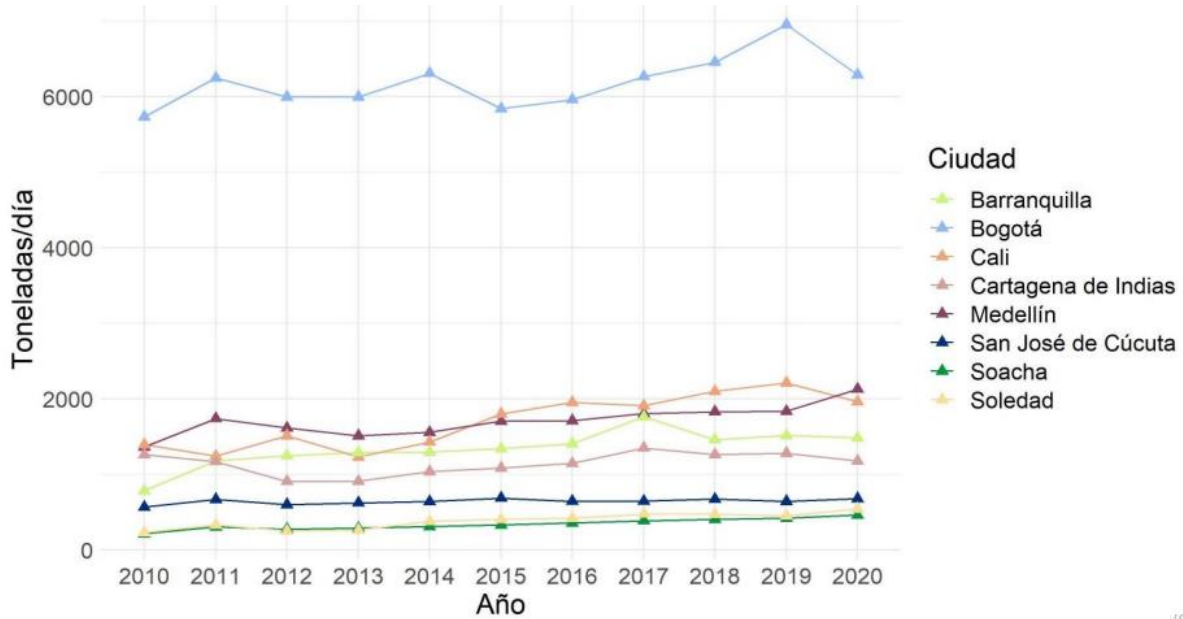
A nivel mundial, los residuos sólidos son gestionados principalmente de cuatro maneras: Desecho, compostaje, reciclaje y reutilización e incineración. [11]

En cuanto a la generación de residuos en Colombia, la figura 3 es un compilado de las ocho principales ciudades que generaron más residuos entre el año 2010 y el año 2020. La ciudad que

más generó desechos fue Bogotá superando a las otras ciudades en aproximadamente 4 000 toneladas diarias de residuos, seguido está Medellín y Cali y en el último lugar Soacha. [12]

**Figura 3.**

*Principales ciudades que generaron desechos en Colombia entre 2010 y 2020.*

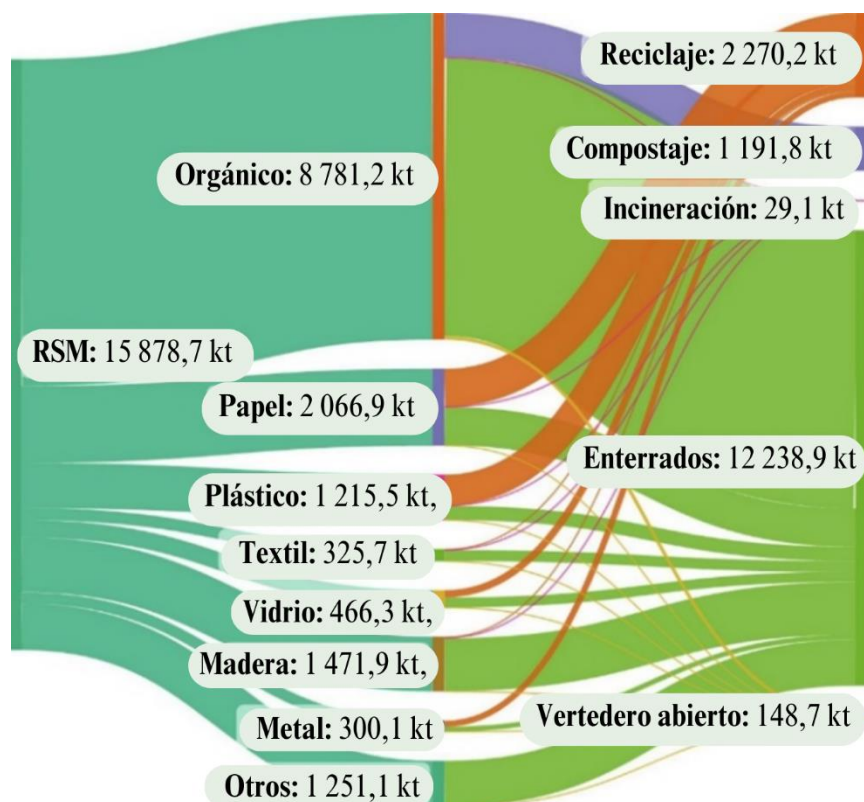


**Nota:** Principales ciudades de Colombia que generaron más desechos entre el año 2010 y 2020. Tomado de: Departamento Nacional de Planeación, "Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020", Bogotá, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_df\\_2020%20\(1\).pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20(1).pdf) [59]

En Colombia, para 2020 fueron dispuestos aproximadamente 32 580 toneladas diarias de residuos sólidos a través del sistema público de aseo. De este total el 45,3% corresponde a las ocho ciudades que se presentan en la figura 3. [12] En la figura 4 podemos observar el manejo de la fracción de residuos sólidos en Colombia.

**Figura 4.**

*Manejo de la fracción de los residuos sólidos en Colombia.*



**Nota:** Disposición típica de los residuos sólidos en Colombia. Tomado de: D. Otero Meza, A. Sagastume Gutiérrez, J. Cabello Eras, J. Salcedo Mendoza, J. Hernández Ruydiaz, “Techno-economic and enviromental assesment of the landfill gas to energy potential of major Colombian cites”. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423008683> [13]

En la parte izquierda de la figura 4 se observa que en Colombia los residuos sólidos municipales (15 878,5), están mayormente contenidos por residuos orgánicos (8 781,2), los cuales se disponen principalmente en reciclaje, compostaje y una pequeña fracción se incinera, esto último puede ocurrir debido a la falta de educación y conciencia en cuanto a la disposición de los residuos, favoreciendo así el colapso de los rellenos sanitarios y la incineración de residuos que podían ser dispuestos de otra manera.

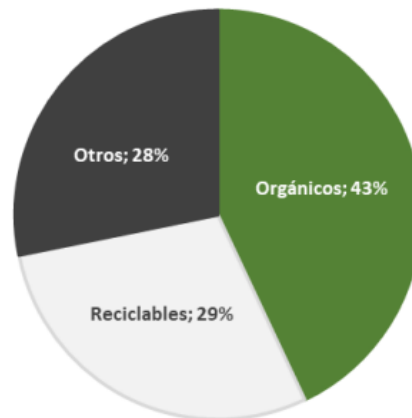
Teniendo como referencia datos obtenidos por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), para 2022 el 51% de los residuos generados en los hogares de Bogotá, eran de tipo orgánico, lo cual se ve reflejado en la producción de alrededor de 3 440 toneladas diarias de

residuos solo en Bogotá. Dicho esto, la UAESP ha venido trabajando en el aprovechamiento de estos residuos para así transformarlos en abono y ayudar a descongestionar el relleno sanitario Doña Juana. [14]

Los Residuos Sólidos Municipales (RSM) en la ciudad de Bogotá se componen principalmente de materia orgánica y materiales reciclables; en la figura 5 se observa que estos dos tipos de desechos representan un 72% de todos los residuos dispuestos que tendrían un potencial de aprovechamiento. [12]

**Figura 5.**

*Composición de los residuos sólidos en Bogotá para 2020.*



**Nota:** Composición típica de los residuos sólidos en Bogotá en el año 2020. Tomado de: E. Rivera, "Gestión de residuos orgánicos en Bogotá", Bogotá, Programa Empleos Verdes en la Economía Circular - PREVEC, noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/63dc2d814d066.pdf> [12]

El relleno sanitario Doña Juana (RSDJ) se encuentra ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar, cerca de los barrios Mochuelo alto y bajo, en el sur de la capital de la República. Empezó operaciones el 1° de noviembre de 1988, pero con el tiempo se convirtió en un problema ambiental y social, debido a la falta de planeación y de gestión inadecuada de este. Iniciando el año 2000 hubo varios incendios y derrumbes en la zona, lo que afectó a los trabajadores del vertedero y las comunidades aledañas que estuvieron expuestas a gases tóxicos y olores de los desechos. [15]

En el año 2020, las cerca de 2 300 000 toneladas de residuos que llegaron al sanitario, más los residuos que ya se encontraban en proceso de descomposición, produjeron un caudal de más de 26,97 litros por segundo de lixiviados, los cuales, de no ser controlados y tratado adecuadamente, pueden contaminar el suelo y el subsuelo, así como las fuentes de agua. Cabe aclarar que el relleno cuenta con una planta de tratamiento de lixiviados, la cual fue diseñada para tratar entre 8 y 14 litros por segundo [11], sin embargo, como se mencionó anteriormente, el caudal supera al del diseño por casi el doble.

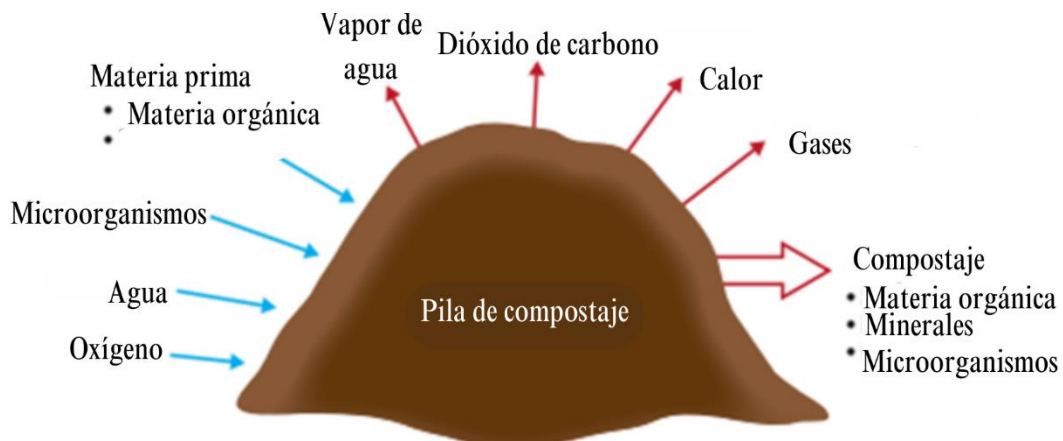
Según la UAESP, el sistema de tratamiento de lixiviados solo da cumplimiento a 9 de los 55 parámetros exigidos por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), por lo cual, el líquido tratado que se vierte al río Tunjuelo no cumple con los estándares de calidad requeridos. A lo anterior se suma las emisiones de gases de efecto invernadero y otros altamente perjudiciales que no se logran captar en su total; los fuertes olores; la propagación de vectores; las afecciones a la salud de los vecinos del relleno, la desvalorización de las tierras agrícolas y la inestabilidad del terreno. [11]

### **1.3 Proceso de compostaje**

El proceso de compostaje representado en la figura 6, inicia con la utilización de oxígeno por parte de los microorganismos para consumir la materia orgánica presente en la materia prima. El compostaje durante el proceso libera calor, dióxido de carbono y vapor al medio ambiente. El agua que contiene la pila puede llegar a ascender a más de la mitad del peso de las materias primas originales secas, por lo que al final del proceso se reduce la masa y el volumen del compostaje, aunque también ocurre por la descomposición presentada. [3]

## Figura 6.

*Entradas y salidas del proceso de compostaje.*



**Nota.** Entradas y salidas típicas en una pila de compostaje. Tomado de: R. Rynk “The composting handbook” (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

El proceso de compostaje inicia una vez los materiales orgánicos húmedos se acumulan. Los microorganismos (bacterias y hongos) presentes en la superficie de la materia prima tienen mucho oxígeno suficiente por lo que aumenta su número utilizando los azúcares, almidones y proteínas fácilmente disponibles como alimentos, proporcionando la energía necesaria para el crecimiento y el metabolismo. A medida que el proceso aumenta, las sustancias orgánicas fácilmente degradables se agotan, por lo que la población microbiana se debe adaptar para poder metabolizar compuestos orgánicos más difíciles.

En los sistemas aeróbicos, la energía producida es proporcional a las cantidades de oxígeno que se consumen. Debido a que la liberación de calor se relaciona con la actividad microbiana, la temperatura es usada como un indicador del desempeño del proceso. [3]

Debido a las variaciones de temperatura que se pueden presentar en el sistema de compostaje, se evidencia poblaciones microbianas de organismos mesófilos, termófilos y termotolerantes. Con respecto a la temperatura, el compostaje pasa por 3 etapas:



### ***1.3.1 Fase mesófila***

Inicialmente la temperatura se encuentra cercana a la ambiente, aunque debido a la actividad microbiana, la temperatura aumenta considerablemente hasta alcanzar en pocos días los 40°C. [16]

### ***1.3.2 Fase termófila***

Las temperaturas pueden oscilar entre 70 y 80°C debido al aumento de la actividad microbiana. La mayor parte de la celulosa es degradada. Los microorganismos presentes son termófilos. A partir de los 60°C, los hongos termófilos detienen su actividad y las reacciones de oxidación se llevan a cabo por bacterias formadoras de esporas y actinomicetos. [16]

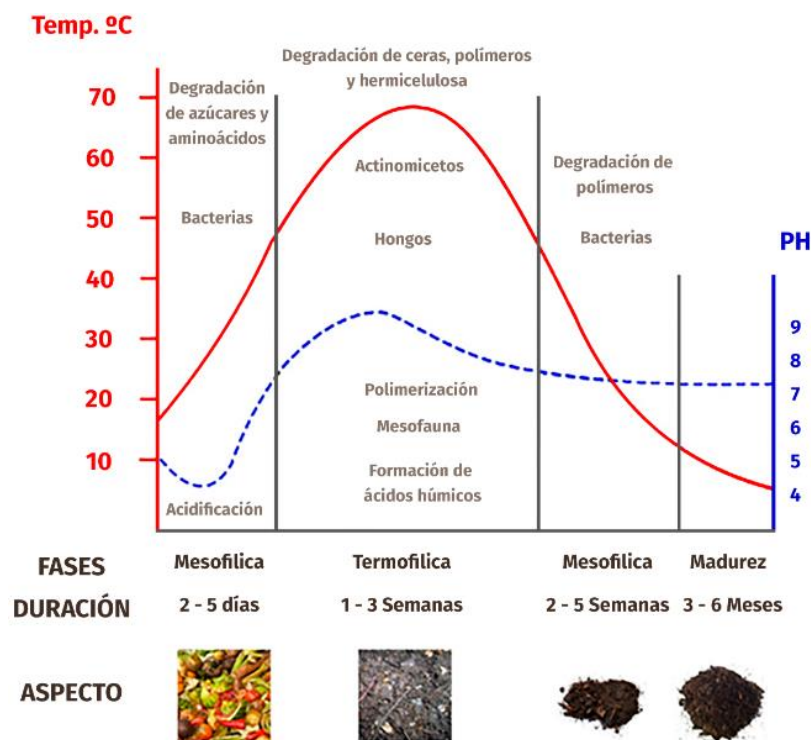
### ***1.3.3 Fase de enfriamiento***

La tasa de descomposición y la temperatura disminuye a valores cercanos a la ambiental. Posteriormente, se produce una colonización por microorganismos mesófilos. [16]

La figura 7 es una gráfica de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en la que se ilustra las etapas del proceso de compostaje junto con los valores de temperatura, oxígeno y pH en la que generalmente ocurre el proceso.

**Figura 7.**

*Temperatura y pH en el proceso de compostaje.*



**Nota.** Fases presentes durante el proceso de compostaje con respecto a la temperatura y el pH. Tomado de: A.Villas, S. Ingouville. Guía de compostaje. Punto Compost, Buenos Aires, Argentina. [En línea]. Disponible en: <https://puntocompost.wordpress.com/productos/> [60]

En cuanto al compostaje, se entiende que es la descomposición aeróbica o que requiere oxígeno ( $O_2$ ) de materiales orgánicos por microorganismos en condiciones controladas. Durante este proceso, los microorganismos utilizan el  $O_2$  mientras consumen materia orgánica presente en las materias primas, las cuales, para el presente documento son los residuos orgánicos. El complejo activo genera un calor considerable, mientras que  $CO_2$  y el vapor de agua se liberan al aire. [3]

Las pérdidas de agua pueden ascender a más de la mitad del peso de las materias primas originales. Por lo que se puede decir que durante el proceso se reduce tanto el volumen como la masa de las materias primas al tiempo que se transforma en compostaje.

Las materias primas son las encargadas de proporcionar los nutrientes tales como el carbono y el nitrógeno y la energía necesaria para el desarrollo óptimo de los microorganismos. Estos

microorganismos vienen con la materia prima y su entorno circundante, o también se pueden añadir mediante inoculantes o compostaje ya terminado. El volumen y la masa del compostaje puede ser la mitad o menos de un cuarto del volumen inicial cargado, en este caso, al reactor.

Las condiciones más importantes a la hora de realizar el proceso de compostaje son: [3]

- Materiales orgánicos adecuadamente mezclados y caracterizados para proporcionar los nutrientes necesarios para permitir la actividad microbiana.
- Suficiente humedad para permitir la actividad microbiana biológica sin obstaculizar la aireación.
- Niveles de oxígeno óptimos para apoyar la descomposición aeróbica
- Temperatura que fomente la actividad microbiana vigorosa

#### **1.4 Materia prima para el proceso de compostaje**

Las materias primas usadas en el proceso de compostaje son generalmente sólidos orgánicos en un estado activo de descomposición. [3]

Para los ensayos realizados en este proyecto se tomaron residuos de comida no cocinada tales como frutas y verduras, residuos de comida cocinada sin cárnicos tales como granos, verduras, legumbres y tubérculos del ITC y finalmente recortes de poda tomados de la Universidad de América. A continuación, una caracterización de los residuos usados.

##### ***1.4.1 Residuos de comida***

Son subproductos provenientes principalmente de casas, restaurantes, hoteles, colegios, empresas, y en general cualquier lugar en el que se consuman alimentos. Los residuos de alimentos se pueden presentar en la fase de generación, embalaje, manipulación, distribución y comercialización e incluso posterior a la preparación. También se incluyen las partes no deseables del alimento tales como la piel, los tallos y el follaje. [3]

Debido a la cantidad de elementos presentes en los restos de comida, resulta un poco difícil caracterizarlos. Tiene un contenido de humedad que oscila entre el 60% y 80% y un contenido de nitrógeno del 1 al 3%.

Al tratarse de alimentos, es posible que se presente contaminación debido a que se descompone rápidamente y resultan atractivos para las moscas, roedores y otros animales. Frecuentemente desprende olores que pueden ser molestos, por lo que es recomendable realizar el proceso al aire libre y mezclarlo con recortes de jardín. [3]

#### 1.4.2 Recortes de poda

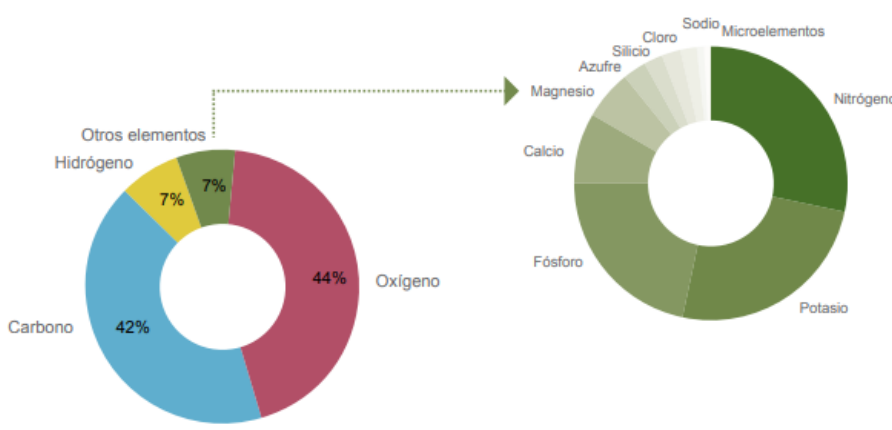
También llamados residuos verdes, incluyen hojas verdes, recortes de pasto, frutas y verduras no utilizadas y ramas de árboles. Dependiendo de la cantidad y el grosor del material, los recortes pueden requerir de molienda antes de entrar al proceso de compostaje y dependiendo del uso de realiza cribado. [17]

La mayoría de recortes se composta a una velocidad moderada, pero lo suficientemente lento como para presentar un bajo riesgo de olores. La normatividad para el uso de estos residuos en el proceso de compostaje es prácticamente nula, por lo que representa una ventaja con respecto a otras materias primas. [17]

Los nutrientes que requieren las plantas para su crecimiento provienen principalmente del aire, el agua y el suelo, siendo el suelo el medio de transporte de nutrientes. En la figura 8 se representa la composición promedio de las plantas, en donde el 86% corresponde a nitrógeno y carbono y el resto del porcentaje a oxígeno y otros elementos. [18]

**Figura 8.**

*Principal composición de las plantas incluido el pasto.*



**Nota.** Composición química de las plantas incluido el pasto. Tomado de: Manual de compostaje del agricultor. FAO, Santiago de Chile. (2013). [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf> [18]

En la tabla 1 se presenta un compilado de las principales características de las materias primas usadas para el presente proyecto.

**Tabla 1.**

*Principales características de la materia prima usada.*

<b>MATERIAL</b>	<b>%N (PESO SECO)</b>	<b>RELACIÓN C:N</b>	<b>%HUEMDAD (BASE HÚMEDA)</b>
Residuos de frutas	0,9 – 2,6	20 - 49	68 - 88
Residuos vegetales	2,5 - 4	11 - 13	-
Residuos de comida cocinada	1,9 – 2,9	14 - 16	69
Recortes de césped suelto	2,0 – 6,0	9 - 25	-

**Nota.** Características fisicoquímicas de la materia prima usada en el presente proceso de compostaje. Tomado de: R. Rynk “On-farm composting handbook”, Apéndice A, Tabla A.1. Typical characteristics of selected raw materials. [En línea]. Disponible en: <https://cwmi.css.cornell.edu/AppendixATable1OFCH.pdf> [19]

En la tabla 2 se encuentran los rangos aceptables e ideales recomendados de los principales factores que afectan la materia prima a usar en el proceso de compostaje. Lo ideal sería escoger y mezclar la materia prima en proporciones correctas para que el producto obtenido tenga características dentro de los rangos permitidos. Sin embargo, no es necesario y no siempre es posible lograr esos valores debido a que el proceso de compostaje es robusto y ocurre en una amplia gama de condiciones que pueden variar con respecto a la idealidad. El contenido de humedad y la relación carbono-nitrógeno (C:N) son características de la materia prima importantes en el proceso, aunque el tamaño de partículas, la densidad y el pH también son características importantes durante el proceso y en el momento de la selección de materia prima. [3]

**Tabla 2.**

*Condiciones aceptables e ideales de la materia prima para compostaje.*

<b>CONDICIÓN</b>	<b>RANGO ACEPTABLE</b>	<b>RANGO IDEAL</b>
% Humedad	40% - 65%	50% - 60%
Relación C:N de la mezcla de residuos	20:1 – 60:1	25:1 – 40:1
Densidad a granel	<700 kg/m <sup>3</sup>	400 – 600 kg/m <sup>3</sup>
pH	5,5 – 9,0	6,5 – 8,0

**Nota:** Condiciones aceptables e ideales recomendadas de la materia prima usada en el proceso de compostaje. Tomado de: R. Rynk “The composting handbook” (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

## 1.5 Sistemas de compostaje

El proceso de compostaje se divide principalmente en sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los abiertos son aquellos que se hacen al aire libre y los cerrados son los que se hacen en recipientes o bajo techo. [20]

### 1.5.1 Sistemas abiertos

- **Pilas estáticas:** La materia prima se apila en el suelo o pavimento sin comprimirla en exceso, siendo importante la forma y la medida de la pila. Estas pueden ser de aireación pasiva en la que la pila es ventilada por convección natural o puede ser con aireación forzada, en la cual se tiene un mayor control de la concentración de oxígeno para así favorecer la actividad metabólica de los microorganismos. [20]

**Figura 9.**

*Pila de compostaje estática.*



**Nota.** Pila estática de compostaje. Tomado de: R. Rynk “ The composting handbook” (2022) Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

- **Pilas con volteo:** Es uno de los sistemas más sencillos y económicos y se caracteriza por que la pila se remueve de manera periódica para homogeneizar la mezcla, disminuir la temperatura y controlar la humedad [20]

**Figura 10.**

*Pila con volteador de hileras accionado por un tractor.*



**Nota.** Pila de compostaje en proceso de volteo mecánico. Tomado de: R. Rynk “ The composting handbook” (2022) Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

### ***1.5.2 Sistemas cerrados***

Estos sistemas permiten tener el control de distintos parámetros, así como un menor tiempo de residencia y la posibilidad de que sea un proceso continuo. Se caracteriza principalmente por que se lleva a cabo en reactores cerrados que pueden ser horizontales o verticales, siendo este el principal inconveniente en cuanto al costo de la inversión. [20]

Los reactores verticales suelen tener alturas superiores a 4 metros y pueden ser continuos o discontinuos. Los reactores discontinuos contienen un sistema de aireación forzada o de volteo hacia pisos inferiores. Su principal desventaja es el alto costo de construcción. [20]

Los reactores horizontales se dividen principalmente en aquellos que tienen un depósito rotatorio y aquellos que no poseen sistema de agitación y permanecen estáticos. [20]

**Figura 11.**

*Sistema cerrado de compostaje en reactor.*



**Nota.** Reactor horizontal utilizado para compostaje. Tomado de: Xact systems. “Reaching to the future of composting”. [En línea]. Disponible en: <https://xactsystemscomposting.com/> [21]

Este tipo de sistemas se caracteriza porque evitan la acumulación de lluvia, protege el compostaje de vientos fuertes, facilita el volteo y la extracción de lixiviado, controla la invasión de vectores como ratones o aves y evita la manipulación de personal no autorizado e incluso de animales. [18]

En los sistemas cerrados verticales el recipiente puede descansar en su base, el material se agrega por la parte superior y se extrae de la parte inferior. En la disposición horizontal el recipiente descansa sobre su eje longitudinal y una vez se carga se debe esperar a que el proceso acabe para extraer el material e introducir una nueva carga. [18] En la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas de los sistemas cerrados en su disposición vertical u horizontal.

Con el fin de determinar que sistemas es el más recomendado a la hora de realizar el proceso de compostaje se realizó la tabla 3 en donde se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas que se suelen usar.



**Tabla 3.**

*Ventajas y desventajas de los sistemas cerrados horizontales y verticales.*

<b>SISTEMA DE COMPOSTAJE</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Pila estática (Sistema abierto)</b>	Puede usarse para grandes cantidades de desechos. El costo es bajo ya que no se requiere de equipos especializados.	Evita la homogenización, genera malos olores y plagas, ralentización del proceso por un ambiente aerobio debido a la falta de oxígeno en ciertas partes de la pila, aumento de la humedad y de la temperatura.  Puede requerir una amplia disposición de terreno.
<b>Pila con volteo (Sistema abierto)</b>	Gran capacidad, costo adicional si se usan equipos especializados, aunque el volteo también puede ser manual. Se genera una mayor homogenización, aireación disminución de la humedad y evita la formación de ambiente aerobio.	El costo de la maquinaria puede llegar a ser alto, no está exento de la aparición de plagas y se puede llegar a necesitar una amplia disposición de terreno.
<b>Reactor vertical (Sistema cerrado)</b>	Control de variables como temperatura, humedad, emisión de gases, etc. Mejor conservación de calor y la aparición de plagas puede resultar más fácil de controlar. Cuenta con un sistema de aireación mecánico	Poca capacidad, mayor inversión debido a los complementos que puede tener lo que hace su manipulación compleja, además de las alturas que pueden llegar a tener. Se puede acumular materia prima no procesada en el fondo.
<b>Reactor horizontal (Sistema cerrado)</b>	Se pueden controlar variables como temperatura, humedad, emisión de gases, entre otros. Se puede conservar mejor el calor y la aparición de plagas puede resultar más fácil de controlar. Puede tener un sistema de aireación mecánico o manual	No puede ser cargado con una gran cantidad de materia prima, requiere una mayor inversión debido a los complementos que puede tener lo que hace su manipulación compleja. Se puede acumular materia prima no procesada en el fondo.

**Nota.** Tabla comparativa de los diferentes sistemas de compostaje. Tomado de: Manual de compostaje del agricultor. FAO, Santiago de Chile. (2013). [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf> [18]

En base a la tabla anterior, se puede inferir que, entre los sistemas cerrados y abiertos, aquellos que requieren una menor inversión para su construcción son los sistemas abiertos ya que no se

debe disponer de un equipo que contenga el compostaje; sin embargo, el control de variables que pueden afectar el proceso se ve comprometido, es más probable que se presente contaminación por vectores que no solo afectan el proceso sino también a aquellos operarios que realizan actividades como la caracterización y volteo del compostaje. Por otro lado, aunque el costo de construcción y mantenimiento de un sistema cerrado es más alto debido a los equipos adicionales con los que se puede contar tales como medidores, termocuplas, sistema de volteo, etc., ofrece ventajas como el control de variables y vectores, además de que al contar con un sistema de rotación se favorece la homogenización de la materia prima y la reducción de humedad sobre todo en la parte inferior de la pila de compostaje debido a que ésta se encuentra en constante movimiento.

Dicho esto, se puede afirmar que el sistema en el que se ve favorecido el proceso de compostaje es el sistema cerrado, sin embargo, dentro de este sistema se encuentran los reactores horizontales y verticales. Aquellos que son verticales pueden llegar a ser muy altos por lo que su acceso para la toma de muestras se ve truncado, además de que el costo puede aumentar dependiendo de su altura y finalmente la homogenización y rotación de la materia prima sobre todo en la parte inferior del reactor es complicada por lo que se podría generar un ambiente anaerobio dificultando el correcto término del proceso. En cuanto a los reactores horizontales cuentan con la principal ventaja de permitir la homogenización de toda la materia prima evitando así la contaminación por vectores y la generación de un ambiente anaerobio, además de que al no tener una altura considerable se ve favorecida la toma de muestras para su posterior caracterización.

Finalmente, se concluye que el sistema que mejor se adapta a las condiciones que se presentan a lo largo proceso de compostaje es el sistema cerrado con orientación vertical. Posteriormente se presenta el reactor con estas características usado en la experimentación.

## **1.6 Justificación**

Debido a la cantidad y composición de los residuos sólidos orgánicos, deben eliminarse de forma controlada para evitar daños al medio ambiente. Aunque los rellenos sanitarios son la forma más

conocida y usada para la disposición de los residuos, también existen otras maneras que llegan a ser más respetuosas con el medio ambiente como, por ejemplo, el compostaje.

### ***1.6.1 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)***

Los ODS u Objetivos Globales fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamado a ponerle fin a la pobreza en el mundo, además de proteger el medio ambiente y garantizar para 2030 que todas las personas disfruten de un ambiente sano y de paz. [22]

El presente proyecto contribuye a la realización de los objetivos 11 y 12 principalmente.

#### **○ ODS 11-Ciudades y comunidades sostenibles**

Cada vez el mundo se encuentra más urbanizado. Para el año 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado migrando a las ciudades y se espera que para 2030 aumente hasta en un 60%. [22]

Aunque las principales ciudades del mundo contribuyen al aumento del PIB hasta en un 60%, estas también representan alrededor del 70% de las emisiones de carbono y más del 60% del uso de recursos. [22]

Dentro de este objetivo consideramos que contribuimos principalmente al cumplimiento de la meta 11,6 correspondiente a: «De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo». [22]

#### **○ ODS 12-Producción y consumo responsable**

El consumo y la producción mundial hace uso del medio ambiente natural y de los recursos de tal manera que tiene efectos destructivos sobre el planeta. Cada año, se estima que un tercio de la comida producida (alrededor de 1 300 millones de toneladas con un calor de 1 billón de dólares) se pudre en los contenedores de basura de los consumidores y los distribuidores, en el transporte e incluso en prácticas de recolección. [22]

Dentro de este objetivo consideramos que contribuimos principalmente al cumplimiento de las metas 12,3 y 12,5, las cuales corresponden a: «De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha» y «De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención reducción, reciclado y reutilización» respectivamente. [22]

Es importante recalcar que las metas de los ODS mencionadas anteriormente van muy de la mano con una propuesta de compostaje de desechos orgánicos ya que este proceso reduce la cantidad de desechos que van al vertedero, lo que reduce a su vez los costos de transporte, procesamiento y almacenamiento final de los desechos. Además, al no enviar residuos orgánicos a los vertederos, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano, que se producen durante el proceso de descomposición de los residuos orgánicos.

Además, el uso de compost para fertilizar el suelo reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos y pesticidas químicos, lo que reduce la contaminación del aire y el agua y protege la salud de los agricultores y las personas que viven cerca de las tierras de cultivo.

### ***1.6.2 Consejo Nacional de Política Económica y Social-CONPES***

El CONPES 3934 conocido como Política de Crecimiento Verde establece cinco ejes estratégicos en donde se incluye la generación de nuevas oportunidades económicas basadas en el uso sostenible del capital natural, la mejora del uso de los recursos naturales, la promoción de la innovación y la tecnología, la promoción de la inclusión social y la mejora de la gobernanza ambiental. La Política de Crecimiento Verde busca posicionar la riqueza natural del país como fuente de desarrollo sostenible, crecimiento económico e inclusión social. [23]

El otro documento CONPES y en el que se centra el presente documento es el número 3874 llamado Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, el cual presenta cuatro ejes estratégicos; el primero busca adoptar medidas encaminadas hacia la prevención de la generación de residuos, la promoción de la reutilización, el aprovechamiento y el tratamiento de

los residuos sólidos y evitar la generación de gases de efecto invernadero; el segundo eje apunta al mejoramiento de la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de los residuos sólidos para incrementar los niveles de separación en la fuente, el aprovechamiento y el tratamiento; y los dos ejes restantes se relacionan con la generación de un entorno institucional propicio para la coordinación entre actores, que promuevan la eficiencia en la gestión integral de los residuos sólidos. [24]

### **1.7 Marco legal**

Teniendo en cuenta la problemática de los residuos orgánicos en Bogotá, es necesario cumplir con una normativa dispuesta para la correcta disposición de los residuos en Colombia.

La principal norma aplicable es la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 “Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo en Colombia”, tiene por objetivo establecer los requisitos que se deben cumplir y los ensayos a los que deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abono o fertilizantes. Para la aplicación de esta norma es necesario tener en cuenta los siguientes documentos complementarios: [25]

**Tabla 4.***Normativa complementaria a la NTC 5167.*

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>NÚMERO DE REFERENCIA</b>
NTC 40	Fertilizantes y acondicionadores de suelo	[26]
NTC 202	Métodos cuantitativos para la determinación de potasio soluble en agua, en abonos o fertilizantes y fuentes de materias primas para su fabricación	[27]
NTC 234	Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo para la determinación cuantitativa del fósforo	[28]
NTC 326	Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo de granulometría en seco	[29]
NTC 370	Abonos o fertilizantes. Determinación de nitrógeno total	[30]
NTC 1154	Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Determinación de azufre	[31]
NTC 1927	Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Definiciones, clasificaciones y fuentes de materias primas	[6]
NTC 5527	Fertilizantes. Análisis físicos	[32]

**Nota.** Normas Técnicas Colombianas complementarias a la NTC 5167

Por otro lado, la Resolución 00150 del 21 de enero de 2003 del ICA, por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia, implementa un sistema de registro y control, basado en estándares internacionales, contribuyendo a una mejora en las condiciones de producción, comercialización, utilización y disposiciones final de desechos del país, elevando así los niveles de calidad, eficacia y seguridad para la salud humana y el ambiente. [33]

En cuanto al manejo y la disposición de los residuos sólidos en Colombia, la Ley 9 de 1979 dicta medidas sanitarias para la protección del medio ambiente, estableciendo las normas generales que servirán de base para las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitaria en lo que relaciona a la salud humana. También dicta los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del ambiente.[34]

Es importante mencionar que en el año 2019 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la resolución 2184 de 2019, “por la cual se modifica la resolución 668 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones”. [35] La resolución empezó a regir desde el primero de enero de 2021, en la cual se estableció la separación de los residuos en canecas y bolsas de color verde para residuos orgánicos aprovechables, blanco para residuos aprovechables y negro para residuos no aprovechables. En la figura 12 se presentan los diferentes colores con los residuos que deberían contener. Este nuevo código fue adoptado por los municipios y distritos que contengan programas de aprovechamiento en sus Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), permitiendo así la separación desde los hogares, preparando el país para la implementación de nuevos esquemas de aprovechamiento con la que nos vemos beneficiados todos los ciudadanos. [36]

**Figura 12.**

*Colores para la separación de residuos en Colombia.*



**Nota.** Código de colores de canecas o bolsas para la separación de residuos en Colombia. Tomado de: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Gobierno unifica el código de colores para la separación de residuos en la fuente a nivel nacional”. [En línea]. Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4595-gobierno-unifica-el-codigo-de-colores-para-la-separacion-de-residuos-en-la-fuente-a-nivel-nacional> [36]

## 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RESIDUOS

En el presente capítulo, se muestra la metodología basada en Normas Técnicas Colombianas que fue usada para la caracterización fisicoquímica de los residuos usados como materia prima en relación con los factores que más afectan el proceso de compostaje llevado a cabo (pH, porcentaje de humedad y porcentaje de cenizas). También se ilustra la ubicación del reactor y la zona destinada para la realización de la experimentación y finalmente se presentan los resultados obtenidos junto con su respectivo análisis.

### 2.1 Metodología

Para la experimentación se tomaron residuos de alimentos crudos y cocidos del ITC y de la Universidad de América (figura 13) y de esta última también se tomaron los residuos de poda. Una vez recolectados estos residuos fueron clasificados en alimentos crudos, alimentos cocidos y recortes de poda.

Antes de la caracterización fisicoquímica de los residuos fue necesario aplicar la NTC 5167 “Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo en Colombia” [25], con el fin de reducirles el tamaño de tal manera que se generara una pasta homogénea. (figura 14)

**Figura 13.**

*Residuos de alimentos cocidos.*



**Nota.** Residuos de alimentos cocidos tomados de la Fundación Universidad de América.

**Figura 14.**

*Residuos tras la molienda.*



**Nota.** Residuos crudos tras pasar por la molienda.



Posteriormente se aplicó la NTC 3674 de 2022 correspondiente a “Reducción del tamaño de muestras de agregados para la realización de ensayos” [37] con el fin de aplicar el método de muestreo por cuarteo y que la muestra que se tomara de la materia prima fuera representativa de todo el conjunto de residuos (figura 15). Para la toma de la muestra se optó por dividir el reactor en 3 zonas (figura 16) de las cuales se tomaban 10 gramos para finalmente obtener 30 gramos de muestra total del reactor.

**Figura 15.**

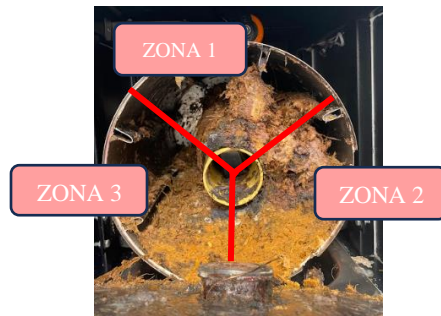
*Método de muestreo realizado a la mezcla de residuos.*



**Nota.** Método de muestreo por cuarteo aplicado a la mezcla de residuos cargada al reactor.

**Figura 16.**

*División zonas del reactor para la extracción de muestras.*

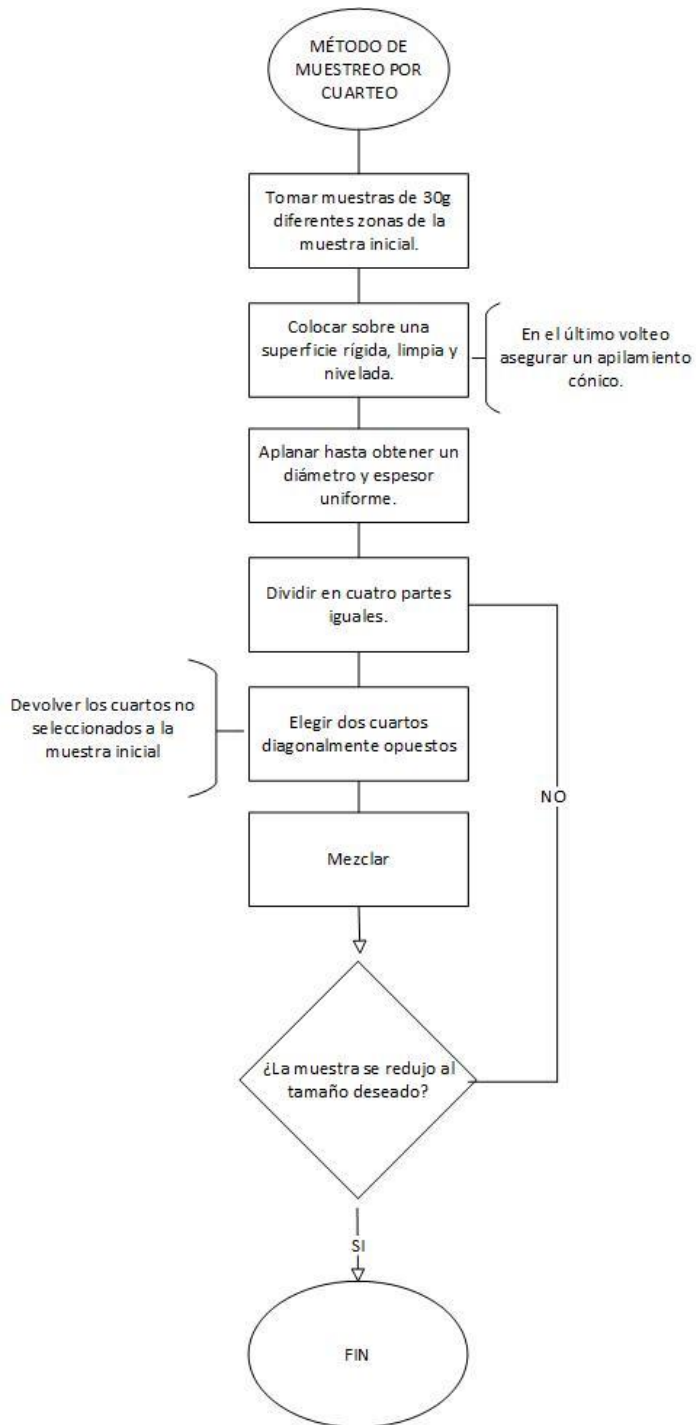


**Nota.** Zonas en las que fue dividido el reactor para la toma de muestras.

En la figura 17 se explica detalladamente el proceso llevado a cabo en la toma de las muestras para aplicar el método de muestro por cuarteo.

**Figura 17.**

*Diagrama método de muestreo por cuarteo.*



**Nota.** Diagrama del proceso para la aplicación del método de muestreo por cuarteo.

Una vez contando con la muestra se procede a realizar la caracterización fisicoquímica tomando nuevamente como guía la NTC 5167 [25], para realizar la medición de pH (figura 18), el porcentaje de humedad (figura 19) y el porcentaje de cenizas (figura 20).

**Figura 18.**

*Muestras listas día 1 para medición de pH.*



**Nota.** Muestras para la medición de pH del día 1 del proceso.

**Figura 19.**

*Muestras para la medición del porcentaje de humedad.*



**Nota.** Muestras sacadas de la estufa para la medición del porcentaje de humedad.

**Figura 20.**

*Muestra día medición de porcentaje de cenizas.*



**Nota.** Muestra sacada de la mufla para la medición del porcentaje de cenizas.

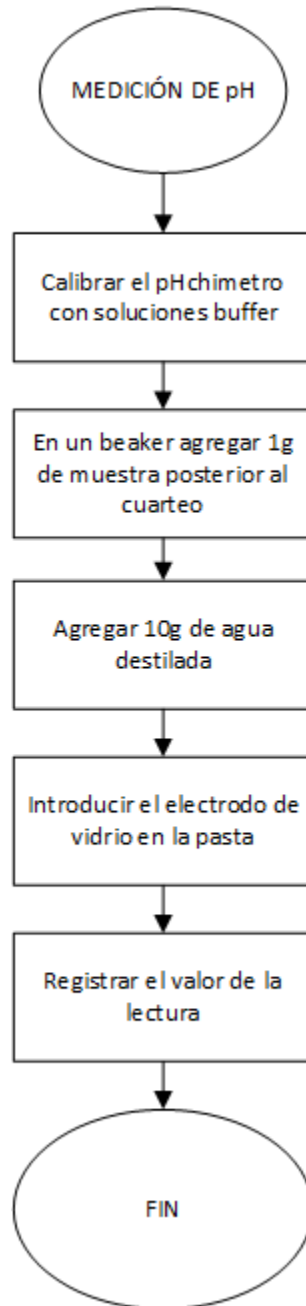
En cuanto a la medición del pH, antes de proceder con la caracterización de las muestras, se calibró el equipo limpiando el electrodo con agua desmineralizada; después se sumergió el electrodo en la solución de pH ácido (4,0). Se limpió nuevamente el electrodo y se sumergió en la solución de pH neutro (7,0) y finalmente se limpió una vez más y se sumergió en la solución de pH básico

(10). Todas las soluciones y el agua desmineralizada fueron proporcionadas por el auxiliar de laboratorio del ITC.

Una vez se tenía calibrado el equipo se procedió a realizar la medición de pH de los residuos teniendo en cuenta que según la NTC 5167 [25] se debe cumplir la relación 1:10 de residuos y agua destilada. En la figura 21 explica detalladamente el proceso de medición de pH aplicado.

**Figura 21.**

*Diagrama medición de pH.*

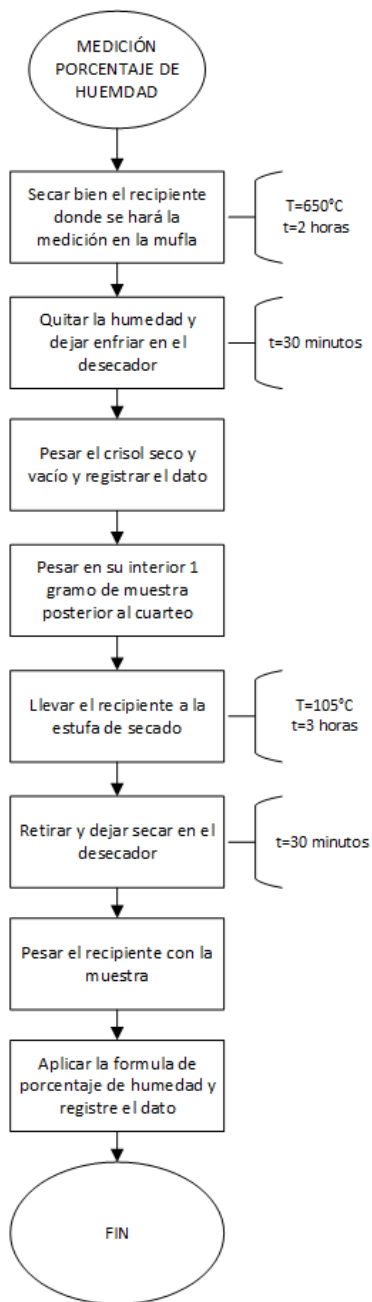


**Nota.** Diagrama del proceso llevado a cabo para la medición de pH.

Finalmente, en la figura 22 y 23 se explica detalladamente el procedimiento llevado a cabo para la medición del porcentaje de humedad y el porcentaje de cenizas respetivamente.

**Figura 22.**

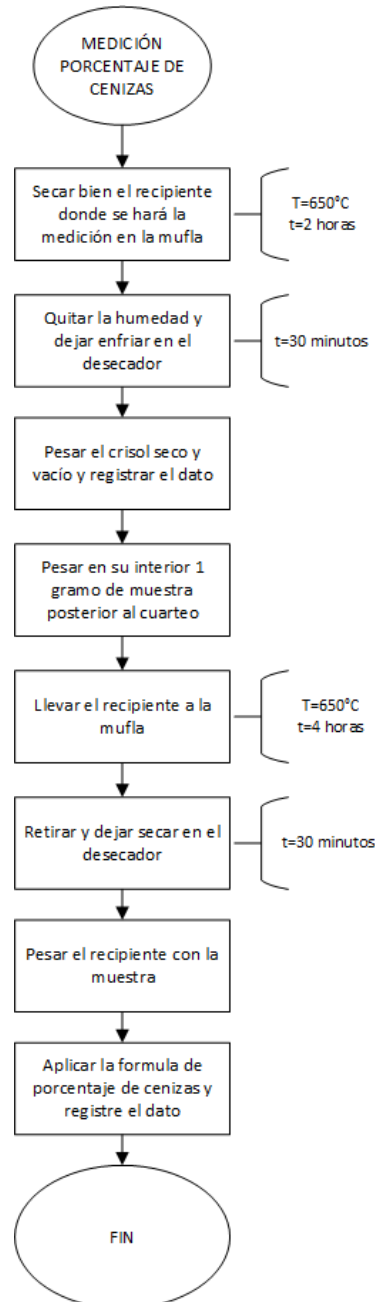
Diagrama de medición porcentaje de humedad



**Nota.** Diagrama del proceso llevado a cabo para la medición del porcentaje de humedad.

**Figura 23.**

Diagrama de medición porcentaje de cenizas.

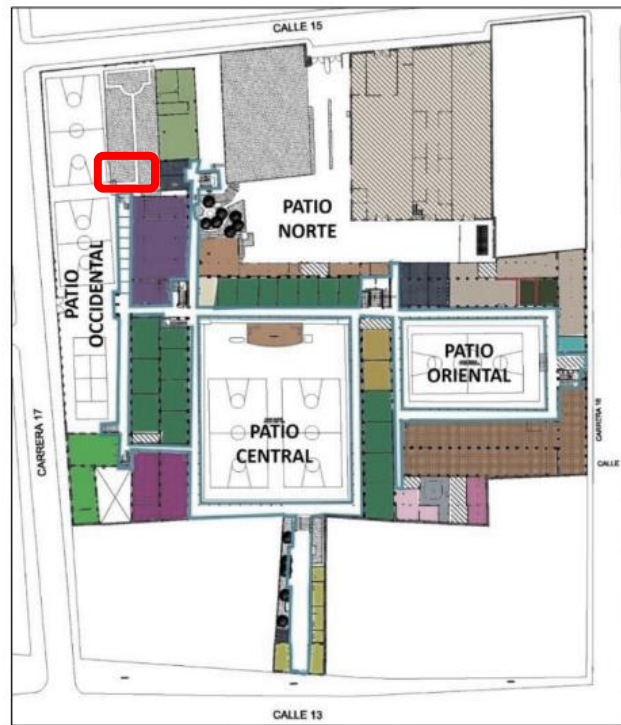


**Nota.** Diagrama del proceso llevado a cabo para la medición del porcentaje de cenizas.

Para esta parte del proyecto se seleccionó el ITC como el lugar en el cual se llevaría a cabo el proceso ya que allí estaba ubicado el reactor y se trasladaron equipos de la Universidad necesarios para la caracterización de la materia prima y del compostaje. El ITC está ubicado en Bogotá en la localidad de Los Mártires más exactamente en la dirección calle 13#16-74. La figura 24 es un mapa del primer piso del ITC y la zona marcada en rojo fue la seleccionada y acondicionada para la experimentación.

**Figura 24.**

*Ubicación del reactor en la experimentación.*



**Nota.** Mapa del primer piso del ITC. Tomado de: Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, “Infraestructura y planta física”. [En línea]. Disponible en: <https://etitic.edu.co/archives/areapf16.pdf> [38]

## **2.2 Resultados y análisis de la caracterización de la materia prima**

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con los de otros autores, se realizó la tabla 5 en la que se muestran los datos obtenidos de pH, porcentaje de humedad y porcentaje de cenizas correspondientes a las materias primas usadas.

Para determinar el porcentaje de humedad era necesario contar con el dato de la cantidad de masa que había quedado tras el secado en la estufa. Para el cálculo de dicha masa se le debía restar a la masa del crisol con muestra después del secado y enfriado, la masa del crisol sin muestra después del secado y el enfriado. A continuación, se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la muestra de residuos crudos.

$$\text{Masa seca de residuo} = \text{masa crisol con muestra seco} - \text{masa crisol seco}$$

$$\text{Masa seca de residuo} = 44,348g - 43,726g$$

$$\text{Masa seca de residuo} = 0,622g$$

Conociendo este dato, se aplicaba la ecuación del porcentaje de humedad (ecuación 1) descrita en la NTC 5167. [25]

$$\%humedad = \frac{\text{peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca}}{\text{peso muestra húmeda}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\% humedad = \frac{5g - 0,622g}{5g} \times 100\%$$

$$\%humedad = 87,56\%$$

El anterior procedimiento matemático fue replicado para los demás residuos.

En cuanto al porcentaje de cenizas, nuevamente era necesario conocer la masa de residuos tras la calcinación en la mufla. Este valor se determinó restándole a la masa del crisol con muestra después de la calcinación, la masa del crisol seco y vacío. A continuación, se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para la muestra de residuos crudos.

$$\text{Masa residuos calcinados} = \text{masa crisol con muestra calcinada} - \text{masa crisol seco}$$

$$\text{Masa residuos calcinados} = 43,800g - 43,726g$$

$$\text{Masa residuos calcinados} = 0,074g$$

Conociendo este dato, se aplicaba la ecuación del porcentaje de humedad (ecuación 2) descrita en la NTC 5167. [25]



$$\% \text{ cenizas} = \left[ \frac{\text{peso final residuo}}{\text{peso inicial residuo}} \times 100 \right] \times \left[ \frac{100 - \% \text{ humedad}}{100} \right] \quad (2)$$

$$\% \text{ cenizas} = \left[ \frac{5g}{0,074g} \times 100 \right] \times \left[ \frac{100 - 87,56\%}{100} \right]$$

$$\% \text{ cenizas} = 0,184\%$$

El anterior procedimiento matemático fue replicado para los demás residuos.

Las tablas donde se registraron los datos necesarios para aplicar las ecuaciones de porcentaje de humedad y porcentaje de cenizas para los tres residuos usados como materia prima, se encuentran disponibles en el anexo 1.

**Tabla 5.**

*Principales características fisicoquímicas obtenidas para las materias primas usadas.*

	<b>pH</b>	<b>%Humedad</b>	<b>%Cenizas</b>
<b>RESIDUOS CRUDOS</b>	4,05	87,56	0,184
<b>RESIDUOS COCINADOS</b>	5,45	69,66	0,210
<b>RESIDUOS DE PODA</b>	7,30	81,89	0,728

**Nota.** Tabla con las principales características fisicoquímicas de los residuos usados como materia prima en el proceso.

Teniendo en cuenta la tabla 1 presentada en generalidades, se puede observar que la humedad tanto de los residuos crudos como los residuos cocidos estaban dentro del rango general presentado por el autor del libro “On-farm composting handbook”. [19] Sin embargo, el porcentaje humedad óptimo de la materia prima usada para compostaje debe estar ente el 40% y el 64% [3] por lo que en este caso no cumplía con las condiciones óptimas generando así un ambiente anaerobio en el que se impide el correcto crecimiento de microorganismos que degradan la materia orgánica.

Por otro lado, comparando los resultados obtenidos con las condiciones aceptables e ideales de las características de la materia prima usada para el proceso de compostaje presentadas en la tabla 2 del capítulo 1, se puede decir que con respecto al porcentaje de humedad no cumplió las condiciones debido a que el máximo aceptable es 65% y el máximo de la materia prima que se usó para el proceso fue de 87,56% estando así 22,65 puntos porcentuales por arriba del aceptable.

En cuanto al pH, los residuos crudos y cocinados se encuentran 1,45 y 0,05 por debajo del rango aceptable, sin embargo, los residuos de poda si cumplieron las condiciones para estar dentro del rango ideal. Si tenemos en cuenta el rango óptimo descrito por el autor del libro “Composting. Science and technology” [39] tanto los residuos cocinados como los de poda cumplen el criterio de estas entre 5,5 y 8,0.

Es importante tener en cuenta que el efecto del pH en el proceso de compostaje suele ser menor que por ejemplo la humedad.

La influencia de las variables en el proceso de compostaje será ampliada en el siguiente capítulo.

### **3. VARIABLES Y PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE Y DISEÑO EXPERIMENTAL**

Existen diversos factores que pueden afectar el proceso de compostaje, por lo que en este capítulo se mencionan y explican los más relevantes. Por otro lado, se muestra el diseño experimental que se llevó a cabo para la realización del proyecto, las características del reactor utilizado y los resultados obtenidos junto con su respectivo análisis.

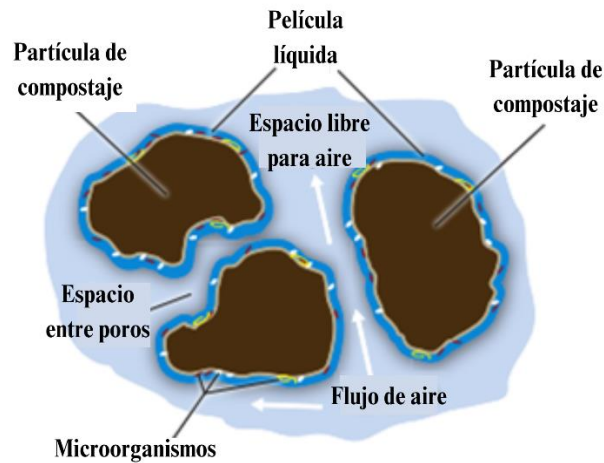
#### **3.1 Variables y parámetros en el proceso de compostaje**

Las pilas de compostaje se componen principalmente de partículas sólidas con espacios de poros entre las partículas llenas de aire, gases y agua. Se puede imaginar que la partícula está rodeada de líquido con gases que ocupan un espacio entre ella (Figura 25). La mayor parte de la descomposición aeróbica se da dentro de la película líquida, especialmente cerca de la superficie en donde se encuentran los nutrientes. Los microorganismos usan el oxígeno disponible en la película líquida mientras descomponen los compuestos orgánicos que están cerca de la superficie de la partícula. El oxígeno se puede movilizar fácilmente como gas a través de los espacios entre los poros los cuales están llenos de aire, sin embargo, el oxígeno se puede difundir lentamente a través de la fracción líquida y sólida de la partícula. Es importante tener en cuenta que los microorganismos también están activos en el interior de la partícula, por lo que reduce su tamaño a medida que dichos microorganismos van descomponiendo la materia.[3]

Los principales factores o variables que afectan el proceso de compostaje se presentan a continuación:

**Figura 25.**

*Entorno de las partículas del compostaje.*



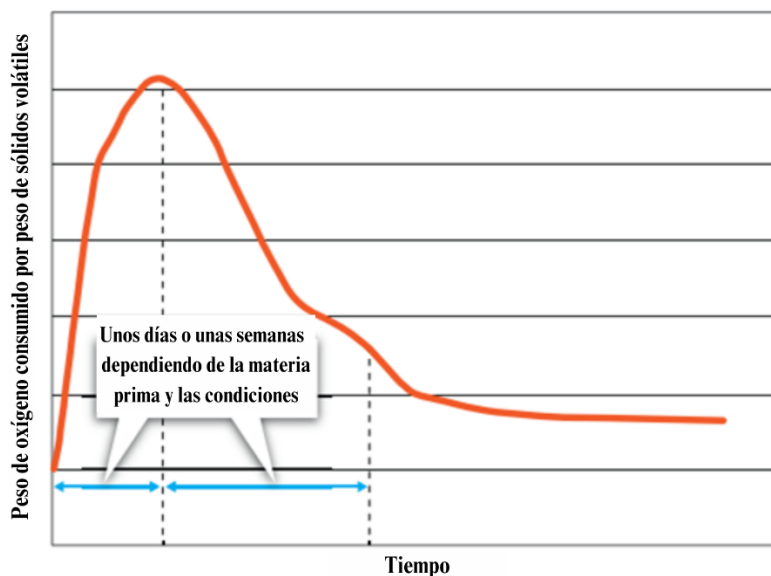
**Nota.** Representación de las partículas de compostaje y el espacio que existe entre ellas. Tomado de: R. Rynk “The composting handbook” (2022). Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

### **3.1.1 Oxígeno y aireación**

El proceso de compostaje aeróbico requiere de grandes cantidades de oxígeno. Por ejemplo, 1ft<sup>3</sup> de recortes de pasto puede requerir de hasta 10 000ft<sup>3</sup> de aire para realizar la conversión de carbono. Los primeros días del proceso los componentes que se degradan más fácil se metabolizan, por lo que la necesidad de oxígeno, la producción de calor, vapor, agua y otros gases son mayores. Después del este pico, la tasa de compostaje y el consumo de oxígeno disminuye a lo largo del proceso. Se espera que después de un volteo el patrón sea similar. En la figura 26 se muestra la curva de consumo de oxígeno a lo largo del proceso. [3]

**Figura 26.**

*Curva del consumo de oxígeno durante el proceso de compostaje.*



**Nota.** Curva del consumo típico de oxígeno en el proceso de compostaje. Tomado de: R. Rynk “ The composting handbook” (2022). Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

En el caso en que la disposición del oxígeno no sea la óptima, el proceso se vuelve anaeróbico. Este tipo de proceso genera una variedad de compuestos volátiles, incluyendo metano, ácidos grasos orgánicos, sulfuro de hidrógeno, entre otras generando olores fuertes que incluso pueden llegar a ser tóxicos para las plantas. Cuando se acumulan estos compuestos, se pueden liberar al ambiente sobre todo durante el volteo, en concentraciones notables. Es importante tener en cuenta que los niveles de oxígeno pueden variar dependiendo de los métodos y operaciones usadas para realizar el proceso. El oxígeno que se suministra durante el proceso de compostaje se da mediante la aireación ya sea forzada o pasiva. A medida que el aire se mueve por la pila de desechos para el compostaje se suministra oxígeno, se elimina el exceso de agua, el calor, el dióxido de carbono y otros gases que se producen. [3]

La convección y la difusión son los mecanismos por los cuales el oxígeno para del aire a una matriz de compostaje y, finalmente a los microorganismos. El transporte de oxígeno está íntimamente relacionado con el contenido de humedad del compostaje, ya que, tanto en la convección como en la difusión, cuando hay gran cantidad de agua se reducen los poros. [40]

Normalmente el oxígeno se pone a disposición de la masa a través de ventiladores los cuales, además de proporcionar oxígeno a la masa, controla la temperatura y la humedad. En una pila de compostaje a 60°C, la cantidad de aire necesaria para controlar la temperatura y reponer el CO<sub>2</sub> consumido es de 9:1, a menor temperatura la proporción aumenta. [29]

La cantidad de oxígeno que se debe suministrar durante el proceso de compostaje depende de:

- **Etapa del proceso:** Durante la primera etapa del proceso es necesario suministrar oxígeno, mientras que en las fases finales se puede suministrar para contribuir a la disminución de la temperatura, pero con un flujo mucho menor al que se inyectó en la etapa inicial. [41]
- **Materia prima utilizada:** El proceso de compostaje que utiliza como materia prima residuos densos y/o ricos en nitrógeno como por ejemplo los recortes de poda requieren de un mayor flujo de oxígeno durante el proceso. [41]
- **Tamaño de partícula de la materia prima utilizada:** Los residuos que tiene un tamaño de partícula pequeño se suelen compactar, reduciendo el espacio vacío e inhibiendo el movimiento de oxígeno por lo que la materia prima no debe triturarse demasiado. [41]
- **Contenido de humedad de la materia prima:** Los residuos que tienen un alto contenido de humedad como por ejemplo los residuos de comida y los recortes de poda requieren de mayor flujo de oxígeno durante el proceso de compostaje. [41]

Sin embargo, es importante no suministrar aire en exceso ya que puede secar la pila de residuos e impedir la correcta realización del proceso de compostaje.

La estrategia más eficiente y económica para aumentar la concentración de oxígeno es el volteo generando aireación. [16] La aireación puede realizarse mediante sopladores mecánicos, ventiladores, una red de tuberías, empuje o manual. A medida que el aire se mueve por la pila, se suministra oxígeno, se elimina el agua disminuyendo así la temperatura, el calor, el dióxido de carbono y demás gases que se producen dentro de la pila incluyendo los olores. [3]

### **3.1.2 Humedad**

Es de los factores más importante a la hora de realizar el proceso de compostaje. La materia prima debe tener un contenido de humedad entre el 40% y el 65%, dependiendo de qué residuos se usó.

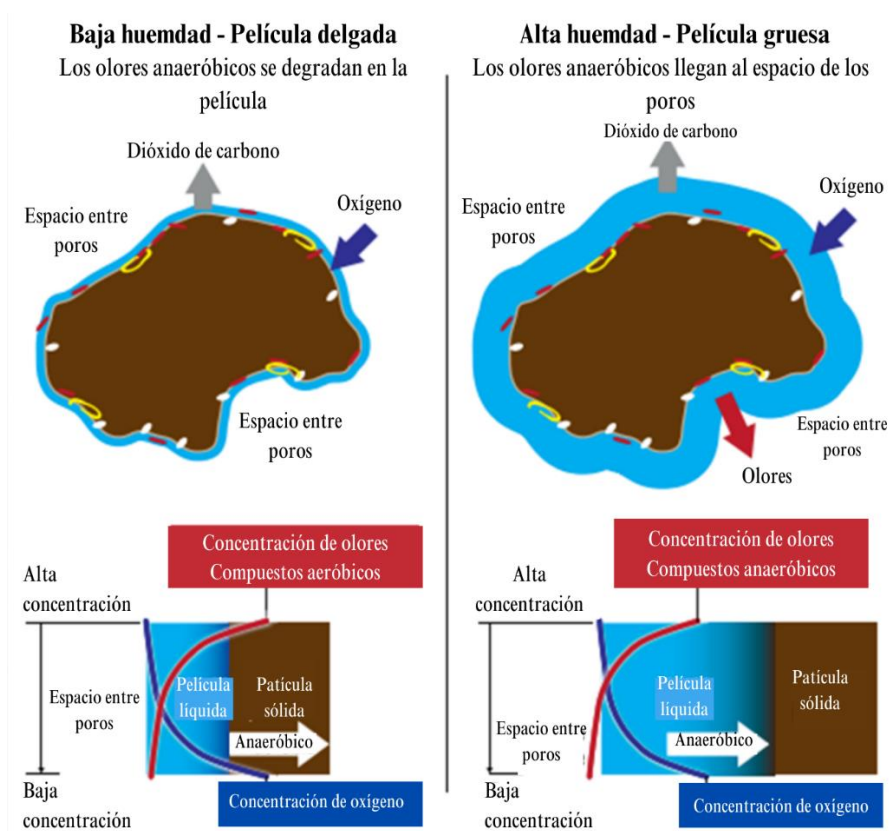
Si el contenido de humedad es muy bajo ralentiza la actividad biológica e incluso la detiene, pero si es muy alto interfiere en la aireación y la transferencia de oxígeno. [3]

El agua es fundamental para la actividad biológica ya que envuelve las partículas de la pila de compostaje apoyando los procesos metabólicos de los microorganismos. El agua también proporciona un medio para llevar a cabo las reacciones químicas, disuelve y transporta nutrientes y permite que los microorganismos se muevan. A medida que aumenta el contenido de humedad, la película de líquido que rodea las partículas sólidas se vuelve más gruesa por lo que el oxígeno y el dióxido de carbono se difunden más lentamente dentro y fuera de la película. Puesto que el oxígeno se difunde hasta 10 000 veces más lentamente en agua que el aire, tener una capa gruesa de líquido (en este caso agua) proporciona una actividad anaeróbica.[3]

En la figura 27 se observa que a medida que aumenta el contenido de humedad, se genera una gran película de agua que rodea la partícula provocando la lenta difusión de oxígeno y dióxido de carbono contribuyendo en la generación un ambiente anaeróbico en el que no se descomponen por completo la materia prima, además de que se producen malos olores, aunque estos últimos pueden sacarse de la pila de compostaje mediante un mecanismo de escape. [3]

**Figura 27.**

*Efecto de una alta concentración de humedad en el transporte de oxígeno.*



**Nota.** Influencia de la película de agua que recubre las partículas de compostaje y cómo afecta el transporte de oxígeno. Tomado de: R. Rynk “ The composting handbook” (2022). Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

Cuando se tienen porcentajes de humedad por encima del 65%, el agua desplaza gran parte del aire contenido entre los espacios de los poros de la materia prima reduciendo el movimiento del aire dentro y a través de los poros fomentando aún más las condiciones anaeróbicas. El alto contenido de humedad provoca la sedimentación, compactación y pérdida de espacio de los poros dentro de la pila de compostaje. [3]

El protoplasma de las células de los microorganismos y los residuos que componen la materia prima del compostaje deben contener al inicio del proceso alrededor del 50% de humedad para que aumente la población microbiana. El contenido de humedad por encima del 60% puede generar condiciones aeróbicas, retrasando el proceso, aumentando olores y produciendo lixiviados que disminuyen los nutrientes del compost. [16]



Al final del proceso, el contenido de agua debe ser lo suficientemente bajo (alrededor del 30%) para así evitar cualquier actividad biológica en el producto obtenido ya estabilizado. Toda actividad microbiana se detiene cuando el contenido de humedad está entre un 8 a 12% por lo que cada vez se vuelve un limitante del proceso. En la práctica el contenido de humedad que se debería mantener durante el proceso es por encima del 40%. [39]

### **3.1.3 pH**

El pH preferido para los microorganismos presentes durante el proceso está en el rango de 6,5 a 8 pero puede variar dependiendo de la diversidad microbiana y la capacidad de amortiguación natural del proceso haciendo posible trabajar en un rango de pH más amplio en niveles de 5,5 a 9 e incluso un pH neutro (7). Un pH extremadamente bajo (menor a 5,5) puede presentarse en las primeras etapas del proceso sin embargo no debe mantenerse ya que obstaculiza el proceso; cuando por el contrario el pH es muy alto fomenta la volatilización de amoníaco y perjudica la calidad del compostaje final. [3]

Durante la primera etapa del proceso el pH disminuye por los ácidos grasos producto de la asimilación de los microorganismos sobre la materia orgánica más fácilmente oxidable. En la segunda etapa el pH aumenta debido al uso de los ácidos orgánicos producidos en la primera etapa por parte de los microorganismos y por la generación de amoníaco generado por la hidrólisis de proteínas. Finalmente, el pH se estabiliza con valores cercanos a la neutralidad produciendo compuestos húmicos, los cuales se comportan como una solución buffer. [16]

Durante el proceso, el nivel de pH en la pila no presenta cambios significativos. En términos generales, el pH disminuye al comienzo del proceso (menos de 5,0) como consecuencia de la actividad de las bacterias que forman ácido que descompone el material carbónico complejo en ácidos orgánicos como productos intermedios. Cuando esta fase de acidificación ha finalizado y los metabolitos intermedios se mineralizan por completo, el pH tiende a aumentar y estabilizarse con un valor entre 8 y 8,5. En términos generales el rango de pH en el proceso de compostaje es tan amplio que rara vez se presentan dificultades que se le puedan atribuir al pH. [39]

### **3.1.4 Temperatura**

La temperatura tiene un efecto importante en la composición y la actividad de los microorganismos, así como en las reacciones químicas que se llevan a cabo las cuales ocurren más rápido a temperaturas más altas, acelerando la descomposición y con ello aumentando la producción de calor. A mayor temperatura, mayor demanda de oxígeno, se desinfectan los materiales y se promueve la evaporación de los compuestos volátiles. A menor temperatura el proceso ocurre más lento pero los nutrientes se conservan, la materia prima se descompone más lento y la emisión de olores es menor. [3]

A medida que aumenta la temperatura, se aceleran los procesos metabólicos y la descomposición de la materia orgánica de manera directa hasta alcanzar el punto crítico, en el que el proceso se ralentiza. Esto último ocurre debido a la desnaturalización de las proteínas que bloquean el metabolismo de los microorganismos presentes en el compostaje. [16]

Durante el proceso, la comunidad microbiana sigue un patrón predecible, presentando poblaciones mesófilas (temperatura menor a 45°C), termófilas (temperatura mayor a 45°C y termotolerantes (pueden sobrevivir en diferentes rangos de temperatura). [3]

Las variaciones de temperatura durante el proceso de compostaje deben estar entre los 20 y 70°C, siendo esta última la máxima necesaria para la erradicación de formas vegetativas y de microorganismos, parásitos y patógenos. Por debajo de los 20°C, las reacciones se retrasan de manera considerable. Aunque la temperatura óptima para el proceso es entre 45 y 60°C, cada microorganismo (bacterias y hongos) tiene una temperatura óptima en la que crece y se ven favorecidas sus reacciones de oxidación de la materia orgánica. [16]

En términos generales la temperatura es un indicador de la etapa por la que está pasando el proceso, así como de la velocidad de descomposición de la materia prima que conforma el compostaje y del funcionamiento de los equipos tales como el de aireación y rotación en el sistema.

### **3.1.5 Relación carbono-nitrógeno (C:N)**

El carbono es el compuesto básico en casi todos los compuestos orgánicos y la materia prima del compostaje no es la excepción. Los microorganismos usan el carbono tanto para energía como para crecimiento. Por otro lado, el nitrógeno es un elemento importante para la producción de proteínas y para la reproducción celular. Todos los organismos contienen entre 10 y 15 unidades

de carbono por cada unidad de nitrógeno en peso. Sin embargo, debido a que los organismos respiran continuamente y pierden carbono como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se requiere consumir hasta 25 veces más carbono que nitrógeno. La relación C/N indica el peso elemental del carbono presente en relación con el peso elemental del nitrógeno. [3]

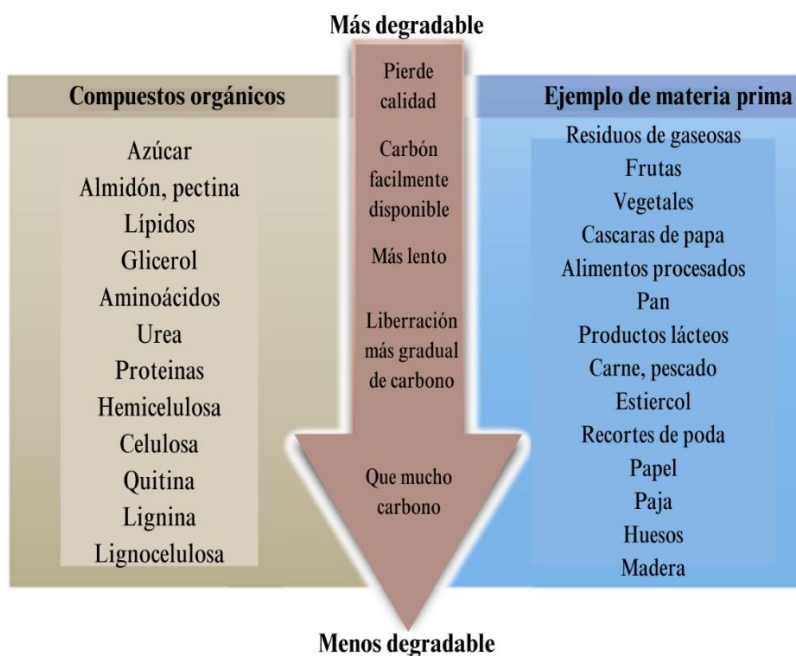
La materia prima individual o la mezcla con una relación C:N de 25:1 hasta 40:1 se considera óptima para el proceso de compostaje. Con este rango de relación C:N se tiene suficiente nitrógeno como para promover la reproducción y el crecimiento de microorganismos y suficiente carbono como para sostener el proceso y al tiempo conservar el nitrógeno. Es importante tener en cuenta que las relaciones iniciales de C:N de 20:1 a 60:1 generalmente resultan en un proceso de compostaje exitoso. En las relaciones C:N de 20:1 el proceso es más rápido, sin embargo, los microorganismos usan el carbono disponible sin convertir todo el nitrógeno disponible en compuestos celulares. El exceso de nitrógeno provoca un compuesto de nitrógeno inorgánico como el amoníaco o el óxido nitroso, los cuales pueden volatilizarse. La relación C:N es una guía importante pero no perfecta para equilibrar estos dos compuestos. [3]

Si la relación C:N tiene valores por encima de 40:1 la actividad microbiana se ve afectada por la falta de nitrógeno necesario para la biosíntesis de aminoácidos presentes en las proteínas. Cuando, por el contrario, la materia prima o la mezcla de residuos tiene valores muy bajos (por debajo de 20:1), el proceso se lleva a cabo con mayor rapidez, aunque se libera nitrógeno en forma de amoníaco disminuyendo así su concentración en el producto final. [16]

La relación C:N es importante pero imperfecta a la hora de tratar de equilibrar estos dos nutrientes. También es importante tener en cuenta que como se muestra en la figura 28 los residuos que contiene carbono se descomponen biológicamente a diferentes velocidades. Por ejemplo, la paja se descompone y libera el carbono a los microorganismos mucho más fácil que el aserrín. Esto debido a que la paja es principalmente celulosa, mientras que los compuestos de carbono en el aserrín y en los materiales leñosos están unidos por la lignina que es resistente a la descomposición biológica. [3]

**Figura 28.**

*Degradabilidad relativa de los compuestos orgánicos.*



**Nota.** Degradabilidad de algunos compuestos orgánicos. Tomado de: R. Rynk “ The composting handbook” (2022). Cap 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook> [3]

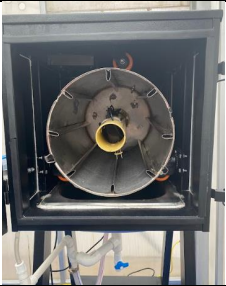




### 3.2 Diseño experimental

Para la realización de la experimentación se hizo uso de un reactor de laboratorio instalado en el ITC en la zona marcada en rojo en la figura 24. A continuación de se presentan los equipos, metodología y resultados obtenidos.

#### 3.2.1 Equipos

Los principales equipos usados para la caracterización fisicoquímica de los residuos se encuentran en la tabla 6 y en el anexo 2 están los demás instrumentos complementarios.

**Tabla 6.***Resumen de equipos usados en la experimentación.*

<b>EQUIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMAGEN</b>
Reactor	Reactor instalado en el ITC, cuenta con medidor de pH, temperatura de entrada y temperatura del proceso, generación y salida de O <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, flujo de aire, sistema de rotación, humidificador, bomba de recirculación y sistema de rotación.	
Molienda o procesador de alimentos	Fabricado en acero inoxidable, con capacidad para 12 litros, todos de 1,2 hp a 110V, control de velocidad, desmontable.	
Estufa	Cámara de trabajo y rejillas en acero inoxidable, pantalla táctil, trampilla extraíble de convección forzada ajustable en pasos, temporizador digital entre 1 minutos, 23 horas y 99 días, rango de temperatura de 20°C hasta 80°C, capacidad de 53 litros y carga máxima de 80 kilo gramos.	
Mufla	Capacidad de 9,5 litros, cabina interna y puerta aislada con placa cerámica, control de temperatura mediante pirómetro digital, potencia de 3000 W, rango de temperatura de 50°C a 900°C.	
pH-metro	Medidor portátil de pH con intervalo de pH de 0,00 a 0,14, intervalo de temperatura de 0,0 a 60,0 °C, sonda multiparamétrica pre-amplificada con cuerpo de PV, sensor interno de temperatura, conector DIN y 1 metro de cable, duración aproximada de 500 horas de uso continuo y apagado automático después de 8 minutos de inactividad.	

**Nota.** Principales equipos usados para la caracterización fisicoquímica de la materia prima y la mezcla de residuos.

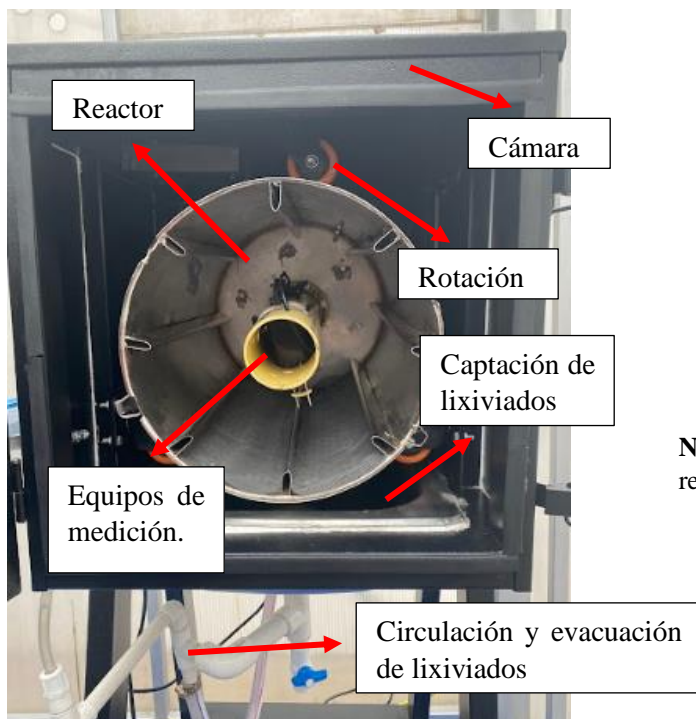
El reactor estaba contenido en un cámara para mantener aislado el sistema y el proceso que se lleve a cabo en su interior (figura 29). También, contaba con un sistema que le permitía inclinarse, facilitando la carga

de los residuos, los cuales, una vez cargados, se cerraba la tapa con la que contaba el reactor y la cámara, se conectaba a una fuente de energía y se procedía a su programación. Para dicha programación fue necesario el apoyo del encargado del funcionamiento del reactor en el ITC. En la parte lateral de la cámara del reactor estaba ubicada una pantalla en la que se realizaba toda la programación (figura 30).

Además, las características anteriores, el equipo contaba con un sistema de rotación (figura 29) que favorecía la mezcla de los residuos junto con la disminución de la temperatura y el contenido de humedad. También contaba con un humidificador, el cual ingresaba vapor de agua al sistema cuando se registraba una disminución en el contenido de humedad. Así mismo, tenía una bomba de recirculación de lixiviados la cual se ponían en marcha cuando el sistema disminuía su contenido de humedad. Finalmente, el cilindro interior contenía equipos de medición de pH y temperatura.

**Figura 29.**

*Vista frontal reactor.*



**Nota.** Vista frontal del reactor y sus respectivas partes.

### 3.2.2 Metodología

Por motivos de facilidad a la hora de cargar el reactor y contribuir a su rotación, se decidió cargar el 70% de su capacidad total. Para conocer este valor, inicialmente se calculó el volumen efectivo del reactor, el cual, como se aprecia en la figura del reactor en la tabla 6 contaba con un cilindro

**Figura 30.**

*Pantalla programadora del reactor.*

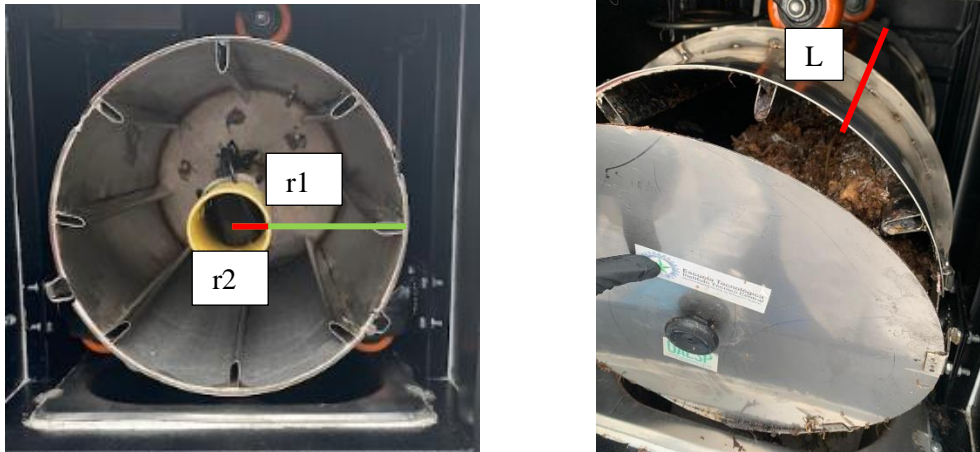


**Nota.** Pantalla de programación de parámetros del reactor.

en su interior, en el que estaban los medidores de las diferentes variables. La determinación de la longitud del reactor junto con los radios de los cilindros que componían el reactor se hizo con apoyo de una cinta métrica suministrada por el auxiliar de laboratorio de ITC. El esquema, las medidas y el volumen de los cilindros se presentan en la figura 31 y en la tabla 7.

**Figura 31.**

*Vista frontal y lateral con mediciones del reactor*



**Nota.** Vista frontal y lateral del reactor junto con la ilustración de los radios y la longitud del mismo.

Para el cálculo del volumen del cilindro interior y exterior se aplicó la ecuación de volumen de un cilindro (ecuación 3) y posteriormente se restaron dichos volúmenes para obtener el volumen efectivo del reactor de esta manera:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l \quad (3)$$

$$\text{Para } r1 \rightarrow V_1 = \pi \cdot 170\text{cm}^2 \cdot 54\text{cm}$$

$$\text{Para } r1 \rightarrow V_1 = 49\,027,7\text{cm}^3$$

$$\text{Para } r2 \rightarrow V_2 = \pi \cdot 3,7\text{cm}^2 \cdot 54\text{cm}$$

$$\text{Para } r2 \rightarrow V_2 = 2\,322,4\text{cm}^3$$

$$\text{Volumen efectivo} \rightarrow V = V_1 - V_2$$

$$\text{Volumen efectivo} \rightarrow V = 49\,027,7\text{cm}^3 - 2\,322,4\text{cm}^3$$

$$\text{Volumen efectivo} \rightarrow V = 46\,705,3\text{cm}^3$$

Es importante recordar que el volumen real representa el espacio que ocupa un cuerpo en determinado recipiente; mientras que el volumen efectivo es el espacio que ocupa un cuerpo, pero el recipiente que lo contiene puede estar dispuesto con ciertos accesorios, en este caso, se habla de un reactor cilíndrico que en su interior contiene otro cilindro de menor radio. [61]

**Tabla 7.**

*Características del reactor.*

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
r1 (Radio cilindro exterior)	mm	170
r2 (Radio cilindro interior)	mm	37
l (Longitud del reactor)	mm	540
V1 (Volumen cilindro exterior)	cm <sup>3</sup>	49 027,7
V2 (Volumen cilindro interior)	cm <sup>3</sup>	2 322,4
V (Volumen efectivo del reactor)	cm <sup>3</sup>	46 705,3

**Nota.** Principales medidas del reactor.

Posteriormente, se calculó la densidad aparente de los residuos (poda, crudos y cocinados) mediante una probeta y una balanza analítica. Inicialmente se registraba la masa de la probeta vacía, después se agregaba el residuo al interior hasta un volumen seleccionado (en este caso fue 100 ml) de la probeta sin ejercer presión sobre el residuo ya que la densidad aparente es la relación entre la masa y el volumen de una muestra. Dicho volumen es el que ocupa el sólido, incluyendo los espacios entre los poros. Esta densidad depende de la forma de las partículas, su composición estructural y el método de almacenamiento. [54] Una vez se tenía la masa de la probeta vacía y llena se aplicó la ecuación 4 para determinar la densidad de los residuos. Los datos necesarios para el cálculo de la densidad están disponibles en el anexo 1.

$$\rho = \frac{\rho_{\text{probeta llena}} - \rho_{\text{probeta vacía}}}{V_{\text{probeta}}} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{crudos}} = \frac{156,70\text{g} - 51,20\text{g}}{100\text{ml}}$$

$$\rho_{\text{crudos}} = 1,055 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$\rho_{\text{crudos}} = 1\,055 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



El anterior procedimiento matemático fue replicado para los demás residuos.

Al contar con la densidad de los residuos, se aplicó la ecuación 5 para determinar así la densidad de toda la mezcla de residuos. En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos.

$$\rho_{mezcla} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n} \quad (5)$$

En donde n es la cantidad de sustancias que componen la mezcla.

$$\rho_{mezcla} = \frac{1\,055 \frac{kg}{m^3} + 1\,039 \frac{kg}{m^3} + 258 \frac{kg}{m^3}}{3}$$

$$\rho_{mezcla} = 784 \frac{kg}{m^3}$$

**Tabla 8.**

*Densidad de los residuos y de la mezcla de residuos.*

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Densidad residuos crudos	kg/m <sup>3</sup>	1 055
Densidad residuos cocinados	kg/m <sup>3</sup>	1 039
Densidad residuos de poda	kg/m <sup>3</sup>	258
Densidad de la mezcla	kg/m <sup>3</sup>	784

**Nota.** Densidades calculadas de los residuos y de la mezcla de residuos.

Finalmente, contando con la densidad y el volumen de la mezcla de los residuos, se despeja la masa, obteniendo como resultado que la capacidad máxima en masa del reactor es de 36,61 kg; sin embargo, como se mencionó anteriormente, solo se cargó el 70% de la capacidad del reactor, correspondiente a 25,62 kg de la mezcla de residuos.

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow m = \rho \cdot v$$

$$Masa\ total\ reactor = 784 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0467\ m^3$$

$$Masa\ total\ reactor = 36,61\ kg$$

La cantidad de residuos cargados al reactor junto con su respectivo porcentaje, se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9.**

*Cantidad de residuos cargados al reactor.*

<b>RESIDUO</b>	<b>MASA (kg)</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
Residuos crudos	3,876	15,13
Residuos cocinados	17,57	68,57
Residuos de poda	4,189	16,35

**Nota.** Cantidad de residuos cargados al reactor.

Tras la realización de estos cálculos, se procedió a cargar el reactor y se inició con la medición de las características fisicoquímicas de la mezcla. Para estas mediciones se siguió con la metodología aplicada para la caracterización de la materia prima explicada en el capítulo anterior en la sección metodología.

Para la comparación de los resultados experimentales, se decidió enviar una muestra de los residuos al inicio y al final de la experimentación al laboratorio Agrilab, el cual, es un laboratorio especializado en análisis fisicoquímicos de aguas, material vegetal, suelo, fertilizantes minerales y abonos orgánicos ubicado en la ciudad de Bogotá, más exactamente en la calle 79b#70-16. Para el envío de la muestra, se extrajo del reactor una sección de 100 gramos de residuos de diferentes zonas al inicio y al final de la experimentación y se almacenaba en bolsas resellables, se rotulaban según las indicaciones del laboratorio (nombre de la muestra, fecha y hora de la toma y cantidad de muestra) y se hacía el envío. Este laboratorio, usa como referencia la misma norma que se usó de guía para la caracterización fisicoquímica de los residuos y de la mezcla durante el proceso de compostaje (NTC 5167) [25]. Los resultados presentados por el laboratorio para el inicio de la experimentación se encuentran en el anexo 4

El reactor arrojaba datos de mediciones cada minuto, sin embargo, con el fin de sintetizar la información, se decidió agrupar todos los datos por día de medición (en total por día eran 1 440 datos). Para poder tabular y graficar un solo valor se promedió el total de los datos arrojados en un solo día. El procedimiento se aplicó para todos los factores presentados a continuación.

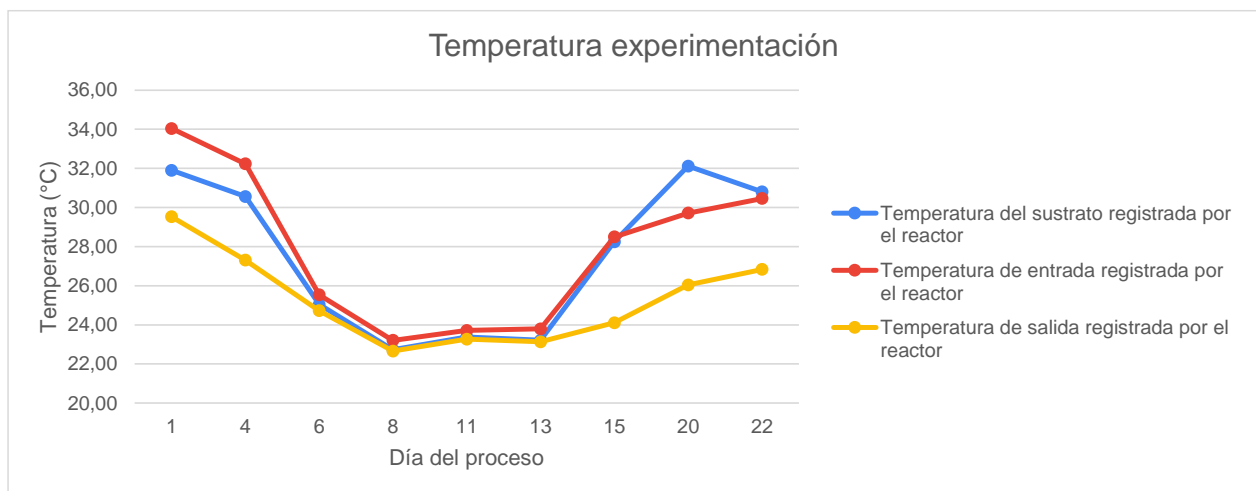
### 3.2.3 Resultados y análisis

Como fue mencionado anteriormente el reactor contaba con diferentes equipos internos que proporcionaban datos de temperatura, porcentaje de humedad, emisiones de dióxido de carbono, oxígeno y ácido sulfhídrico del sustrato.

- **TEMPERATURA:** En las tablas 17, 18 y 19 contenidas en el anexo 3 se presentan las temperaturas registradas por el reactor y en la figura 32 se muestra el comportamiento de los datos registrados en una gráfica durante los 22 días de experimentación.

**Figura 32.**

*Temperaturas registradas por el reactor durante la experimentación.*



**Nota.** Temperaturas que fueron registradas por la termocupla del reactor durante la experimentación.

Es importante recordar que durante el proceso de compostaje se presenta la fase mesófila y la fase termófila. De acuerdo con Wilson Bohórquez, autor del libro “El proceso de compostaje” [16] el rango de temperatura durante el proceso de compostaje está entre los 20 y los 70°C por lo que podemos decir que el proceso realizado experimentalmente cumple con ese requisito, sin embargo, la máxima temperatura alcanzada en el sustrato fue de 32,12 °C en el día 22 por lo que se puede concluir que no se alcanzó la fase termófila (temperaturas superiores a 45 °C) y por lo tanto tampoco la fase de enfriamiento. Esto pudo haber sucedido debido a la gran cantidad de humedad que contenía el sustrato y la materia prima, lo cual favoreció la generación de un ambiente anaeróbico, retrasando el proceso y por supuesto afectando el crecimiento de los microorganismos aeróbicos necesarios para la correcta degradación de los residuos. [3]

Es fundamental comprender que a medida que aumenta la humedad, la película de líquido que rodea las partículas sólidas se vuelve más gruesa por lo que el oxígeno y el dióxido de carbono se difunden más lentamente dentro y fuera de la película proporcionando un ambiente anaeróbico en el que no se descomponen por completo la materia prima, además de que se producen malos olores, aunque estos últimos pueden sacarse de la pila de compostaje mediante un mecanismo de escape. [3]

A medida que crecen los microorganismos se genera calor que provoca el aumento de la temperatura. La evolución de esta variable representa todo el proceso de compostaje ya que, si se presentan variaciones de temperatura, como en este caso que se presentó una disminución significativa con respecto a la temperatura inicial, la actividad microbiana se ve afectada de tal manera que se ralentiza el crecimiento y la propagación de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. [43]

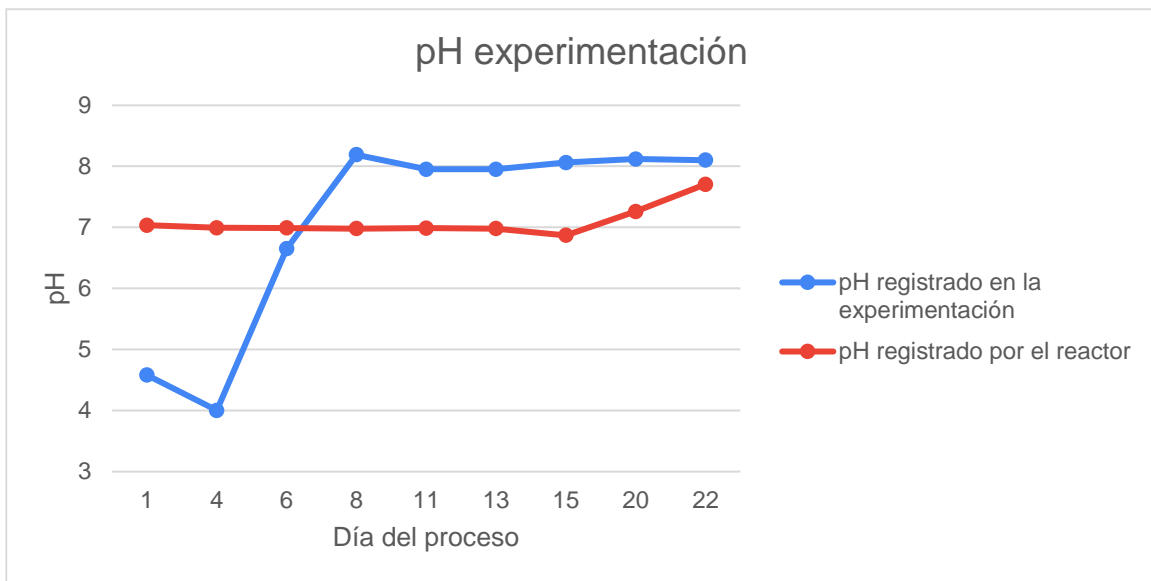
Se logra evidenciar durante la experimentación que el factor de humedad es directamente proporcional a la película de líquido que envuelven las partículas sólidas; Cuanto más sea gruesa dicha capa, el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se difunden lentamente proporcionando un ambiente anaeróbico y no descomponiendo por completo la materia prima. Como detector de este factor se correspondió en la característica organoléptica fuerte dando como solución insertar en la pila de compostaje un mecanismo de purga. [3]

Durante la experimentación se presentó una disminución significativa de temperatura entre los días 6 y 13 que se cree se dio por errores técnicos (afectaciones del reactor y sus componentes) y errores humanos (afectación de entorno no adecuado), afectando la actividad microbiana necesaria para un proceso normal de compostaje [43]

- **pH:** Este procedimiento, fue realizado cada tres días, iniciando el 21 de julio de 2023 y finalizando muestreo el 11 de agosto de 2023, con un total de 22 días de proceso. En la tabla 20 y 21 disponibles en el anexo 3 se presenta un consolidado de las lecturas arrojadas por el reactor y las de las registradas por las autoras respectivamente. El comportamiento de los datos se encuentra en la figura 33.

**Figura 33.**

*Lecturas pH experimentación.*



**Nota.** Lecturas de pH registradas por el reactor y en la experimentación.

Como se puede observar la diferencia entre la lectura tomada por el reactor y la de las autoras sobre todo en los días 1 y 4 del proceso es de por lo menos 3 puntos de diferencia, sin embargo, las lecturas posteriores no cuentan con tal diferencia, sino que es mucho menor. En las dos mediciones se presenta una estabilización del pH a partir del día 8 del proceso y el día 22 vemos que las lecturas son muy cercanas. Se cree que la disminución de pH al inicio del proceso se debió a un error en la medición por parte de las autoras ya que, en días posteriores, las mediciones se estabilizan e incluso están cercanas a las reportadas por el reactor.

La acidez del compostaje se debe a la presencia de ácidos de cadena corta. Recordemos que el pH durante el proceso de compostaje presenta 3 fases, y durante la fase mesófila se observa una disminución de pH (día 4) debido a que los ácidos son un producto metabólico de los microorganismos que realizan la descomposición de la materia orgánica. Los ácidos alifáticos de cadena corta, como el ácido acético, son considerados ácidos grasos de bajo peso molecular y pueden acidificar el medio. [42] Por lo tanto, se puede decir que los ácidos grasos de cadena corta pueden contribuir a la acidificación del medio durante el proceso de compostaje.

Se debe tener en cuenta que un pH demasiado bajo (ácido) puede inhibir la actividad microbiana lo que conduce a una menor demanda de oxígeno y una menor necesidad de aireación, pero por otro lado, un pH demasiado alto (alcalino) puede afectar negativamente la actividad microbiana y la eficiencia del proceso, por esta razón, es importante controlar en la mayor medida posible el nivel de oxígeno que ingresa para proporcionar suficiente a los microorganismos y mantener un ambiente aeróbico adecuado. [43]

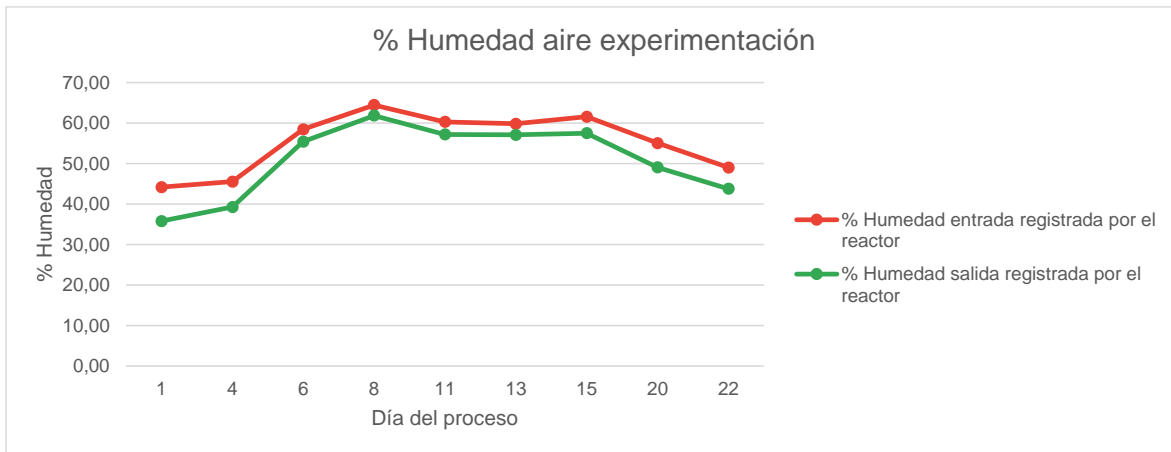
Algunas materias primas que se degradan fácilmente y que son ricas en carbohidratos como por ejemplo los residuos de alimentos, pueden reducir drásticamente el pH al inicio del proceso de compostaje (como se observa en el día 4) debido a la liberación de ácidos orgánicos mencionada anteriormente. [3]

A medida que el tiempo transcurre el pH aumenta con la evolución del proceso y se estabiliza llegando a ser neutra para alcanzar finalmente en el día 22 del proceso un pH de 8.1, valor considerado óptimo dentro del rango establecido para un compost según la norma técnica Colombiana NTC 5167. [25]

- **% HUMEDAD:** Al igual que en el pH fue realizado cada 3 días, empezando el 21 de julio del 2023 y finalizando muestreo el 11 de agosto del 2023, con un total de 22 días de proceso. A continuación, se presenta el porcentaje de humedad en el sustrato, en la entrada y en la salida del rector y la calculada por las autoras en las tablas 22, 23, 24 y 25 respectivamente disponible en el anexo 3 y finalmente las figura 34 y 35 representan esos datos, pero graficados.

**Figura 34.**

*Porcentaje de humedad del aire en la experimentación.*



**Nota.** Porcentaje de humedad en el aire registrado por el reactor.

La humedad relativa es la cantidad de humedad presente en el aire con respecto a la capacidad máxima de retención de humedad representada en porcentaje de la capacidad total de retención de agua. La humedad relativa afecta principalmente la capacidad del aire para secar o eliminar el agua de un producto, que en este caso es el compostaje. [55]

La humedad relativa está relacionada con la temperatura debido a que es altamente sensible a sus variaciones. Esto quiere decir que, si se tiene una temperatura estable en el sistema, la humedad también lo será. Cuando se tienen temperaturas muy bajas, la humedad relativa es alta y la evaporación del agua se vuelve lenta. Cuando el porcentaje de humedad relativa es alta (mayor al 60%) se pueden generar problemas como moho, corrosión y deterioro de materiales. [56]

Teniendo en cuenta esta información, se puede decir que la humedad relativa del aire y la temperatura están estrechamente relacionadas. El comportamiento que se puede observar tras la experimentación y en relación con estos factores es que son inversamente proporcionales. Desde el día 1 del proceso hasta el día 13 se observa una disminución en la temperatura del proceso, mientras que en el contenido de humedad se presentó un aumento. A menor temperatura, mayor contenido de humedad.

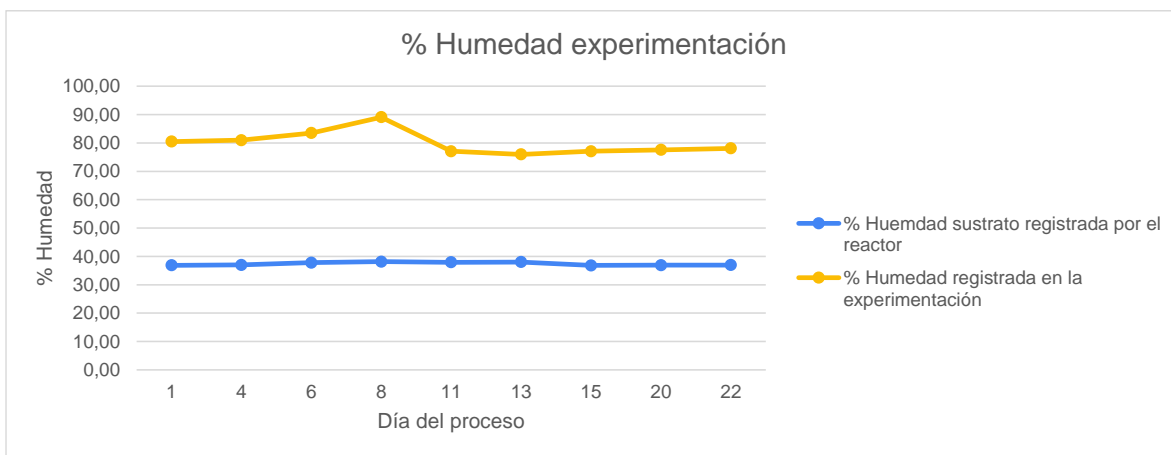
La alta humedad relativa del aire durante el periodo de experimentación pudo contribuir al aumento en el porcentaje de humedad del sustrato debido a que entre mayor vapor de agua en el aire, mayor contenido de humedad en el ambiente [57], y al tratarse de un reactor cerrado se concentra aún

más la humedad hasta el punto en que el vapor se empieza a condensar favoreciendo un ambiente anaeróbico en el cual se dificulta el crecimiento y la propagación de microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica.

Es importante mencionar que, al presentar temperaturas bajas y dificultades en cuanto al sistema de rotación del reactor durante la experimentación, se dificultó la disminución del contenido de humedad en el sustrato.

**Figura 35.**

*Porcentaje de humedad del sustrato en la experimentación.*



**Nota.** Porcentaje de humedad del sustrato registrado por el reactor y en la experimentación.

Como se puede observar en la gráfica desde el inicio del proceso hasta su finalización los valores de humedad reportados por las autoras superan los rangos óptimos para un proceso de compostaje (50 % - 60 %) según la NTC 5167. [25] Esto probablemente se debe a un error del equipo, pues el reactor no realizó la rotación por día que se programó inicialmente, además de que la temperatura nunca superó los 40°C lo que mantuvo húmedo el sustrato. Esto condujo a que la mezcla se mantuviera siempre en reposo, y por lo tanto provocó una acumulación de humedad impidiendo así la aireación adecuada.

Además de esto, el reactor contaba con un humidificador que como su nombre lo indica, lo que hacía era ingresar vapor de agua al reactor con el fin de mantener el compostaje en niveles óptimos de humedad. Este ingreso de humedad se debía a que los datos que registraba el reactor con respecto a la humedad del sustrato siempre estuvieron por debajo de los niveles requeridos, por lo



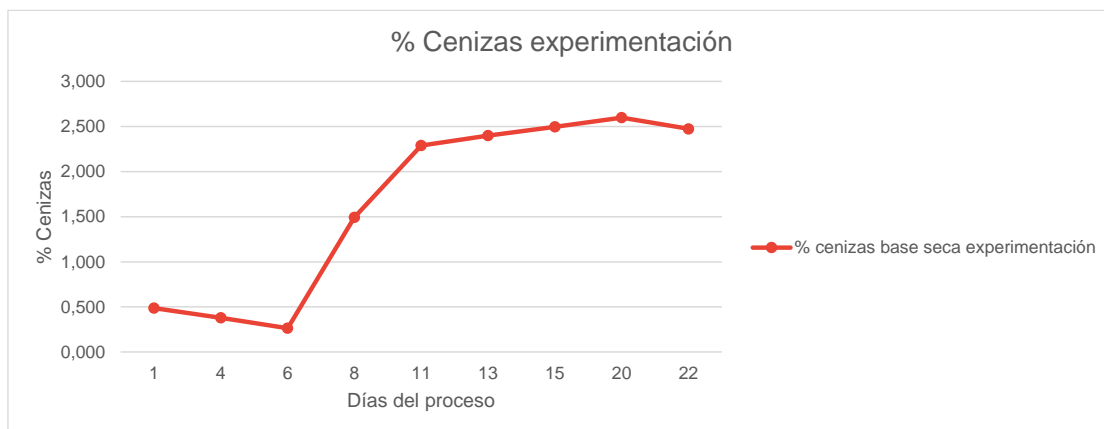
que el equipo ingresaba más vapor para compensar esa falta de humedad, pero los registros llevados por las autoras indican todo lo contrario, el sustrato contaba con una humedad mucho más alta a la requerida para la realización del proceso.

La aireación y la humedad en el reactor son factores importantes en este proceso. La aireación es esencial para proporcionar oxígeno a los microorganismos aeróbicos responsables de la descomposición de la materia orgánica. Se necesita mantener un ambiente aeróbico para favorecer la actividad de estos microorganismos, que son más eficientes en el procesamiento de la materia orgánica que los microorganismos anaeróbicos. Por otro lado, la humedad también es importante, ya que los microorganismos necesitan agua para sobrevivir y para que el proceso de descomposición se lleve a cabo de manera efectiva. Sin embargo, un exceso de humedad como lo que ocurrió en este ensayo, redujo la cantidad de oxígeno disponible e hizo que el proceso se volviera anaerobio, lo que generó malos olores.

- **% CENIZAS:** Al igual que en las mediciones anteriores fue realizado cada 3 días, empezando el 21 de julio del 2023 y finalizando muestreo el 11 de agosto del 2023, con un total de 22 días de proceso. En la tabla 26 se presenta un consolidado de las mediciones realizadas en base seca, disponible en el anexo 3 y la figura 36 nos representa esos datos, pero graficados. Es importante tener en cuenta que el reactor utilizado en la experimentación no arrojaba datos del porcentaje de cenizas, por lo que todos los presentados fueron calculados por las autoras.

### Figura 36.

*Medición porcentaje de cenizas experimentación.*



**Nota.** Porcentaje de cenizas obtenido en la experimentación.

Durante los 6 primeros días del proceso de experimentación se puede observar que se alcanzó un descenso en el porcentaje del contenido de cenizas de 0,264% (día 6 del proceso), sin embargo, se puede evidenciar un aumento que finalmente resulta en una estabilización en el contenido de cenizas. Durante este aumento se alcanzó un pico máximo de contenido de cenizas de 2,598% en el día 20 del proceso. El porcentaje de cenizas indica el posible contenido de sales minerales, presentes en el compostaje a partir de residuos sólidos orgánicos debido a la presencia de alimentos con contenido de sal y minerales. [52]

El porcentaje de cenizas de un proceso de compostaje puede variar dependiendo de factores tales como los residuos utilizados, las condiciones del proceso y el contenido de cenizas de la materia prima. Sin embargo, diferentes estudios realizados han informado que la concentración de cenizas típica en el proceso de compostaje puede estar entre el 1 y el 5%. [53]

El contenido de cenizas en base húmeda presenta un comportamiento inverso al porcentaje de humedad durante los seis primeros días del proceso y posteriormente el comportamiento se igual para los dos factores presentado una disminución entre el día 8 y 11 para posteriormente tender a estabilizarse. De acuerdo con el rango permitido por la NTC 5167 [25] (máximo 60%) durante todo el proceso se cumplió con lo establecido por la norma.

Con el porcentaje de cenizas se puede determinar el comportamiento de biodegradación a lo largo del proceso mediante un balance de materia, en el cual la cantidad de cenizas se supone que se mantiene constante. Dicho balance se puede expresar por medio de un coeficiente de biodegradabilidad ( $k_b$ ) el cual involucra la cantidad inicial y final de cenizas en el proceso. [44] La ecuación utilizada para el cálculo de  $k_b$  fue la número 6.

$$k_b = \frac{[(c_f - c_i) * 100]}{[c_f * (100 - c_i)]} * 100\% \quad (6)$$

En donde:

$C_f$ = Porcentaje de cenizas al final

$C_i$ = Porcentaje de cenizas al inicio

En la tabla 10 se muestran los coeficientes de degradación del proceso de experimentación.

**Tabla 10.**

*Coefficiente de biodegradación experimentación.*

<b>% Cenizas al inicio</b>	<b>% Cenizas al final</b>	<b>% <math>k_b</math></b>
0,488	2,475	80,67

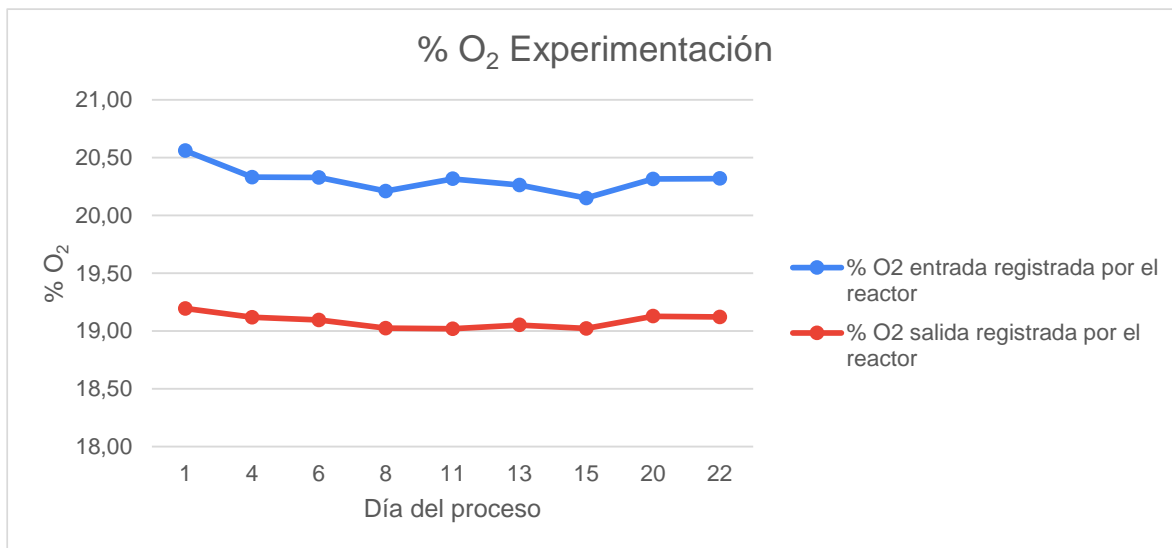
**Nota.** Coeficiente de biodegradación de la mezcla de residuos cargada al reactor.

Recordemos que la biodegradación es la descomposición por acción microbiana de un material orgánico. Generalmente un producto es biodegradable cuando alcanza un coeficiente del 90% y se espera que se degrade en un periodo máximo de 6 meses. [43] Como se puede observar, el proceso llevado a cabo en la experimentación está por debajo del porcentaje de coeficiente de biodegradabilidad recomendado para un producto orgánico, este valor, aunque no es lejano al “ideal” se pudo haber presentado debido a que el proceso, como se ha mencionado anteriormente, no completó todas las fases que se debería tener el proceso de compostaje. Finalmente, con este valor de biodegradabilidad obtenido se puede esperar que el producto efectivamente se degrade, pero en un periodo mayor a 6 meses.

Del reactor también se obtuvieron datos de las concentraciones de oxígeno (tablas 27 y 28), dióxido de carbono (tablas 29 y 30) y ácido sulfhídrico (tabla 31), disponibles en el anexo 3. De las 2 primeras se tiene entrada y salida del reactor y de la última solamente la salida. Los datos también se encuentran graficados en las figuras 37, 38 y 39.

**Figura 37.**

*Concentraciones O<sub>2</sub> experimentación.*



**Nota.** Concentración de oxígeno a la entrada y salida del proceso reportada por el reactor.

De acuerdo con el autor del libro “The composting hadbook” [3] el rango de concentración de oxígeno requerida para un proceso de compostaje aeróbico está entre el 10% y el 18%, sin embargo, en concentraciones mayores al 18% se podrían presentar olores en el proceso debido a la degradación de la materia prima por parte de los microorganismos. Para este caso la entrada de oxígeno en el reactor siempre estuvo por encima del 10% por lo que podemos decir que cumple con lo investigado por el autor mencionado anteriormente, pero es importante mencionar que durante la realización del proceso si se presentaron olores fuertes sobre todo en el lixiviado.

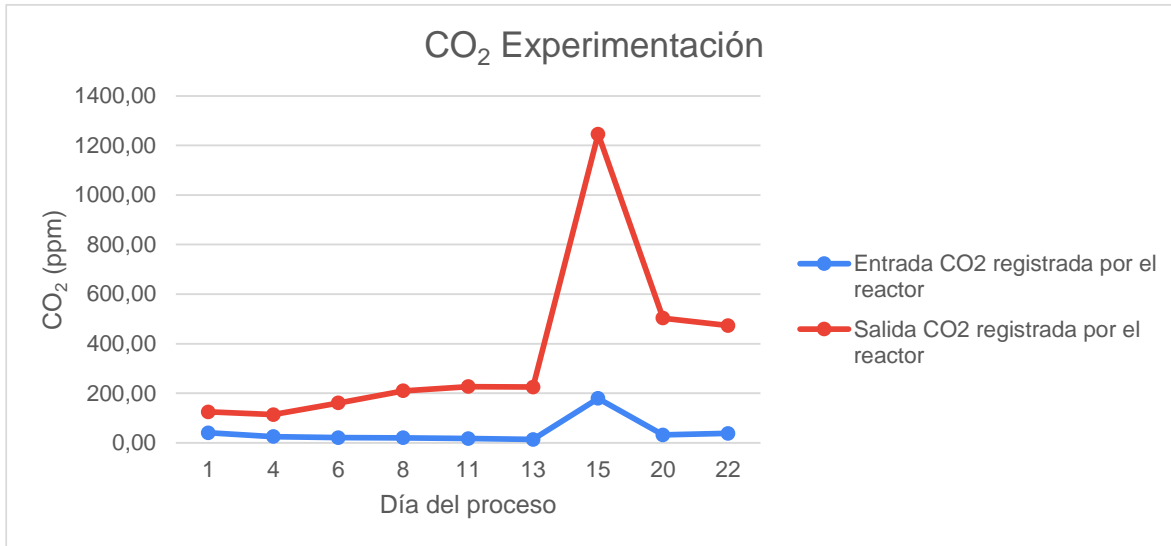
Por otro lado, la reducción en el porcentaje de oxígeno en la salida en comparación con la entrada en el reactor se debe a un exceso en la humedad que desplaza el oxígeno de los poros formados por las partículas de los residuos y porque el material se compacta en una pila. [16]

En condiciones ambientales normales, la concentración de O<sub>2</sub> en el aire es de aproximadamente 20,95%. En una pila de compostaje, en la parte más cercana a la superficie, la concentración de oxígeno puede tomar valores de entre 18 y 20% y va disminuyendo a mayor profundidad.[62] En figura 35 se puede observar que efectivamente la concentración de oxígeno que entraba al reactor estaba en valores cercanos al de las condiciones “normales” ambientales mencionadas anteriormente; sin embargo, la disminución se pudo haber presentado por factores externos, imposibles de controlar por parte de las autoras como lo es la contaminación propia de la ciudad

de Bogotá que disminuye la calidad del aire con ello la disponibilidad y solubilidad de oxígeno en la atmosfera. Por otro lado, en la pila de compostaje, también se está dentro del rango recomendado por diferentes autores (entre 18 y 20%).

**Figura 38.**

*Emisiones CO<sub>2</sub> experimentación.*



**Nota.** Emisiones de dióxido de carbono registrada a la entrada y la salida del proceso por el reactor.

En la entrada del reactor, los residuos orgánicos contienen una cierta cantidad de carbono que puede ser convertido en CO<sub>2</sub> durante el proceso de descomposición.

A medida que los residuos orgánicos se descomponen en el reactor, se produce CO<sub>2</sub> como resultado de la respiración microbiana y la descomposición de la materia orgánica. La concentración de CO<sub>2</sub> en la salida del reactor es mayor que en la entrada debido a la liberación continua de CO<sub>2</sub> que se produjo durante el proceso. Es importante tener en cuenta que este es un proceso aeróbico, lo que significa que requiere la presencia de oxígeno. Si el reactor no tiene una adecuada ventilación o si hay una falta de oxígeno en el proceso, puede haber una mayor producción de gases como metano en lugar de CO<sub>2</sub>. El metano es un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO<sub>2</sub>, por lo que es deseable minimizar su producción. [3]

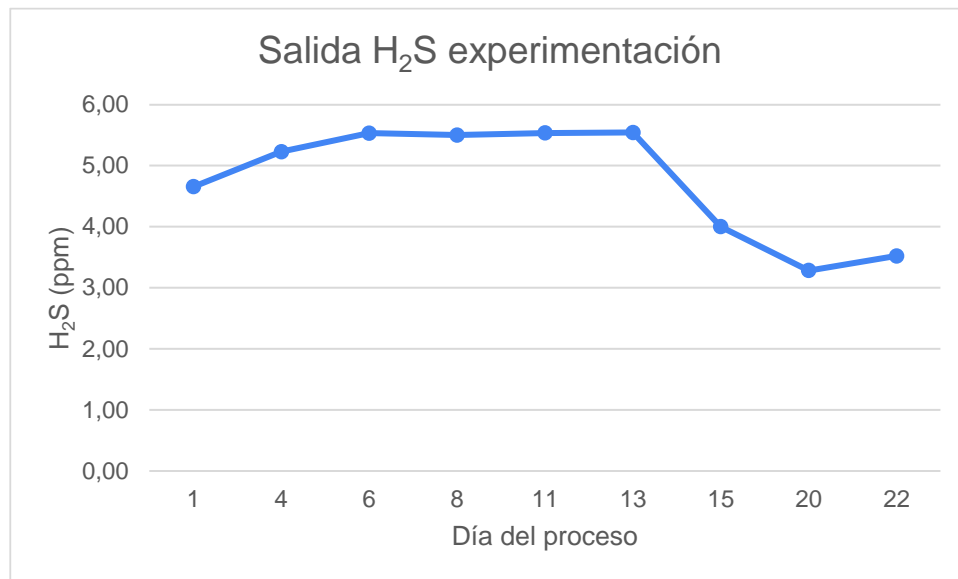
En la etapa inicial del proceso (mesófila), la temperatura de la mezcla aumenta gradualmente debido a la actividad de los microorganismos, por lo tanto, durante esta fase, se generaron emisiones de CO<sub>2</sub> en bajas cantidades ya que aún no hay tanta actividad microbiana. Luego, en la

fase termófila, como la temperatura de la mezcla aumenta aún más debido a la actividad microbiana intensa, es allí donde más emisiones de CO<sub>2</sub> se generan. Y, por último, en la fase de enfriamiento y maduración, la temperatura de la mezcla se estabiliza y disminuye gradualmente. Durante esta fase, se sigue emitiendo CO<sub>2</sub>, pero en menor proporción en comparación con las fases anteriores, ya que la actividad microbiana disminuye y la descomposición de la materia orgánica se reduce.[16]

Entre los días 13 y 20 del proceso se presenta un aumento en las emisiones del CO<sub>2</sub> y un posterior descenso en el día 22, lo cual coincide con el aumento y la disminución de la temperatura durante este mismo periodo de tiempo. Esto se debe a que como fue mencionado anteriormente, estos dos factores guardan una relación directamente proporcional, es decir, a medida que aumenta la temperatura de la pila de compostaje, aumentarán las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la actividad microbiana. Además de esto, se cree que pudo haberse presentado el pico de emisiones el día 15 del proceso debido a que se contaminó de moscas, aumentando así la actividad microbiana en la pila de compostaje.

**Figura 39.**

*Emisiones H<sub>2</sub>S experimentación.*



**Nota.** Emisiones de ácido sulfhídrico en el proceso registradas por el reactor.

Es importante tener en cuenta que en el proceso también se genera sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) el cual es un gas con un olor desagradable y puede ser perjudicial para la salud humana y el medio ambiente en altas concentraciones. Según el Ministerio de Salud y Protección Social, las

concentraciones de H<sub>2</sub>S por encima de 100 ppm (partes por millón) en volumen pueden ser tóxicas y que incluso concentraciones más bajas pueden generar olores desagradables. [45] Dicho esto, se puede afirmar que durante el proceso de compostaje llevado a cabo no se emitieron concentraciones de H<sub>2</sub>S lo suficientemente altas como para provocar un daño al medio ambiente.

La producción de sulfuro de hidrógeno está relacionada con el valor del pH del proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos. Durante el compostaje se producen diversas reacciones químicas y biológicas que pueden afectar el pH del sistema. El sulfuro de hidrógeno es un gas que se forma en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno. Su producción está relacionada con el desafío anaeróbico de la materia orgánica contenida en los residuos. Si el pH del sistema disminuye o se vuelve más ácido, se crea un ambiente favorable para la producción de sulfuro de hidrógeno. Esto puede deberse a la acumulación de ácidos orgánicos durante el procesamiento de los residuos. Por otro lado, si el pH del sistema se mantiene en un rango suficiente se favorece la actividad de los microorganismos aeróbicos, lo que reduce la producción de sulfuro de hidrógeno. [46]

Es importante tener en cuenta que algunos de los equipos con los que se trabajó presentaban fallas como se mencionó anteriormente. Para ser más explícitos, la mufla en la que se realizaba la incineración de las muestras para determinar el porcentaje de cenizas presentó fallas en su funcionamiento ya que el cable que proporcionaba la energía al equipo se desconectaba frecuentemente de la toma y en ocasiones se descalibraba y la temperatura disminuía o aumentaba significativamente, lo cual pudo haber afectado los resultados obtenidos. Por otra parte, el reactor con el que se contó arrojó resultados lejanos en comparación a los obtenidos por las autoras y los presentados por el laboratorio Agrilab, además de esto presentó fallas en el sistema de rotación ya que no giraba lo cual pudo contribuir al aumento de humedad y la falta de homogeneización de la mezcla y finalmente alrededor del día 19 del proceso, el compostaje se contaminó con moscas lo cual pudo haberse debido a que los alimentos en descomposición con los que se trabajó, especialmente las frutas atraían moscas y a que en el mismo lugar en el que se estaba realizando la experimentación se estaba realizando un estudio con moscas.

## 4. INDICADORES DE CALIDAD Y DESEMPEÑO DEL COMPOSTAJE OBTENIDO

En este último capítulo, se presenta y explica el balance de masa general y por componentes del proceso; además, se propone un secado del 30% del compost obtenido con el fin de reducir el contenido de humedad. Por otro lado, para comparar los resultados fisicoquímicos obtenidos experimentalmente con los del laboratorio Agrilab se presentan dos tablas que sintetizan los resultados obtenidos y el porcentaje de cumplimiento con respecto a la norma NTC 5167.

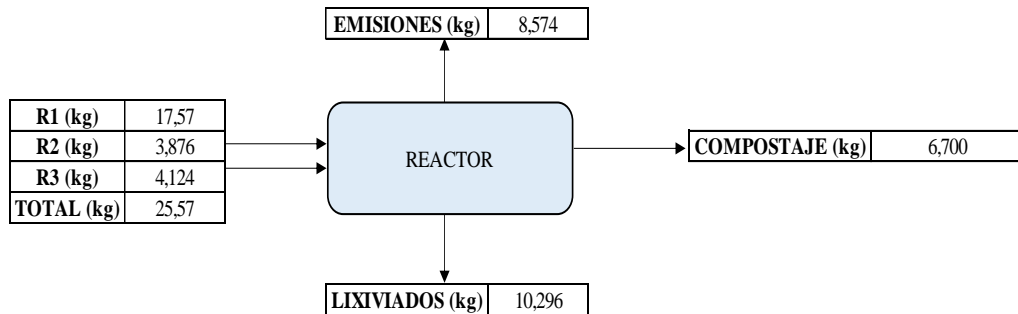
### 4.1 Balance de masa

#### 4.1.1 Balance de masa general

Con el fin de monitorear los cambios en cuanto a la masa al inicio y al final del proceso de compostaje se realizó un balance de masa y de los principales factores que afectan el proceso. En la figura 40 se presenta un esquema del balance de masa general con el modelo de caja negra. Recordemos que este modelo se enfoca en las entradas y las salidas del proceso sin tener en cuenta los pasos intermedios del proceso.

**Figura 40.**

*Balance de masa general.*



**Nota.** Balance de masa general.

La ecuación utilizada para calcular el balance de masa general fue la numero 7. En este caso R1, R2 y R3 corresponden a residuos crudos, residuos cocidos y residuos de poda respectivamente.



$$R1 + R2 + R3 = \textit{Emisiones} + \textit{Lixiviados} + \textit{Compostaje} \quad (7)$$

Los datos con los que se contaba inicialmente eran el total de residuos cargados (25,570 kg), la cantidad de lixiviados generados (10,296 kg) y la cantidad de compostaje obtenida (6,700 kg) por lo que de la ecuación 6 se despejó las emisiones generadas durante el proceso se la siguiente manera.

$$\textit{Emisiones} = R1 + R1 + R3 - \textit{Lixiviados} - \textit{Compostaje}$$

$$\textit{Emisiones} = 17,570 \textit{ kg} + 3,876 \textit{ kg} + 4,124 \textit{ kg} - 10,296 \textit{ kg} - 6,700 \textit{ kg}$$

$$\textit{Emisiones} = 8,574 \textit{ kg}$$

Como se puede ver en la figura 38, la mayor pedida o salida del proceso de masa se encuentra en los lixiviados, los cuales están compuestos en su mayoría por agua, sólidos volátiles, compuestos orgánicos solubles y constituyentes inorgánicos. [47] Otra salida del proceso son las emisiones con un 8,57 kg del total de la masa ingresada al proceso. Dentro de estas emisiones se encuentra principalmente el aire, los gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (óxido nitroso) y NH<sub>3</sub> (amoniaco). De los mencionados anteriormente el único gas que fue reportado como emitido por parte de los instrumentos de medición contenidos por el reactor utilizado fue el dióxido de carbono, por lo que se asume que si se hubo generación de otros gases su concentración no era significativa.

Del balance anterior, podemos concluir que el proceso llevado a cabo tuvo un rendimiento de 26,20% de materia prima cargada al reactor con respecto al compostaje obtenido tras 22 días de proceso, ya que el peso total de los residuos era de 25,57 kg y el del producto final fue de 6,700 kg. La poca cantidad de producto obtenido en comparación a los residuos cargados al reactor se puede deber a que el contenido de agua o humedad de la materia prima era muy alto por lo el contenido real de residuos era poco.

#### **4.1.2 Balance de masa del agua**

A continuación (figura 41) se presenta el balance de masa de agua durante el proceso de compostaje llevado a cabo. Para la realización de este balance, partimos de que la mezcla de residuos contenía un 80,50% de humedad, por lo que, de los 25,57 kilogramos cargados al reactor, 20,58 kilogramos corresponden al agua del sustrato.

$$\textit{Agua en el sustrato} = 25,57 \textit{ kg} \times 80,50\%$$

$$\textit{Agua en el sustrato} = 20,58 \textit{ kg}$$

Para el compostaje obtenido, como hemos evidenciado, el contenido de humedad era muy alto (78,10%) y correspondía a 5,23 kilogramos de agua en el producto final.

$$\textit{Agua en el compostaje obtenido} = 6,700 \textit{ kg} \times 78,10\%$$

$$\textit{Agua en el compostaje obtenido} = 5,23 \textit{ kg}$$

Y finalmente se toma como supuesto que el 100% de los lixiviados era agua. Dando como resultado que la cantidad de agua que sale en las emisiones en forma de vapor de agua es 5,055 kilogramos correspondientes al 58,95% de la masa total de las emisiones.

$$\textit{Total residuos} = \textit{lixiviados} + \textit{emisiones} + \textit{compostaje}$$

$$\textit{Emisiones} = \textit{Total residuos} - \textit{lixiviados} - \textit{compostaje}$$

$$\textit{Agua en las emisiones} = 20,580 \textit{ kg} - 10,296 \textit{ kg} - 5,233 \textit{ kg}$$

$$\textit{Agua en las emisiones} = 5,055 \textit{ kg}$$

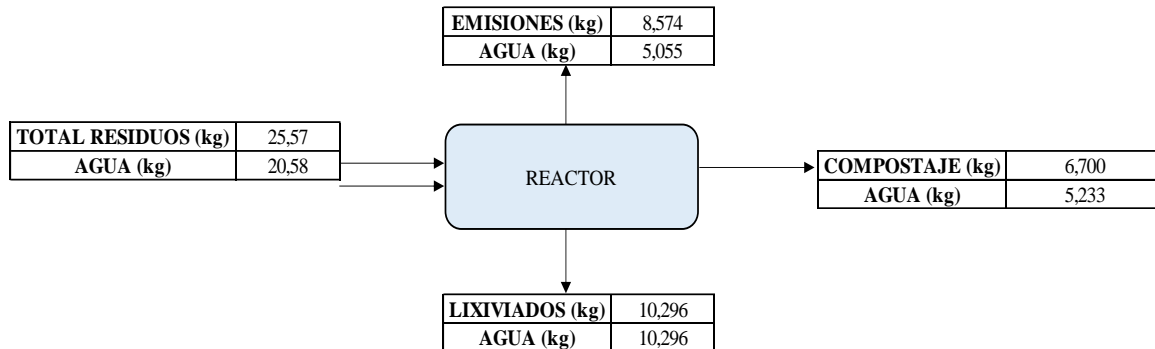
Para determinar el porcentaje de agua en las emisiones se realizó una regla de 3

$$\% \textit{ agua en emisiones} = 5,055 \textit{ kg} \cdot \frac{100\%}{8,574 \textit{ kg}}$$

$$\% \textit{ agua en emisiones} = 58,95\%$$

**Figura 41.**

*Balance de masa de agua.*



**Nota.** Balance de masa del agua.

Como se ha mencionado en diferentes fragmentos del documento, el agua o contenido de humedad es un factor determinante a la hora de realizar el proceso de compostaje ya que de ello depende en parte el crecimiento y propagación de microorganismos necesarios para la degradación de la materia orgánica. El contenido de humedad durante el proceso realizado siempre estuvo por encima de los rangos “normales” mencionados por la norma y diferentes autores, razón por la cual en la entrada y las salidas del proceso se observa que de su masa total más del 58% corresponde a agua. Esto nos representó varias dificultades a lo largo del proceso como, por ejemplo, la contribución a la generación de un ambiente anaeróbico, disminuyendo así la tasa de crecimiento de microorganismos que aumentan la temperatura y llevarán el proceso a término correcto.

Conociendo ahora el contenido de agua del total de los residuos cargados al reactor y del producto obtenido, se puede afirmar que tan solo 4,99 kg correspondían a residuos secos, sin embargo, es importante recordar que la humedad también es fundamental durante el proceso de compostaje en los porcentajes correctos, de lo contrario puede representar una dificultad durante el proceso.

Es importante aclarar que el reactor contaba con un humidificador, el cual era cargado con agua potable para prevenir el ingreso de sustancias químicas que afectaran el proceso como el cloro con el que se trata el agua de uso doméstico. El reactor utilizado no registraba la cantidad de vapor de agua que le entraba al proceso, razón por la cual no fue posible cuantificar este valor. Sin embargo, se tiene la teoría de que pudo haber ingresado más vapor de agua del necesarios al proceso, por lo que el compostaje siempre se mantuvo húmedo. Desafortunadamente tampoco se realizó un

seguimiento del agua que se cargaba al humidificador por parte de las autoras por lo que no se cuenta con ese dato.

#### **4.1.3 Balance de masa de carbono**

Para el balance de carbono se tomó como referencia el contenido de carbono total presentado en los resultados del laboratorio Agrilab (Anexo 4 y 5), los cuales corresponden a 3,75% y 6,07% para la mezcla de residuos cargada al reactor y el producto de compostaje obtenido respectivamente. A partir de estos datos se calculó la masa de carbono presente en la entrada y las salidas del proceso de compostaje llevado a cabo.

$$\mathbf{Carbono\ residuos} = 25,57\text{ kg} \cdot 3,75\%$$

$$\mathbf{Carbono\ residuos} = 0,958\text{ kg}$$

$$\mathbf{Carbono\ compostaje} = 6,70\text{kg} \cdot 6,07\%$$

$$\mathbf{Carbono\ compostaje} = 0,406\text{ kg}$$

En este caso se tomó como supuesto que la masa de carbono que sale en los lixiviados es tan pequeña que se aproxima a cero.

$$\mathbf{Total\ residuos} = \mathbf{lixiviados} + \mathbf{emisiones} + \mathbf{compostaje}$$

$$\mathbf{Emisiones} = \mathbf{Total\ residuos} - \mathbf{compostaje}$$

$$\mathbf{Carbono\ emisiones} = 0,958\text{ kg} - 0,406\text{ kg}$$

$$\mathbf{Carbono\ emisiones} = 0,552\text{ kg}$$

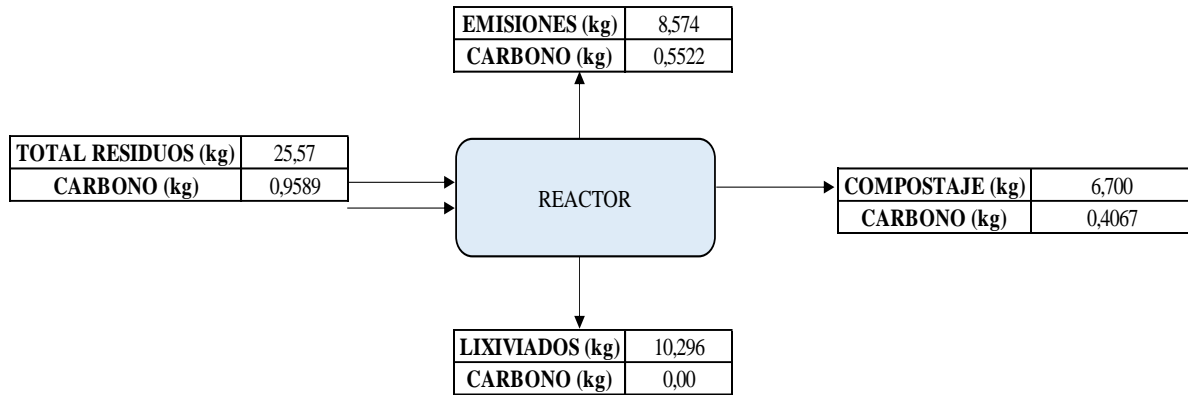
Para determinar el porcentaje de carbono en las emisiones se realizó una regla de 3

$$\% \mathbf{carbono\ emisiones} = 0,552\text{ kg} \cdot \frac{100\%}{8,574\text{ kg}}$$

$$\% \mathbf{carbono\ emisiones} = 6,44\%$$

**Figura 42.**

*Balance de masa de carbono.*



**Nota.** Balance de masa del carbono.

Como fue mencionado anteriormente, el único gas del que se tiene registro que se emitió a la atmósfera fue el CO<sub>2</sub>, el cual es un gas de efecto invernadero capaz de acumular y emitir calor. Debido a la baja cantidad de gases de carbono que salieron en las emisiones durante el proceso de compostaje llevado a cabo, se puede decir que la huella de carbono generada es neutra con una producción de menos de 1% de emisiones de CO<sub>2</sub>. El carbono es un nutriente necesario para los microorganismos presentes en el proceso de compostaje, además, es importante para el crecimiento de las plantas a las que se supone debería agregar el compostaje; sin embargo, el contenido nutricional de un compostaje en comparación con un fertilizante químico es muy bajo. Más adelante se amplía el tema de los nutrientes.

#### **4.1.4 Balance de masa de nitrógeno.**

Para el balance de nitrógeno se tomó como referencia el contenido de nitrógeno total presentado en los resultados del laboratorio Agrilab (Anexo 4 y 5), los cuales corresponden a 0,237% y 0,613% para la mezcla de residuos cargada al reactor y el producto de compostaje obtenido respectivamente. A partir de estos datos se calculó la masa de nitrógeno presente en la entrada y las salidas del proceso de compostaje llevado a cabo.

$$\text{Nitrógeno residuos} = 25,57 \text{ kg} \cdot 0,237\%$$

$$\text{Nitrógeno residuos} = 0,0606 \text{ kg}$$

$$\text{Nitrógeno compotaje} = 6,70\text{kg} \cdot 0,613\%$$

$$\text{Nitrógeno compostaje} = 0,0411\text{ kg}$$

En este caso se tomó como supuesto que la masa de nitrógeno que sale en los lixiviados es tan pequeña que se aproxima a cero.

$$\text{Total residuos} = \text{lixiviados} + \text{emisiones} + \text{compostaje}$$

$$\text{Emisiones} = \text{Total residuos} - \text{compostaje}$$

$$\text{Nitrógeno emisiones} = 0,0606\text{ kg} - 0,0411\text{ kg}$$

$$\text{Nitrógeno emisiones} = 0,0195\text{ kg}$$

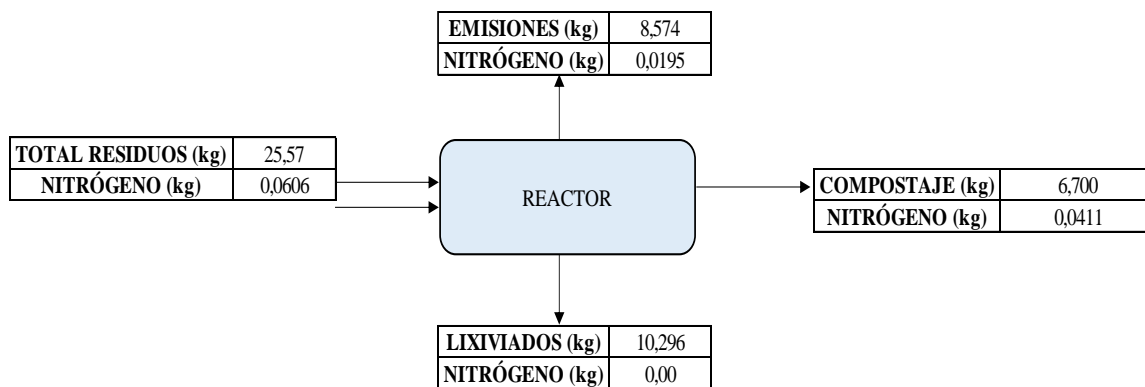
Para determinar el porcentaje de carbono en las emisiones se realizó una regla de 3

$$\% \text{ Nitrógeno emisiones} = 0,0195\text{ kg} \cdot \frac{100\%}{8,574\text{ kg}}$$

$$\% \text{ Nitrógeno emisiones} = 0,22\%$$

**Figura 43.**

*Balace de masa nitrógeno.*



**Nota.** Balance de masa del nitrógeno.

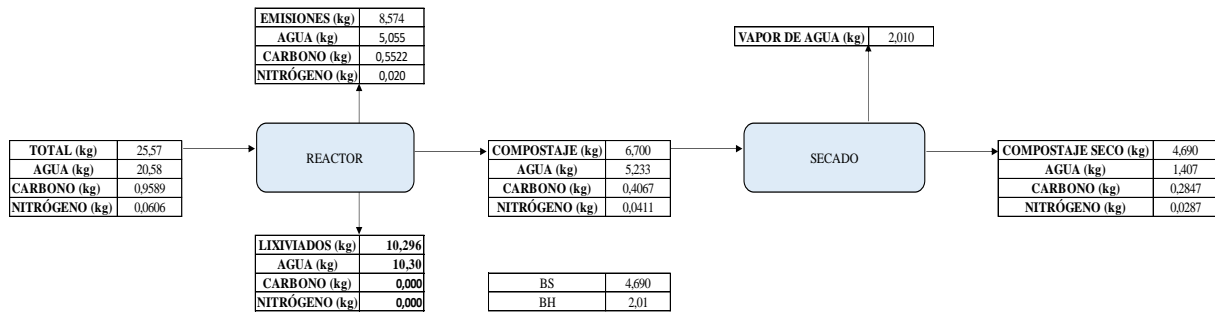
El contenido de nitrógeno en el compostaje puede variar según la materia prima usada y cómo ésta se composta. El nitrógeno en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) desprendido en las emisiones durante el proceso de compostaje es fácilmente aprovechable por las plantas; sin

embargo, la mayoría de los compostajes, sino es que todos, son bajos en estos componentes. Un producto de compostaje tiene poco contenido de amonio debido a que se oxida a nitrato durante el proceso y cualquier nitrato que se produzca puede ser lixiviado fácilmente, perderse en el aire o ser consumido por organismos presentes a lo largo del proceso. [48] Como se mencionó anteriormente el único gas del que se tiene registro que se emitió fue el CO<sub>2</sub>, por lo que se concluye que las emisiones de gases de nitrógeno son tan bajas que se asumen como cero.

Debido al alto contenido de humedad del compostaje obtenido tras la experimentación, es un producto no funcional, razón por que se propone un secado del compostaje para reducir el contenido de humedad y hacer funcional el producto obtenido. El secado a proponer es del 30% con respecto al compostaje final. Este valor se debe a que, aunque diferentes autores sugieren un contenido de entre el 40 al 60% de humedad en el producto final, la NTC 5167 permite un máximo del 30%. [25] Dicho esto, se realizó el siguiente balance para determinar el contenido de nutrientes del compostaje tras un proceso de secado.

**Figura 44.**

*Blance de masa tras proponer un secado del 30% del compostaje obtenido.*



**Nota.** Balance de masa con el secado del 30% con respecto al compostaje obtenido propuesto.

Inicialmente se determinó la cantidad de masa que queda tras el secado. Sabiendo que el nuevo producto debe tener 30% de humedad con respecto al compostaje obtenido experimentalmente, se puede afirmar que el 70% restante corresponde a la materia seca del compostaje final.

$$\text{Masa compostaje final} = 6,70 \text{ kg} \cdot 70\%$$

$$\text{Masa compostaje final} = 4,69 \text{ kg}$$

Debido a que el contenido de humedad máximo permitido por la NTC 5167 es del 30%, se supone que el producto final tras el secado tiene ese porcentaje de humedad.

$$\text{Masa agua compostaje final} = 4,69 \text{ kg} \cdot 30\%$$

$$\text{Masa agua compostaje final} = 1,407 \text{ kg}$$

Al no contar con datos reales del porcentaje de carbono y nitrógeno que contiene el compostaje tras el secado, se supone que tienen un valor similar a los reportados para el compostaje obtenido experimentalmente.

$$\text{Carbono compostaje final} = 4,69 \text{ kg} \cdot 6,07\%$$

$$\text{Carbono compostaje final} = 0,284 \text{ kg}$$

$$\text{Nitrógeno compostaje final} = 4,69 \text{ kg} \cdot 0,613\%$$

$$\text{Nitrógeno compostaje final} = 0,0287$$

Como se puede observar en la figura 44, tras el proceso de secado del compostaje obtenido experimentalmente, se reduce el contenido de agua y con ello el porcentaje de humedad pasando de 5,233 kg a 1,407 kg en el producto final, lo cual corresponde a una disminución en contenido de agua del 26,88%. En cuanto al carbono y el nitrógeno presente en el compostaje seco, se puede observar que disminuye su cantidad en comparación al contenido del compostaje de la experimentación; sin embargo, es importante tener en cuenta que la masa también disminuyó, por lo que es lógico que el contenido de nutrientes igualmente disminuya, además de que una pequeña cantidad de estos nutrientes se pueden haber sido arrastrados por la corriente de vapor de agua utilizada para secar el compostaje. Con esto podemos decir que el proceso de secado es efectivo en cuanto al cumplimiento de la NTC 5157 [23] la cual indica que el porcentaje máximo de humedad para productos de abono orgánico es de 30%, sin embargo, no representa un aumento de los nutrientes presentes en el producto final.

## **4.2 Calidad del compostaje**

Contando con los resultados del laboratorio Agrilab, se compararon con los obtenidos experimentalmente y con la normatividad aplicable, se realizaron las tablas 11 y 12 las cuales presentan el resumen de resultados de los análisis fisicoquímicos aplicados en el compostaje al



inicio y fin de la experimentación respectivamente. Los resultados completos de Agrilab se encuentran en el anexo 4 y 5.

**Tabla 11.**

*Resumen análisis de resultados fisicoquímicos al inicio de la experimentación.*

PROPIEDAD	RESULTADO AGRILAB	RESULTADO EXPERIMENTACIÓN	RANGO PERMITIDO POR LA NTC 5167 [25]	PROCENTAJE DE COMPLIMIENTO DE LA NORMA NTC 5167 [25]	APLICABLE (A) / NO APLICABLE (NA) PARA NORMA NTC 5167 [25]
pH	4,19	4,58	Mín 4	Mín (5% AGRILAB / 13% EXP) Max (53% AGRILAB / 49% EXP)	A
			Máx 9		
% Humedad	88,2	80,5	Máx 30	Max (-66% AGRILAB / -63% EXP)	NA
% Cenizas	0,719	0,488	Máx 60	Max (99% AGRILAB / 99% EXP)	A
Relación C/N	16	16	Máx 25	Mín (36% AGRILAB / 36% EXP)	A
% Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,063	-	Mín 1%	Mín (94% AGRILAB / -)	A
% Potasio total (K <sub>2</sub> O)	0,263	-	Mín 1%	Mín (76% AGRILAB / -)	A
% Silicio total (SiO <sub>2</sub> )	0,09	-	Máx 50% del contenido de cenizas	Max (99% AGRILAB / -)	A

**Nota.** Tabla comparativa de los resultados obtenidos al inicio del proceso por el laboratorio Agrilab, los obtenido experimentalmente y el rango permitido por la NTC 5167.

**Tabla 12.**

*Resumen análisis de resultados fisicoquímicos al final de la experimentación.*

PROPIEDAD	RESULTADO AGRILAB	RESULTADO EXPERIMENTACIÓN	RANGO PERMITIDO POR LA NTC 5167 [25]	PROCENTAJE DE COMPLIMIENTO DE LA NORMA NTC 5167 [25]	APLICABLE (A) / NO APLICABLE (NA) PARA NORMA NTC 5167 [25]
pH	7,76	8,1	Mín 4	Mín (5% AGRILAB / 13% EXP)	A
			Máx 9	Max (53% AGRILAB / 49% EXP)	
% Humedad	83,4	78,1	Máx 30	Max (-66% AGRILAB / -63% EXP)	NA
% Cenizas	1,59	2,47	Máx 60	Max (99% AGRILAB / 99% EXP)	A
Relación C/N	9,9	9,9	Máx 25	Mín (60% AGRILAB / 60% EXP)	A
% Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,174	-	Mín 1%	Mín (94% AGRILAB / -)	A
% Potasio total (K <sub>2</sub> O)	0,486	-	Mín 1%	Mín (76% AGRILAB / -)	A
% Silicio total (SiO <sub>2</sub> )	0,354	-	Máx 50% del contenido de cenizas	Max (99% AGRILAB / -)	A

**Nota.** Tabla comparativa de los resultados obtenidos al final del proceso por el laboratorio Agrilab, los obtenido experimentalmente y el rango permitido por la NTC 5167.

En términos generales, se puede observar que la mezcla de residuos ingresada al reactor, los compuestos solidos / líquidos del compostaje saliente y el análisis de muestra enviado para el laboratorio AGRILAB cumplen con 6 de los 7 ítems, como son: (1) el pH, (2) el porcentaje de cenizas, (3) la relación carbono-nitrógeno, (4) el porcentaje de fosforo total, (5) el porcentaje de potasio total, y por último (6) el porcentaje de silicio total. Para el ítem (6) se calculó el 50% del contenido de cenizas, el cual es 0,359% y 0,244% para el resultado del laboratorio AGRILAB y el resultado experimental, respectivamente; y para el producto final obtenido, el 50% del porcentaje de cenizas es de 0,795% y 1,23% para los resultados de AGRILAB y los obtenidos de manera experimental, respectivamente.

En cuanto al parámetro NO APLICABLE (NA) sobre el análisis de la mezcla entrante y el compostaje obtenido: (7) contenido de humedad a consecuencia de factores intrínsecos originados

por errores del equipo (REACTOR), humanos (APLICABILIDAD DEL PROCESO) que aumentan el rango (Max 30%), establecido por la norma [23] y por los mencionado diversos autores consultados retrasando así el proceso en general.

El fósforo es uno de los tres principales nutrientes para las plantas. No solo es importante en el desarrollo de las raíces, sino también en su crecimiento y el mejoramiento de las flores y semillas acelerando la madurez de los cultivos. También es un componente esencial del trifosfato de adenosina (ATP), que participa en la mayoría de los procesos bioquímicos de las plantas. [49] El fósforo del compostaje al igual que el nitrógeno no está fácilmente disponible para la absorción de las plantas ya que se incorpora en la materia orgánica. Algunos estudios en los que se usa compostaje como única fuente de fertilidad, se ha demostrado que la deficiencia de fósforo es mayor que la de nitrógeno y potasio. [48]

El potasio es un elemento fundamental para el crecimiento de las plantas debido a que ayuda a las plantas principalmente a disponer del agua. [50] Este elemento está más disponible en las plantas que el nitrógeno y el fósforo ya que no se incorpora en la materia orgánica; sin embargo, una gran parte del potasio se puede lixiviar ya que es soluble en agua. [48]

Desafortunadamente el valor nutritivo del compostaje es muy bajo (alrededor del 1,5%) teniendo en cuenta que los fertilizantes químicos industriales contienen alrededor de 10%. Comparando la aplicación de los abonos y de los fertilizantes, se necesitan alrededor de 70 libras de abono para agregar la misma cantidad de nutrientes que 10 libras de fertilizante. [51]

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuos usados y se determinó que el porcentaje de humedad de éstos sobrepasa el rango recomendado por diferentes autores consultados hasta por 22,65 puntos porcentuales; esto debido a que los residuos crudos contenían principalmente frutas y verduras como naranjas, mangos, uvas y pepinos los cuales se caracterizan por su alto contenido de agua y los residuos de poda estaban húmedos ya que días anteriores a su recolección había llovido. En cuanto al porcentaje de cenizas, se cumplió con el rango consultado y reportado por diferentes autores (entre el 1 y 5%) presentado un máximo de 2,4% en los residuos de poda. Es importante mencionar que las variaciones de pH no tienen un efecto significativo en el proceso de compostaje como si lo tiene por ejemplo la humedad.

Se determinó que la variable más influyente y limitante a la hora de la realización del proceso de compostaje es la humedad tanto la relativa del aire como la del sustrato ya que si está en exceso como ocurrió en la experimentación (78,10% en el producto final) podría generar un ambiente anaeróbico, el cual es un limitante para el crecimiento de microorganismos necesarios para la degradación de la materia orgánica y la generación de calor fundamental para la correcta formación de las diferentes etapas del proceso de compostaje. En cuanto a las emisiones del gas sulfuro de hidrogeno se determinó que las que se generaron durante el proceso no representaban un riesgo para la salud humana y el medio ambiente ya que se registró un pico máximo de 5,6 ppm y el permitido por el Ministerio de Salud y Protección Social es de 100 ppm en adelante.

Se valoraron los indicadores de desempeño del proceso y calidad del compost comparando los resultados obtenidos experimentalmente, los presentados por el laboratorio Agrilab y los rangos permitidos por la NTC 5167 y se concluyó que tanto la mezcla de residuos cargada al reactor como el producto de compostaje obtenido cumplen con lo establecido por la norma para productos de abono orgánico a excepción del porcentaje de humedad que estaba por encima del rango permitido el cual es 30%, por lo que no es apto para su aplicación. Por otro lado, con los resultados de las emisiones de gases a la atmósfera registrados por el reactor, se puede concluir que el único gas que se emitió fue el CO<sub>2</sub>, el cual al tener menos del 1% del contenido total de emisiones no representa un riesgo para el medio ambiente.

## RECOMENDACIONES

Con el fin de disminuir y ajustar el porcentaje de humedad de la mezcla de residuos que será usada para el proceso de compostaje, se sugiere agregar a la mezcla un agente de carga tal como paja, cascarilla de arroz o pasto seco.

Disminuir el tamaño de partícula del pasto para favorecer su degradación y así reducir el tiempo de residencia. También es importante secar el pasto antes del proceso cuando se requiera con el fin de evitar el aumento del contenido de humedad y con ello el exceso de lixiviados durante el proceso.

Aunque en la práctica es difícil controlar los tipos de residuos que se desechan, es recomendable evitar residuos que puedan aumentar el contenido de humedad, como ciertas frutas y escoger aquellos que tengan una mayor biodegradabilidad.

Para la cartelización del porcentaje de cenizas en las muestras que se tomen, se debe aumentar la temperatura de 650°C a 700°C por 4 horas. Su aspecto debe ser de color negro.

Realizar el proceso en un espacio que ojalá esté aislado con el fin de evitar la contaminación por parte de insectos como las moscas que pueden llegar debido a la degradación de los residuos orgánicos

Tomar muestras por duplicado o triplicado para disminuir el porcentaje de error durante la caracterización fisicoquímica de los residuos, así como no confiarse en los resultados que arroje un equipo ya que como en nuestro caso, pueden ser lejanos a los obtenidos experimentalmente.

Desarrollar la experimentación haciendo variaciones en los principales factores que afectan el proceso tales como la relación C:N, el porcentaje de humedad y los tipos de residuos.

Tener en cuenta la cantidad de vapor de agua que le ingresa al sistema por medio del humidificador haciendo seguimiento del volumen de agua que se le suministra al humidificador y la cantidad que sobra al final del proceso. Este valor (ingreso de agua al humidificador – sobrante de agua) sería la cantidad de agua que le ingresa al sistema en forma de vapor de agua por parte del humidificador.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adegoke Isiaka Adetunji a, Paul Johan Oberholster, Mariana Erasmus, “Bioreosource technology reports” (2023). [En línea]. Disponible en: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.uamerica.edu.co/science/article/pii/S2589014X23002815>
- [2] Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. Alcaldía mayor de Bogotá D.C., Bogotá. [En línea]. Disponible en: [https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP\\_SR.pdf](https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf)
- [3] R. Rynk “ The composting handbook” (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323856027/the-composting-handbook>
- [4] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos., Icontec, Bogotá, 2006
- [5] Decreto 1713 de 2002. 06 de agosto de 2002. "Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos". Bogotá, (Colombia)
- [6] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Definiciones, clasificaciones y fuentes de materias primas., Icontec, Bogotá, 2019
- [7] What a waste: An updated look into the future of solid waste management (20 de septiembre de 2018), The World Bank. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- [8] What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050, The World Bank. [En línea]. Disponible en: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)
- [9] Solid Waste Managment, (11 de febrero de 2022), The World Bank. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management#:~:text=In%202020%2C%20the%20world%20was,3.88%20billion%20tonnes%20in%202050.>

- [10] X. Cao, P. Williams, Y. Zhan, A. Coughlin, J. McGrath, J. Chin y Y. Xu, “Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling”, ScienceDirect, (2023), [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949919423000389>
- [11] Castro, A. “Doña Juana. Un delicado problema ambiental, social y económico”, Semana, (29 de julio de 2021). [En línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/opinion/articulo/dona-juana-un-delicado-problema-ambiental-social-y-economico/202129/>
- [12] E. Rivera, "Gestión de residuos orgánicos en Bogotá", Bogotá, Programa Empleos Verdes en la Economía Circular - PREVEC, noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/63dc2d814d066.pdf>
- [13] Hernández Ruydiaz, “Techno-economic and environmental assessment of the landfill gas to energy potential of major Colombian cities”. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423008683>
- [14] Ramírez, L. (11 de septiembre de 2022). Bogotá le apuesta a transformar residuos orgánicos en abono ¿te contamos cómo! Bogotá. [En línea]. Disponible en: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/como-se-convierten-los-residuos-organicos-en-abono-en-bogota-video#:~:text=Para%20convertirlos%20en%20abono%2C%20se,aire%20y%20se%20revuelven%20manualmente.>
- [15] S. S. GÓMEZ. "Botadero de doña Juana: la historia del basurero más grande de Bogotá". El Tiempo. [En línea]. Disponible en <https://www.eltiempo.com/bogota/botadero-de-dona-juana-historia-del-basurero-mas-grande-de-bogota-757750>
- [16] W. Bohorquez, “El proceso de compostaje”. (2019).1 ed. Bogotá: Ediciones Unisalle. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72/>
- [17] S. Kavitha, R. Yakesh Kannah, Gopalakrishnan Kumar, M. Gunasekaran y J. Rajesh Banu., “Food waste to valuable resources”, (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128183533/food-waste-to-valuable-resources>
- [18] Manual de compostaje del agricultor. FAO, Santiago de Chile. (2013). [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
- [19] R. Rynk “ On-farm composting handbook”, Apendice A, Tabla A.1. Typical characteristics of selected raw materials. [En línea]. Disponible en: <https://cwmi.css.cornell.edu/AppendixATable1OFCH.pdf>

- [20] A. Romero, F. Hidalgo. Estudio sobre maquinaria idónea para las labores de compostaje de alpeorujos. Junta de Andalucía. [En línea]. Disponible en: [https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/documento\\_completo.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/documento_completo.pdf)
- [21] Xact systems. “Reaching to the future of composting”. [En línea]. Disponible en: <https://xactsystemscomposting.com/>
- [22] Objetivos de Desarrollos Sostenible, (2015), Naciones Unidas, [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [23] CONPES 3934 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Política de crecimiento verde.10 de junio de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3934-de-2018/>
- [24] CONPES 3874 de 2016 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. 21 de noviembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3874-de-2016/>
- [25] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo., Icontec, Bogotá, 2011
- [26] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Etiquetado., Icontec, Bogotá, 2017
- [27] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Métodos cuantitativos para la determinación de potasio soluble en agua, en abonos o fertilizantes y fuentes de materias primas para su fabricación., Icontec, Bogotá, 2001
- [28] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo para la determinación cuantitativa del fósforo., Icontec, Bogotá, 1996
- [29] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo de granulometría en seco., Icontec, Bogotá, 2014
- [30] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Abonos o fertilizantes. Determinación del nitrógeno total., Icontec, Bogotá, 2011
- [31] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Determinación de azufre., Icontec, Bogotá, 2005
- [32] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Fertilizantes. Análisis físicos., Icontec, Bogotá, 2021



- [33] Resolución 00150 de 2003 [Instituto Colombiano Agropecuario]. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia. 21 de enero de 2003
- [34] Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias. 18 de julio de 1979. D.O. No. 35398
- [35] Resolución 2184 de 2019 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se modifica la resolución 668 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones.
- [36] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Gobierno unifica el código de colores para la separación de residuos en la fuente a nivel nacional”. [En línea]. Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4595-gobierno-unifica-el-codigo-de-colores-para-la-separacion-de-residuos-en-la-fuente-a-nivel-nacional>
- [37] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. Reducción del tamaño de muestras de agregados para la realización de ensayos., Icontec, Bogotá, 2022
- [38] Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, “Infraestructura y planta física”. [En línea]. Disponible en: <https://etitic.edu.co/archives/areapf16.pdf>
- [39] L.F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, L.F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, “Compost Science and Technology”. (2007). [En línea]. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=Gq1beUxTvWIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=Gq1beUxTvWIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [40] Cornell composting Science and engineering, “Oxygen Transport”. [En línea]. Disponible en: <https://compost.css.cornell.edu/oxygen/oxygen.transport.html>
- [41] United States Environmental Protection Agency. “ Composting. Yard and municipal solid waste”. [En línea]. Disponible en: [https://www.google.com.co/books/edition/Composting/T0f\\_APPZx0gC?hl=es&gbpv=1&dq=composting&printsec=frontcover](https://www.google.com.co/books/edition/Composting/T0f_APPZx0gC?hl=es&gbpv=1&dq=composting&printsec=frontcover)
- [42] D. E. Jiménez, “Modelación matemática del proceso de nitrificación en dos etapas. Desarrollo de metodologías de calibración del modelo para un reactor SHARON y un proceso de fangos activados”, doctoral thesis, Universitat Politècnica de València, 2010. Accedido el 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/8499>

- [43] Bueno Márquez, P. Díaz Blanco, M. J. Cabrera, Francisco. (2008). Factores que afectan el proceso de compostaje. Capítulo 4. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/20837>
- [44] Aimplas. (02 de julio de 2022), “ISO 14855: Biodegradabilidad aeróbica en condiciones de compostaje controladas”, [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/iqqg6Z>
- [45] Ministerio de Salud y Protección Social. “Convenio cooperación técnica No. 485/10. Lineamiento para la vigilancia sanitaria y ambiental del impacto de los olores ofensivos en la salud y calidad de vida de las comunidades expuestas en áreas urbanas”, Bogotá, (2012), [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/impacto-olores-ofensivos-salud.pdf>
- [46] IDAE (Instituto para la Diversificación y. Ahorro de la Energía), “Biomasa: Digestores anaerobios”, octubre de 2007, Madrid, España. Accedido el 23 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.idae.es/publicaciones/biomasa-digestores-anaerobios>
- [47] W. Chávez. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Cimav. “Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua, Méx.”. (2011). [En línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Ch%C3%A1vez%20Montes%20MCTA.pdf>
- [48] F Mangan, A. Barker, S. Bodine y P. Borten. University of Massachusetts Amherst. “Compost use and soil fertility”. Center for agricultura, food, and the environment. [En línea]. Disponible en: <https://ag.umass.edu/vegetable/fact-sheets/compost-use-soil-fertility#:~:text=0%20%2D%200.7-,Potassium,since%20it%20is%20water%20soluble>.
- [49] BioCycle. The organics recycling authority. “Phosphorus and compost use dynamics” (2016). [En línea]. Disponible en: <https://www.biocycle.net/phosphorus-compost-use-dynamics/>
- [50] Phoslab Testing Laboratories. “How does potassium help plants grow?”. (2013). [En línea]. Disponible en: <https://www.phoslab.com/how-does-potassium-help-plants-grow/>
- [51] University of Georgia. Collage of Agricultural & environmental sciences. “Compost enriches soil-but doesn’t replace fertilizer”. (2022). [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/47yWIo>

- [52] C. Velásquez Reyes. “Análisis fisicoquímico del proceso de co-compostaje a partir de biomasa residual de “El Carrasco”, según la normativa NTC 5167 de 2004”. Universidad Industrial de Santander. (2023). [En línea]. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/17cdcac8-d3d2-40a8-9f39-79202568c3ec/content>
- [53] J. Ortiz Díaz, “Evaluación del efecto de la incorporación de cenizas de manera en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en Versalles, Valle del Cauca”, Proyecto de grado, UNIV. AUTON. OCCIDENTE, SANTIAGO DE CALI, 2012. [En línea]. Disponible: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/5223/TIA01524.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [54] Advance Building Envelope Component. “Chapter 4-Experimental methods to compare building component”. ScienceDirect. (2019). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128169216000044>
- [55] Drying Technology in Food Processing. “20-Different parameter affecting the efficiency of dryers”. ScienceDirect. (2023). [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012819895700016X>
- [56] Secoin. “Humedad relativa: Qué es y por qué es importante controlarla”. (2019). [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/zKqlSp>
- [57] National Geographic. “Humidity”. [En línea]. Disponible en: <https://education.nationalgeographic.org/resource/humidity/>
- [58] Quest. “¿Qué es la humedad relativa y por qué es importante?”. (2020). [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/huiKi3>
- [59] Departamento Nacional de Planeación, "Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020", Bogotá, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_df\\_2020%20\(1\).pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20(1).pdf)
- [60] A.Villas, S. Ingouville. Guía de compostaje. Punto Compost, Buenos Aires, Argentina. [En línea]. Disponible en: <https://puntocompost.wordpress.com/productos/>

[61] Polymaster, “What is the difference between stated volume and effective volume?”, [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/u6WP1E>

[62] Biofísica ambiental by Labferrer. “Concentración de oxígeno en el compostaje”, España, 23 de septiembre de 2020, [En lima]. Disponible en: <https://acortar.link/DqoHqC>

## GLOSARIO

**Residuos:** son aquellos materiales o subproductos que resultan tras la finalización de un proceso degradable de alimentos, plantas o animales. Los residuos se pueden clasificar como sólidos, líquidos, orgánicos, reciclables o peligrosos. [1]

**Residuos orgánicos:** Son los residuos naturales que se descomponen fácilmente en el ambiente. Dentro de estos residuos se puede encontrar restos de residuos vegetales, alimentos, papeles, estiércol, residuos de cosecha, pasto, madera y cualquier otro residuo que puede ser transformado fácilmente en materia orgánica. [2]

**Compostaje:** Es la descomposición aeróbica de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos en condiciones controladas. La materia prima usada en el compostaje consta de estiércol, hojas, recorte de poda, papel, residuos de alimentos y cualquier materia orgánica. Estos residuos contienen energía, nutrientes, minerales y microorganismos que pueden resultar beneficiosos para el suelo, los cultivos, las personas y el medio ambiente. [3]

**Gestión integral de los residuos:** Son el conjunto de operaciones dispuestas para dar a los residuos un aprovechamiento más adecuado, desde el punto de vista ambiental, teniendo en cuenta sus características, procedencia, costos, volumen, tratamiento y posibilidad de reutilización, comercialización y disposición final. [4]

**Rellenos sanitarios:** Es el lugar diseñado y seleccionado para la disposición controlada de los residuos sólidos, sin que causen algún peligro, daño o riesgo para la salud pública, controlando los impactos ambientales, los gases y lixiviados en un área mínima. [5]

**Acondicionadores orgánicos de suelo:** Es toda la materia orgánica natural, aplicado para mejorar las propiedades físicas y la actividad biológica en el suelo. [6]

**Disponibilidad:** Son la cantidad de nutrientes presentes en el suelo que se puede solubilizar y ser asimilados por una planta u organismo. [6]

**Fertilizante:** Es el producto que se aplica al suelo o a plantas con el fin de suministrar uno o más nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo. [6]

**Cenizas:** Es el residuo mineral resultante, después de la incineración de la materia orgánica. [6]

**Humedad:** Es el agua que se puede extraer mediante un método especificado. [6]

**Lixiviado:** Líquido resultante del proceso de transformación de los residuos. [6]

## **ANEXOS**

## ANEXO 1.

### DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA MATERIA PRIMA.

**Tabla 13.**

*Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de humedad*

	<b>RESIDUOS CRUDOS</b>	<b>RESIDUOS COCINADOS</b>	<b>RECORTES DE PODA</b>
<b>CRISOL VACÍO Y SECO (g)</b>	43,726	40,980	42,742
<b>CRISOL + RESIDUO SECO (g)</b>	44,348	42,497	43,647
<b>MASA RESIDUO INICIAL (g)</b>	5	5	5
<b>MASA RESIDUO SECO (FINAL) (g)</b>	0,622	1,517	0,905

**Nota.** Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de humedad.

**Tabla 14.**

*Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de cenizas.*

	<b>RESIDUOS CRUDOS</b>	<b>RESIDUOS COCINADOS</b>	<b>RECORTES DE PODA</b>
<b>CRISOL VACÍO Y SECO (g)</b>	43,726	40,980	42,742
<b>CRISOL + RESIDUO CALCINADO (g)</b>	43,800	41,100	42,800
<b>MASA RESIDUO INICIAL (g)</b>	5	5	5
<b>MASA RESIDUO CALCINADO (g)</b>	0,074	0,120	0,058

**Nota.** Datos necesarios para el cálculo del porcentaje de cenizas.

**Tabla 15.**

*Datos necesarios para el cálculo de la densidad.*

	<b>RESIDUOS CRUDOS</b>	<b>RESIDUOS COCINADOS</b>	<b>RECORTES DE PODA</b>
<b>MASA PROBETA VACÍA (g)</b>	51,2	54,7	49,7
<b>MASA PROBETA LLENA (g)</b>	156,7	158,6	75,5
<b>VOLUMEN PROBETA (ml)</b>	100	100	100

**Nota.** Datos necesarios para el cálculo de la densidad de los residuos.











## ANEXO 2.

### EQUIPOS Y MATERIALES COMPLEMENTARIOS.

**Tabla 16.**

*Equipos y materiales complementarios.*

EQUIPO MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN	NOTA
Desecador	Usado para retirar la humedad de los crisoles o capsulas de porcelana y para reducir la temperatura una vez salen de los equipos calientes.		Imagen toma de Kasalab. Disponible en <a href="https://www.kasalab.com/producto/desecador-en-vidrio-300mm-con-llave-y-placa-de-porcelana/">https://www.kasalab.com/producto/desecador-en-vidrio-300mm-con-llave-y-placa-de-porcelana/</a>
Crisoles de porcelana con tapa 34 ml	Usado para poner las muestras y realizarle las pruebas de humedad y cenizas ya que resisten altas temperaturas.		Imagen tomada de Pinzuar. Disponible en: <a href="https://www.pinzuar.com.co/product/23">https://www.pinzuar.com.co/product/23</a>
Capsula de porcelana 75 ml	Usado para poner las muestras y realizarle las pruebas de humedad y cenizas ya que resisten altas temperaturas.		Imagen tomada de Abc laboratorios. Disponible en: <a href="https://abclaboratorios.com/producto/capsula-de-porcelana-con-pico-8/">https://abclaboratorios.com/producto/capsula-de-porcelana-con-pico-8/</a>
Pinzas metálicas	Usadas para manipular los recipientes en los que se hacían las muestra con el fin de contaminarlos ni quemarnos.		Imagen tomada de Norquímicos. Disponible en: <a href="https://norquimicos.com.co/producto/pinza-metalicas-para-crisol-labscient/">https://norquimicos.com.co/producto/pinza-metalicas-para-crisol-labscient/</a>

Balanza	Usada para medir el peso de las muestras.		Imagen tomada de Auxilab. Disponible en: <a href="https://www.auxilab.es/es/productos-laboratorio/balanza-analitica-cent-4000-/">https://www.auxilab.es/es/productos-laboratorio/balanza-analitica-cent-4000-/</a>
Recipientes plásticos	Usados para sacar muestras del reactor y almacenarlos por periodos cortos de tiempo.		Imagen tomada de Plásticos Uchosa. Disponible en: <a href="https://plasticos-uchosa.com/producto/opper-hermetico/">https://plasticos-uchosa.com/producto/opper-hermetico/</a>
Probeta plástica 100 ml	Usada para medir el volumen de la mezcla cargada al reactor.		Imagen tomada de Norquímicos. Disponible en: <a href="https://norquimicos.com.co/producto/probetas-plasticas-graduada-en-alto-relieve-p-p-vitlab/">https://norquimicos.com.co/producto/probetas-plasticas-graduada-en-alto-relieve-p-p-vitlab/</a>
Beaker de vidrio 100 ml	Usado para contener las mezclas y para calcular el volumen de la muestra.		Imagen tomada de Corning. Disponible en: <a href="https://acortar.link/sF6t6g">https://acortar.link/sF6t6g</a>

**Nota.** Equipos y materiales complementarios para la caracterización fisicoquímica de los residuos.

### ANEXO 3.

#### TABLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTACIÓN.

**Tabla 17.**

*Temperatura del sustrato registrada por el reactor en la experimentación.*

	DÍA 1	DÍA 4	DÍA 6	DÍA 8	DÍA 11	DÍA 13	DÍA 15	DÍA 20	DÍA 22
<b>CONTENIDO</b>	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla
<b>T (°C)</b>	31,90	30,56	25,04	22,72	23,38	23,21	28,25	32,12	30,80

**Nota.** Temperatura del sustrato registrada por el reactor.

**Tabla 18.**

*Temperatura en la entrada registrada por el reactor en la experimentación.*

	DÍA 1	DÍA 4	DÍA 6	DÍA 8	DÍA 11	DÍA 13	DÍA 15	DÍA 20	DÍA 22
<b>CONTENIDO</b>	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla
<b>T (°C)</b>	34,04	32,23	25,54	23,21	23,71	23,79	28,50	29,72	30,46

**Nota.** Temperatura en la entrada registrada por el reactor.

**Tabla 19.**

*Temperatura en la salida registrada por el reactor en la experimentación.*

	DÍA 1	DÍA 4	DÍA 6	DÍA 8	DÍA 11	DÍA 13	DÍA 15	DÍA 20	DÍA 22
<b>CONTENIDO</b>	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla	mezcla
<b>T (°C)</b>	29,52	27,31	24,72	22,66	23,27	23,13	24,10	26,04	26,83

**Nota.** Temperatura a la salida del proceso registrada por el reactor.

**Tabla 20.**

*Lecturas de pH registradas por el reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>pH</b>	7,03	6,99	6,99	6,98	6,99	6,98	6,87	7,26	7,70

**Nota.** Lecturas de pH arrojadas por el reactor.

**Tabla 21.**

*Lecturas de pH tomadas por las autoras experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>pH</b>	4,58	4,00	6,65	8,19	7,95	7,95	8,06	8,12	8,10

**Nota.** Lecturas de pH tomadas en la experimentación.

**Tabla 22.***Porcentaje de humedad en el sustrato registrada por el reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% Humedad</b>	36,88	36,98	37,80	38,13	37,93	38,02	36,80	36,89	36,97

**Nota.** Porcentaje de humedad en el sustrato registrada por el reactor.**Tabla 23.***Porcentaje de humedad entrada del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% Humedad</b>	44,16	45,53	58,46	64,44	60,29	59,83	61,55	55,02	49,01

**Nota.** Porcentaje de humedad del aire en la entrada del proceso registrada por el reactor.**Tabla 24.***Porcentaje de humedad salida del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% Humedad</b>	35,80	39,25	55,40	61,85	57,19	57,08	57,49	49,03	43,76

**Nota.** Porcentaje de humedad del aire en la salida del proceso registrada por el reactor.**Tabla 25.***Porcentaje de humedad calculada por las autoras experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% Humedad</b>	80,50	81,00	83,50	89,10	77,10	76,00	77,10	77,60	78,10

**Nota.** Porcentaje de humedad registrada en la experimentación.**Tabla 26.***Consolidado mediciones porcentaje de cenizas base seca experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% Cenizas</b>	0,488	0,380	0,264	1,493	2,290	2,400	2,496	2,598	2,475

**Nota.** Porcentaje de cenizas tomadas en la experimentación.**Tabla 27.***Emisiones O<sub>2</sub> entrada del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% O<sub>2</sub></b>	20,56	20,33	20,33	20,21	20,32	20,26	20,15	20,32	20,32

**Nota.** Emisiones de oxígeno en la entrada del proceso arrojadas por el reactor.

**Tabla 28.***Emisiones O<sub>2</sub> salida del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>% O<sub>2</sub></b>	19,19	19,12	19,09	19,02	19,02	19,05	19,02	19,13	19,12

**Nota.** Emisiones de oxígeno en la salida del proceso arrojadas por el reactor.**Tabla 29.***Emisiones CO<sub>2</sub> entrada del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	40,47	24,85	20,60	20,34	17,05	13,53	179,24	31,94	37,82

**Nota.** Emisiones dióxido de carbono en la entrada del proceso registrada por el reactor.**Tabla 30.***Emisiones CO<sub>2</sub> salida del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	124,71	113,93	160,84	209,65	226,80	225,04	1245,63	503,10	473,24

**Nota.** Emisiones dióxido de carbono en la salida del proceso registrada por el reactor.**Tabla 31.***Emisiones H<sub>2</sub>S salida del reactor experimentación.*

	Día 1	Día 4	Día 6	Día 8	Día 11	Día 13	Día 15	Día 20	Día 22
<b>CONTENIDO</b>	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
<b>H<sub>2</sub>S (ppm)</b>	4,65	5,23	5,53	5,50	5,53	5,54	4,00	3,28	3,52


**Nota.** Emisiones ácido sulfhídrico registradas por el reactor.

## ANEXO 4.

# INFORME COMPLETO ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS DE RESIDUOS CARGADOS AL REACTOR AL INICIO DEL PROCESO.

**Figura 45.**

Resultados análisis Agrilab al inicio de experimentación

	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<small>Registro ICA LB006834021 Control de calidad de servicios, procedimientos de trabajo y regulaciones técnicas. Vigencia 11 de Nov. de 2011</small>		
<b>ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS</b>				
<b>Informe N°</b>	<b>31026-V1-2023</b>	<b>N° de Laboratorio</b>	<b>AMO-01666-2023</b>	
<b>Información del Cliente</b>				
<b>Remitente</b>	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	<b>Responsable</b>	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	
<b>Propietario</b>	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	<b>Email contacto</b>	diana.cuesta@profesores.uamerica.edu.co	
<b>Fecha Ingreso</b>	28-07-2023	<b>Fecha Emisión</b>	14-08-2023	
<b>Información de la Muestra Suministrada por el cliente</b>				
<b>Identificación Suministrada</b>	DIA 1 _ 21/07/2023	<b>Lote / Bloque</b>	COMPOSTAJE REACTOR	
<b>Fuente del Material / Inf. Adicional</b>	NINGUNA	<b>Contrato N°</b>		
<b>Descripción Física</b>	SÓLIDO CAFÉ	<b>Condiciones recepción</b>	CONFORME	
<b>CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS SÓLIDOS</b>				
Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Humedad	N.A.	88.2	%	40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167 (r)
pH en pasta de saturación	pH	4.19	Unidades de pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167 (r)
Conductividad Eléctrica	CE	7.84	dS/m	Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167 (r)
Retención de Humedad	Ret. Hum.	34.0	%	Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Cenizas	N.A.	0.719	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Pérdidas por Volatilización	N.A.	11.1	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC	CIC	7.29	meq/100g	Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167 (r)
Densidad Real (en base seca)	N.A.	0.398	g/cm3	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	3.75	%	Sin. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r)
Relación Carbono / Nitrógeno	C/N	16	Adimensional	Relación matemática
<b>CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL</b>				
Nitrógeno Total	NT	0.237	%	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	0.237	%	Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167-NTC 370 (r)
Fósforo total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.063	%	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimetría / NTC 234 (r)
Potasio Total	K <sub>2</sub> O	0.263	%	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - NTC 202 (r)
Calcio total	CaO	0.048	%	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Magnesio total	MgO	0.031	%	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Azufre total	S	0.020	%	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167 - IGAC(1982)-NTC 1154 (r)
Hierro total	Fe	16.0	mg/kg	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Manganeso total	Mn	2.98	mg/kg	MvH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Cobre Total	Cu	I.L.C.M.	mg/kg	M/H Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Zinc Total	Zn	25.1	mg/kg	M/H Ác. Nítrico:Ác. Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Boro total	B	7.72	mg/kg	M/H Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167 - NTC 1860 (r)
Sodio Total	Na	0.023	%	M/H Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - NTC 1146 -EPA 7000B (r)
Silicio total	SiO <sub>2</sub>	0.090	%	M/H HF / EAA / NTC 5167 (r)
Residuo Insoluble en Ácido	N.A.	0.092	%	M/H Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Gravimétrica / NTC 5167
<b>Observaciones a los resultados:</b>		<b>Convenciones:</b>		
Análisis en kit con la muestra ABR-00451-2023.		N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D. No Detectado / M/H Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente / EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EEA Espectroscopía de Emisión Atómica / ICP-OES Espectroscopía de Emisión Óptica de plasma acoplado inductivamente / EAM Extracción Asistida con Microondas		

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

**Autorizado por:**



Eder Alejandro Arca

Director Técnico Operativo - Química - PQ 3083

**Revisado por:**



Paola Díaz

Coordinador de Área -Química- PQ 3257

---- Fin del Informe ----

Nota:

PARA MUESTRAS SÓLIDAS LOS RESULTADOS CONSIGNADOS EN EL PRESENTE INFORME ESTÁN EXPRESADOS EN BASE HÚMEDA

1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
2. El informe solo tiene validez si está firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
3. La información contenida en este informe es de carácter confidencial, por lo cual su reproducción total o parcial, solo podrá ser hecha con autorización expresa de AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. o por el cliente propietario del mismo.
4. La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión del presente informe de resultados.
5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestras en campo, por lo tanto la idoneidad y representatividad de la muestra analizada y por ende de sus resultados, es responsabilidad del remitente de la misma.
6. En el caso de análisis subcontratados, AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente del trabajo realizado por el subcontratista, siempre y cuando este haya sido aprobado y contratado por el laboratorio y aceptado por el cliente.
7. La verificación de resultados mediante ensayos de laboratorio, se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados, siempre y cuando las condiciones de estabilidad del análisis en la muestra permitan su reproducibilidad.
8. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus Peticiones, Quejas, Reclamos o Sugerencias (PQRS) sobre los resultados emitidos y/o los servicios prestados, hemos dispuesto el siguiente correo electrónico: [serviciocliente@agrilab.com.co](mailto:serviciocliente@agrilab.com.co), por favor comuníquese con nosotros a través de este medio y con gusto le brindaremos una respuesta clara y oportuna a su solicitud.
9. Los métodos analíticos empleados para realizar las determinaciones, están clasificados de acuerdo con su reconocimiento como análisis ACREDITADOS (a), REGISTRADOS ANTE EL ICA (r) o subcontratados (s). Esta clasificación se puede observar en la columna: Extracción/Técnica/Documento Normativo.

CENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA E INDUSTRIAL

Calle 798 Nº 75-36 Bogotá, D.C. Pbx: 7454697 / 333 1999

Para Peticiones, Quejas, Reclamos y/o Sugerencias comuníquese al E-mail: [serviciocliente@agrilab.com.co](mailto:serviciocliente@agrilab.com.co)  
[www.agrilab.com.co](http://www.agrilab.com.co)


**Nota.** Resultados caracterización fisicoquímica suministrados por el laboratorio Agrilab al inicio del proceso.

ANEXO 5.

INFORME COMPLETO ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS DEL PRODUCTO OBTENIDO TRAS LA FINALIZACIÓN DEL PROCESO.

Figura 46.

Resultados análisis Agrilab al final de la experimentación.

		<b>INFORME DE RESULTADOS</b> <b>ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS</b>		Registro ICA LB0000342621 <small>Centro de control de fertilizantes, acondicionadores de suelo y reguladores biológicos.</small> Vigencia 17 de Nov. de 2021
Informe N°	34608-V1-2023	N° de Laboratorio	AMO-01864-2023	
Información del Cliente				
Remitente	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	Responsable	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	
Propietario	UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS	Email contacto	diana.cuesta@profesores.uamerica.edu.co	
Fecha Ingreso	25-08-2023	Fecha Emisión	12-09-2023	
Información de la Muestra Suministrada por el cliente				
Identificación Suministrada	MUESTRA REACTOR	Lote / Bloque	N.S.	
Fuente del Material / Inf. Adicional	17-08-2023	Contrato N°		
Descripción Física	SÓLIDO CAFÉ	Condiciones recepción	MUESTRA INSUFICIENTE PARA VERIFICACIÓN	
CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS SÓLIDOS				
Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Humedad	N.A.	83.4	%	40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167 (r)
pH en pasta de saturación	pH	7.76	Unidades de pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167 (r)
Conductividad Eléctrica	CE	2.72	dS/m	Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167 (r)
Retención de Humedad	Ret. Hum.	52.7	%	Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Cenizas	N.A.	1.59	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Pérdidas por Volatilización	N.A.	15.0	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC	CIC	10.3	meq/100g	Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167 (r)
Densidad Real (en base seca)	N.A.	0.311	g/cm3	Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r)
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	6.07	%	Sin. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r)
Relación Carbono / Nitrógeno	C/N	9.9	Adimensional	Relación matemática
CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Nitrógeno Total	NT	0.613	%	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	0.613	%	Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167-NTC 370 (r)
Fósforo total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.174	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimetría / NTC 234 (r)
Potasio Total	K <sub>2</sub> O	0.486	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - NTC 202 (r)
Calcio total	CaO	0.236	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Magnesio total	MgO	0.072	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Azufre total	S	0.067	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167 - IGAC(1962) - NTC 1154 (r)
Hierro total	Fe	61.1	mg/kg	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Manganeso total	Mn	8.25	mg/kg	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)



CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Cobre Total	Cu	3.55	mg/kg	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Zinc Total	Zn	19.8	mg/kg	MVH Ác. Nítrico:Ác. Perclórico / EAA / NTC 5167 - EPA7000B (r)
Boro total	B	4.47	mg/kg	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167 - NTC 1865 (r)
Sodio Total	Na	0.056	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - NTC 1146 -EPA 7000B (r)
Silicio total	SiO <sub>2</sub>	0.354	%	MVH HF / EAA / NTC 5167 (r)
Residuo Insoluble en Ácido	N.A.	0.374	%	MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Gravimétrico / NTC 5167
<b>Observaciones a los resultados:</b>			<b>Convenciones:</b>	
Análisis en kit con la muestra ABR-00477-2023.			N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado / MVH Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente / EAA Espectroscopia de Absorción Atómica / EEA Espectroscopia de Emisión Atómica / ICP-OES Espectroscopia de Emisión Óptica de plasma acoplado inductivamente / EAM Extracción Asistida con Microondas	

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

**Autorizado por:**

Edoardo Alejandro Ariza

Director Técnico Operativo - Química - Pq 3061

**Revisado por:**

Paola Díaz

Coordinador de Área-Química-PQ 3257

---- Fin del Informe ----

**Notas:**

PARA MUESTRAS SÓLIDAS LOS RESULTADOS CONSIGNADOS EN EL PRESENTE INFORME ESTÁN EXPRESADOS EN BASE HÚMEDA.

1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
2. El informe solo tiene validez si está firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
3. La información contenida en este informe es de carácter confidencial, por la cual su reproducción total o parcial, solo podrá ser hecha con autorización expresa de AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. o por el cliente propietario del mismo.
4. La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión del presente informe de resultados.
5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto la idoneidad y representatividad de la muestra analizada y por ende de sus resultados, es responsabilidad del remitente de la misma.
6. En el caso de análisis subcontratados, AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente del trabajo realizado por el subcontratado, siempre y cuando este haya sido aprobado y controlado por el laboratorio y aceptado por el cliente.
7. La verificación de resultados mediante ensayos de laboratorio, se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados, siempre y cuando las condiciones de estabilidad del ensayo en la muestra permitan su reproducibilidad.
8. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus Peticiones, Quejas, Reclamos o Sugerencias (PQRS) sobre los resultados emitidos y/o los servicios prestados, hemos dispuesto el siguiente correo electrónico: [serviciocliente@agrilab.com.co](mailto:serviciocliente@agrilab.com.co), por favor comuníquese con nosotros a través de este medio y tan pronto le brindaremos una respuesta clara y oportuna a su solicitud.
9. Los métodos analíticos empleados para realizar las determinaciones, están clasificados de acuerdo con su reconocimiento como análisis ACREDITADOS (A), REGISTRADOS ANTE EL ICA (R) o subcontratados (S). Esta clasificación se puede observar en la columna: Característica Técnica/Documento Normativo.

Ciencia y Tecnología al Servicio del Sector Agrícola e Industrial  
 Calle 798 N° 70-16 Bogotá, D.C. Pbx: 745-6697 / 323 1999  
 Para Peticiones, Quejas, Reclamos y/o Sugerencias comuníquese al E-mail: [serviciocliente@agrilab.com.co](mailto:serviciocliente@agrilab.com.co)  
[www.agrilab.com.co](http://www.agrilab.com.co)

**Nota.** Resultados caracterización fisicoquímica suministrados por el laboratorio Agrilab al final del proceso.