



**Fortalecimiento de la gestión de residuos orgánicos en la Universidad de San Buenaventura  
mediante estrategias de mejora en el proceso de elaboración de pacas biodigestoras**

Laura Stefania Julio Murillo

Trabajo final de práctica académica para optar al título de Ingeniero Ambiental

Semestre de industria

Asesor interno.

Angela María Rendón Pérez, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Asesor externo.

Osmara Geraldine Vargas Martínez, Ingeniera Ambiental.

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Ambiental  
Medellín, Antioquia, Colombia

2025

---

<b>Cita</b>	(Julio Murillo, 2025)
<b>Referencia</b>	Julio, L. (2025). <i>Fortalecimiento de la gestión de residuos orgánicos en la Universidad de San Buenaventura mediante estrategias de mejora en el proceso de elaboración de pacas biodigestoras</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Quiero dedicarle este logro a mi madre, Dora Murillo, que ha sido el motor de mi vida, la razón por la que me esfuerzo más en todo lo que hago, mi mayor compañía y soporte durante mi paso por la universidad.

A mi abuela, Doris, que con su amor y entrega ha iluminado mi vida y ha calmado las penas de mi corazón. A mi familia, que me ha apoyado en el camino y han vivido de cerca todos los momentos buenos y no tan buenos durante todos estos años. A mis amistades más sinceras, en quienes he encontrado felicidad y respaldo.

Por último, pero no menos importante a mi novio, Eduar, quien ha sido pieza fundamental en mi vida y mi proceso, quien me ha ayudado en todo momento y quien cree en mí cuando yo dejo de hacerlo.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a la Universidad de Antioquia, mi alma mater, la institución que ha sido mi hogar durante esta etapa tan importante en mi vida y me ha acompañado en las distintas etapas que he atravesado durante todos estos años. Gracias por el conocimiento, aprendizaje y experiencias que he recolectado en ese mágico lugar.

A los profesores que han marcado mi carrera y me han hecho enamorarme y apasionarme mucho más.

Agradezco a la Universidad de San Buenaventura sede Medellín que me recibió con los brazos abiertos, me llenó de aprendizaje y me apoyó ampliamente en la elaboración de este proyecto.

## Tabla de contenido

Resumen.....	9
Abstract .....	10
1. Introducción .....	11
2. Objetivos .....	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos .....	13
3. Marco teórico .....	14
3.1 Gestión de residuos sólidos.....	14
3.2 Residuos sólidos orgánicos y su aprovechamiento .....	16
3.3 El Compostaje y sus fases.....	17
3.4 Parámetros fisicoquímicos .....	20
3.5 Pacas biodigestoras .....	22
3.6 Estabilidad, madurez y calidad del compost.....	24
4. Metodología .....	26
4.1 Participación en la elaboración de pacas biodigestoras .....	26
4.2 Entrevista a expertos en el campo.....	28
4.3 Revisión bibliográfica.....	29
4.4 Análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos.....	32
4.4.1 Medición de pH. ....	34
4.4.2 Contenido de humedad. ....	34
4.4.3 Contenido de cenizas.....	36
5. Resultados y análisis .....	38
5.1 Resultados de análisis en laboratorio.....	42
6. Conclusiones y recomendaciones .....	45

6.1 Estrategias de mejora para el proceso de compostaje con pacas biodigestoras.....	45
6.1.1 Capacitación al personal de los restaurantes sobre compostaje y el sistema de pacas biodigestoras de la USB .....	45
6.1.2 Instalación de contenedores exclusivos para residuos orgánicos en las cocinas de los restaurantes .....	46
6.1.3 Creación de una guía o manual del proceso de compostaje en la USB.....	46
6.1.4 Plan de monitoreo de parámetros de control durante el compostaje.....	47
6.1.5 Pretratamiento de los alimentos orgánicos .....	48
Referencias.....	50
Anexo N. Poster .....	53

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros implementados durante la búsqueda de material bibliográfico.	29
<b>Tabla 2.</b> Portafolio bibliográfico.	29
<b>Tabla 3.</b> Resultados análisis en laboratorio.	42
<b>Tabla 4.</b> Valores permisibles para abonos o fertilizantes orgánicos sólidos NTC 5167- 2011.	42

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Proceso de compactación de pacas biodigestoras.	27
<b>Figura 2.</b> Muestras de compost resultante.	33
<b>Figura 3.</b> Procedimiento en laboratorio para el hallazgo de contenido de humedad.	35
<b>Figura 4.</b> Hallazgos durante la elaboración de pacas biodigestoras 1.	38
<b>Figura 5.</b> Hallazgos durante la elaboración de pacas biodigestoras 2.	39
<b>Figura 6.</b> Pacas biodigestoras desechas por actividad de carroña. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	

## Lista de ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Fórmula para porcentaje de humedad.	36
<b>Ecuación 2.</b> Fórmula para porcentaje de cenizas	37

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>APA</b>	American Psychological Association
<b>USB</b>	Universidad de San Buenaventura
<b>PMIRS</b>	Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>AIDIS</b>	Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>NTC</b>	Norma Técnica Colombiana
<b>CIC</b>	Capacidad de Intercambio Catiónico
<b>CRA</b>	Retención de Humedad
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>MP</b>	Microplásticos
<b>PE</b>	Polietileno
<b>PS</b>	Poliestireno
<b>ICA</b>	Instituto Colombiano Agropecuario

---

## Resumen

La implementación de pacas biodigestoras en la sede Bello de la Universidad de San Buenaventura es una alternativa ecológica e innovadora en el marco de la gestión de residuos orgánicos, además de ser una alternativa que se ajusta al modelo de economía circular. Sin embargo, es importante conocer la calidad del abono orgánico resultante del proceso e implementar prácticas que contribuyan a mejorar la calidad del compost, para que así pueda ser aprovechado de manera eficiente. En este sentido, este trabajo académico busca fortalecer la gestión de residuos orgánicos de la Institución a través de estrategias de mejora en el proceso de elaboración de las pacas biodigestoras.

La metodología incluyó entrevistas a expertos en gestión de residuos orgánicos, revisión de literatura y análisis de parámetros en laboratorio, como pH, porcentaje de humedad y cenizas. Al comparar los valores obtenidos en el trabajo con los estándares establecidos en la norma **NTC 5167 de 2011**, se evidenció que el porcentaje de humedad y cenizas no cumple con los requisitos de calidad. Además, se participó activamente en la elaboración de las pacas biodigestoras, identificando problemas como la falta de seguimiento al proceso y a sus parámetros de control, predominancia de ciertos tipos de residuos y plásticos en el material de partida, factores que afectan negativamente la calidad del compost resultante. Los resultados obtenidos de los pasos mencionados fueron la base para la realización de las propuestas de mejora al sistema.

*Palabras clave:* Gestión de residuos orgánicos, estrategias, pacas biodigestoras, abono orgánico, calidad, estabilidad, parámetros.

### **Abstract**

The implementation of biodigester bales at the Bello site of the University of San Buenaventura is an ecological and innovative alternative in the context of organic waste management, as well as being an alternative that fits into the circular economy model. However, it's important to know the quality of the organic compost resulting from the process and implement practices that contribute to improving the quality of the compost so that it can be used efficiently. In this sense, this academic work seeks to strengthen the management of organic waste of the institution through strategies for improving the process of processing biodigester bales.

The methodology included interviews with experts in organic waste management, literature review and laboratory analysis of parameters such as pH, moisture percentage and ash. When comparing the values obtained in the work with the standards set out in the **NTC 5167 of 2011**, it was shown that the percentage of moisture and ash doesn't meet the quality requirements. In addition, we have been actively involved in the development of biodigesters bales, identifying problems such as lack of process control and control parameters, the predominance of certain types of waste and plastics in the raw material factors that negatively affect the quality of the resulting compost. The results obtained from the above steps were the basis for the implementation of the system improvement proposals.

*Keywords:* Management of organic waste, strategies, biodigester bales, organic fertilizer, quality, stability, parameters.

## **1. Introducción**

Las pacas biodigestoras son una tecnología alternativa que posibilita el tratamiento integral de los residuos orgánicos, convirtiendo la materia orgánica en abono mediante un proceso de fermentación (Silva, 2012, como se citó en Ossa, 2020). La Universidad de San Buenaventura (USB) sede Bello ha implementado esta tecnología desde hace algunos años, con el objetivo de contribuir a una adecuada gestión de residuos orgánicos y generar un impacto positivo en el medio ambiente, ya que, cuando los residuos orgánicos llegan a los rellenos sanitarios son ocasionando contaminación principalmente en el suelo y en las fuentes de agua tanto subterránea como superficial.

El sistema de pacas biodigestoras en la Universidad de San Buenaventura se implementa con la finalidad de aprovechar los residuos orgánicos generados en el campus, que corresponden a 31 kilogramos diarios aproximadamente (Unidad de gestión ambiental de la Universidad de San Buenaventura, 2024). Este sistema va de la mano del Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos (PMIRS) que se ejecuta en la Universidad y además contribuye con la misión y visión Bonaventuriana que se enfoca en la responsabilidad social y ambiental (Universidad de San Buenaventura Medellín, 2022).

La Universidad de San Buenaventura (USB) cumple con la gestión de los residuos orgánicos gracias al sistema de pacas biodigestoras, sin embargo, el material resultante no tiene un uso específico o práctico, y, por tanto, se requiere mejor conocimiento de condiciones como la madurez y estabilidad del compost, así como de mejoras en falencias identificadas en el proceso

de elaboración. De esta manera el abono orgánico generado dentro del sistema podrá ser aprovechado de manera adecuada.

A razón de ello, el propósito del presente trabajo es potenciar el sistema de pacas biodigestoras que se lleva a cabo en la sede Bello de la Universidad de San Buenaventura mediante estrategias de mejora en el proceso de elaboración de las pacas, para así contribuir a un correcto aprovechamiento e incrementar el potencial del abono resultante.

Con el objetivo de mejorar el proceso actual, se participa activamente en la elaboración de las pacas para identificar aspectos críticos que influyan negativamente en el proceso, se realizan análisis de laboratorio del compost que se obtiene con la finalidad de identificar el valor de parámetros clave en su estabilidad y madurez. También, se realiza revisión documental y entrevistas a expertos en el tema. La sumatoria de estos ítems conforman la metodología para que las estrategias de mejora planteadas sean las adecuadas para el sistema, y que de este modo se pueda ampliar el aprovechamiento del compost generado en la Universidad de San Buenaventura sede Bello.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Fortalecer la gestión de residuos orgánicos en la sede Bello de la Universidad de San Buenaventura mediante estrategias de mejora en el proceso de elaboración de pacas biodigestoras.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Calcular los valores de los parámetros fisicoquímicos necesarios para el análisis de la estabilidad y calidad del abono orgánico que se genera actualmente en el campus.
- Identificar los parámetros que presentan valores inadecuados e influyen en el material resultante.
- Analizar qué componentes pueden interferir en la estabilidad y calidad del abono en el proceso de fabricación de las pacas biodigestoras.
- Presentar estrategias aplicables al proceso de elaboración de las pacas biodigestoras que permitan mejorar las deficiencias identificadas.
- Proponer formas de aprovechamiento del abono orgánico si se implementan las estrategias de mejora.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 Gestión de residuos sólidos**

La generación de residuos sólidos va ligada al crecimiento poblacional, ya que los residuos sólidos son generados por la actividad humana. Mientras más humanos habiten un país más residuos sólidos van a aparecer como resultados de sus actividades humanas. En el año 2014 la generación anual de residuos sólidos por habitante en Colombia era de 283 kilogramos. Se estima que para el 2030 esta cifra esté cerca a los 321 kilogramos. La buena gestión de residuos sólidos es la clave para alivianar un poco la presión por el inminente aumento de este tipo de contaminación con el pasar de los años. En este sentido, la gestión de residuos sólidos se refiere a todo el proceso de separación, recolección, tratamiento y disposición final de los residuos. (Gobierno de Colombia, 2016).

La mala gestión de residuos sólidos trae consigo diversos impactos negativos en diferentes esferas ambientales. La contaminación en las fuentes de agua superficial y subterránea es una de ellas, esta es ocasionada por la disposición de residuos en ríos, quebradas, arroyos y cualquier otro tipo de cuerpo de agua superficial. Además, el líquido que expulsan los desechos como consecuencia de su descomposición, conocido como lixiviado, se infiltra en el suelo y puede llegar a las fuentes de agua subsuperficiales o subterráneas. En este sentido, el suelo es contaminado por la descarga constante de sustancias tóxicas provenientes de los residuos, esto puede generar cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo. (Jaramillo, 2003, como se citó en Galvis, 2016, p.109). El mal manejo de residuos sólidos también trae consigo contaminación del aire

debido a que muchos residuos depositados en las calles y vertederos son quemados a cielo abierto. Tanto las quemas como los propios gases que botan los residuos durante su descomposición producen malos olores, gases de efecto invernadero y potencializan las infecciones y enfermedades de carácter respiratorio. Además, la quema de residuos sólidos a cielo abierto emite grandes cantidades de microplásticos a la atmósfera, que son altamente nocivos para la salud humana. La proliferación de animales portadores de enfermedades a la población, conocidos como vectores, también es una consecuencia de la mala gestión de residuos, pues estos desechos se convierten en alimento, refugio y ambiente favorable para este tipo de animales portadores de microorganismos que transmiten enfermedades. (Jaramillo, 2003, como se citó en Galvis, 2016, p.109).

Los residuos sólidos se dividen en dos grandes grupos, los residuos sólidos ordinarios y los de gestión diferenciada. El primer grupo son los relacionados a cada habitante del país, hacen referencia a aquellos residuos de origen principalmente domiciliario, es decir todo lo que generamos en nuestros hogares o actividades diarias (papel, cartón, material de barrido, plásticos, restos de alimentos, cascarás de frutas y verduras, etc.). El segundo grupo son aquellos residuos que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, entre otras representan un peligro para la salud humana y el medio ambiente si se llegan a disponer de manera incorrecta, por lo que se deben entregar a una empresa gestora que se encarguen de la correcta disposición y almacenamiento de estos. Dependiendo del tipo de residuo va a depender su proceso de gestión (Departamento Nacional de Planeación,2022). En el país, el Gobierno de Colombia (2016) menciona:

“Los residuos sólidos en Colombia han sido gestionados por el servicio público de aseo bajo un modelo lineal. Este se define como un modelo en el cual la materia prima se extrae,

---

se utiliza para fabricar bienes y finalmente se dispone, bajo este modelo se ha creado el desperdicio actual en el uso de los recursos aumentando de esta manera la cantidad de residuos que van a parar en rellenos sanitarios del país. El llamado es a avanzar hacia una economía circular, la cual tiene como objetivo lograr que el valor de los productos y materiales se mantenga durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo”. (p.21-23).

La gestión de residuos también depende de su generador y considera los diversos materiales que los componen. En ese orden de ideas, es importante tener en cuenta que según el tipo de residuo se producen impactos diferentes al medio ambiente y la salud. Por tal motivo la gestión va de la mano con el tipo de residuo que se genere, cada sector en la sociedad tiene un tipo de residuo que genera en mayor proporción dependiendo de su actividad. Por ejemplo, los hogares, cafeterías, restaurantes y plazas de mercado generan una gran cantidad de residuos orgánicos, por lo cual si se hace una inadecuada disposición de residuos orgánicos los impactos negativos se atribuyen a la abundancia de este tipo de residuos dentro de la actividad productiva, por ende, la gestión de residuos en un sector de alimentos va a estar enfocada en los residuos orgánicos principalmente. (Gobierno de Colombia, 2016).

### **3.2 Residuos sólidos orgánicos y su aprovechamiento**

Los residuos sólidos orgánicos son aquellos materiales que se caracterizan por descomponerse con facilidad, por lo que pueden generar una gran cantidad de lixiviado, adicionalmente al descomponerse pueden transformarse en otro tipo de materia orgánica. Proviene de los hogares, industrias, agricultura, entre otros. Son comúnmente clasificados en:

restos de comida, excretas de animales y restos de poda o jardín. (Sánchez y Rojas, s.f). El manejo de estos residuos representa un desafío para las entidades encargadas de la gestión integral de residuos sólidos, puesto que su inadecuada disposición representa una gran cantidad de lixiviado y emisión de gases. Sin embargo, en el marco de la transición hacia la economía circular, este tipo de residuos pueden ser sometidos a técnicas de tratamiento y comúnmente pueden ser utilizados como abono acondicionador de suelos en la agricultura y otras actividades económicas (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental [AIDIS], 2018; Gobierno de Colombia, 2016).

### **3.3 El Compostaje y sus fases**

Una de las técnicas de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos es el compostaje. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, más conocida como La FAO se ha comprometido con el proceso de compostaje a nivel mundial generando cartillas y manuales sobre puntos clave el proceso. Según Román et al. (2013). De acuerdo con La FAO:

“El compostaje es la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas (presencia de oxígeno), que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes. Todo esto bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, así se asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un material homogéneo y asimilable por las plantas (p.22)”

Todo este proceso se da gracias a que microorganismos se encargan de digerir o degradar la materia orgánica, aprovechan el carbono y el nitrógeno presente para producir su propia biomasa. En el proceso también generan calor y un sustrato sólido resultante que se conoce como

---

compost, el cual es un material estable y mineralizado, con menos contenido de nitrógeno y oxígeno que al inicio del proceso. A través del compostaje se da una reducción de un 60% de la materia orgánica que ingresa al proceso y el incremento de la vida útil de los rellenos sanitarios al disminuir la cantidad de residuos sólidos orgánicos (AIDIS, 2018).

El compostaje es la posibilidad de transformar de manera segura y eficiente los residuos sólidos orgánicos en un material esencial para el suelo que sigue conteniendo materia orgánica. La aplicación de materia orgánica en los suelos debe ser una práctica recurrente pues provee beneficios como la mejora de las propiedades físicas del mismo al ayudar a regular su temperatura y humedad reduciendo así los riesgos por erosión, facilita el manejo del suelo para labores de siembra. También da lugar a mejoras en propiedades químicas del suelo, como el aporte de macronutrientes y la mejora de la capacidad de intercambio de cationes. Finalmente, la materia orgánica en el suelo mejora la actividad de bacterias y hongos, potencializando su capacidad de transformar materiales insolubles del suelo en nutrientes para las plantas. (Román et al., 2013).

Es importante tener presente que no todos los materiales que son transformados aeróbicamente son considerados compost. Para que pueda obtenerse un compost de calidad es importante que se cumplan ciertas etapas que vienen incluidas dentro del proceso de compostaje. La aplicación al suelo de un material que no ha finalizado correctamente el proceso puede traer consigo diversas consecuencias. Un material que no ha terminado el proceso de compostaje correctamente contiene compuestos químicos inestables que al aplicarlos al suelo resultan tóxicos para semillas y plantas, además de que estos compuestos dan lugar a malos olores. Otra consecuencia de esta aplicación es que los microorganismos ya presentes en el suelo utilizarán el oxígeno presente para continuar con el proceso de descomposición que no se ha podido culminar

en el material, agotándolo e imposibilitando que este se encuentre disponible para las plantas. (Román et al., 2013).

Con el objetivo de evitar lo mencionado anteriormente es importante que se cumplan todas las fases del compostaje y, que debido a que se trata de un proceso de biológico llevado a cabo por microorganismos se deben tener en cuenta los parámetros que afectan el crecimiento y reproducción de éstos. La primera etapa del proceso de compostaje es la descomposición mesófila, que puede tener una duración de entre dos a ocho días, el proceso inicia con todo el material de partida a temperatura ambiente, los microorganismos llamados mesófilos inician la actividad microbiana y con eso la temperatura aumenta hasta los 45°C. Los microorganismos descomponen compuestos como azúcares y aminoácidos que da como resultados ácidos orgánicos que hacen bajar el pH durante esta fase. La segunda etapa es la descomposición termófila, esta se caracteriza por un aumento de temperatura hasta los 65°C aproximadamente. Durante esta fase los microorganismos mesófilos son reemplazados por los termófilos. Los termófilos son los responsables de varios cambios en el sistema más allá de la subida de temperatura, éstos descomponen fuentes de carbono más complejas, transforman el nitrógeno en amoníaco dando lugar a aumentos en el pH, se produce higienización, ya que el calor generado destruye contaminantes y bacterias malignas como también semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida. Esta etapa puede durar desde días hasta meses, proceso que depende de las condiciones climáticas, el material inicial, y otros factores. (Román et al., 2013; Sepúlveda L. & Alvarado, 2013).

Seguida de la fase termófila viene la etapa de enfriamiento, que puede tomarse varias semanas durante las cuales la temperatura empieza a descender pasando de los 65°C a los 40°C

aproximadamente, y en las que las fuentes de nitrógeno se encuentran agotadas más que las de carbono. Durante esta etapa continua la descomposición de lo que resta de las fuentes de carbono complejas a manos de hongos termófilos y cuando la temperatura es menor a 40°C reaparecen los organismos mesófilos, que inician su actividad y causan que el pH del residuo descienda. El proceso finaliza con la etapa de maduración que ocurre a temperatura ambiente. Tiene una duración de meses y durante el proceso se producen reacciones de compuestos carbonados para formar los ácidos húmicos y fúlvicos que dan cuenta de un material más estabilizado y que ha sufrido un proceso de mineralización. La cantidad de meses que dura la fase está condicionada por el tipo de material de partida que se haya tratado y la destinación final del producto. (Román et al., 2013; Sepúlveda L. & Alvarado, 2013; Barrena, 2006).

### **3.4 Parámetros fisicoquímicos**

Como se mencionó anteriormente los microorganismos se encargan durante todo el proceso y para que este se dé en buenas condiciones existen unos parámetros de control. Estos parámetros son: pH, humedad, oxígeno, temperatura y relación carbono – nitrógeno (Relación C: N). Sin embargo, un proceso de compostaje exitoso también depende del material de partida, condiciones ambientales y método empleado, por lo que en algunos casos se añaden o disminuyen parámetros. Estos parámetros deben estar en monitoreo constante para saber si hay condiciones óptimas para que el proceso se dé de manera adecuada (Román et al, 2013).

Los microorganismos que protagonizan el proceso de compostaje utilizan el agua como medio de transporte de nutrientes y energía a través de sus membranas celulares, es por eso que la humedad es un parámetro relevante dentro del sistema. El rango óptimo de humedad durante el

---

proceso está entre el 45% y el 60%. Valores muy altos o bajos detienen el proceso de descomposición ya que los microorganismos contarán con mucha agua generando saturación o poca agua ocasionando que no se dé el transporte de nutrientes. Si se detiene el proceso de descomposición el resultado es un compost inestable. (Román et al, 2013).

La presencia de oxígeno durante el proceso evita que el material se vuelva una masa o se encharque. El nivel óptimo de saturación de oxígeno debe ser del 10%, aunque se debe tener presente que durante la fase termófila se dará el mayor consumo de oxígeno en el proceso. Cuando no hay mucho oxígeno aumenta la cantidad de agua, lo que produce malos olores y acidez en exceso lo cual no resulta provechoso para que los microorganismos realicen la descomposición, mientras que cuando hay mucho oxígeno en el sistema se pierde mucha agua por evaporación lo que hace que se detenga la degradación que están realizando los microorganismos, ya que se deshidratan. (Román et al, 2013). La temperatura y el pH varían a lo largo del proceso, por lo que es esencial el monitoreo de que los incrementos y disminuciones de los valores ocurran durante las fases adecuadas y que estos cambios alcancen los valores mencionados en dichas etapas. La variación de estos parámetros durante los tiempos estipulados son un indicio de que las fases se están completando de manera correcta. Es importante mencionar que los valores de pH del compostaje van a estar influenciados por la materia prima del proceso, sin embargo, este se debe mantener oscilando de 4.5 a 8.5. (Román et al, 2013).

El último parámetro de control es la relación carbono – nitrógeno (C: N), esta relación depende de la combinación de los ingredientes iniciales en el proceso de compostaje. Los microorganismos necesitan carbono debido a que esta es su fuente de energía para realizar la actividad microbiana, así como necesitan nitrógeno para poder crecer y reproducirse. El valor

optimo de carbono – nitrógeno al inicio de proceso debe ser de 25 o 30:1 aproximadamente. Esto quiere decir que por cada 30 partes de carbono debe haber 1 parte de nitrógeno en el proceso, con esta proporción los microorganismos tienen un equilibrio en el sistema y trabajan de manera eficiente. Al finalizar el proceso de compostaje lo ideal es que el material resultante tenga una relación carbono – nitrógeno de 15:1. Es importante tratar de hacer una buena mezcla del material de partida para que el proceso inicie con una buena relación de carbono – nitrógeno, ya que si en el proceso de compostaje hay mucho carbono la descomposición de la materia orgánica será lenta debido a que a los microorganismos les faltará nitrógeno para reproducirse; mientras que si hay mucho nitrógeno incrementan los malos olores, puesto que al haber más nitrógeno la descomposición es demasiado rápida y se libera amoníaco. Se conocen como materiales verdes aquellos con gran presencia de nitrógeno, suelen ser húmedos como por ejemplo los alimentos, estiércol y plantas recién podadas o frescas, mientras que el material marrón es más seco y son la hojarasca, papel, aserrín y ramas, estos poseen un alto contenido de carbono. (Sepúlveda & Alvarado, 2013).

### **3.5 Pacas biodigestoras**

Existen diversos sistemas de compostaje que pueden ser aplicados para el tratamiento de residuos orgánicos, sin embargo, según Silva (2012):

“El sistema de pacas biodigestoras se ajusta de manera excelente al compostaje a nivel comunitario, el cual suele predominar en instituciones educativas. La paca biodigestora es un recurso tecnológico y ecológico apropiado que descompone toda clase de excedentes biodegradables como los de cocina: crudos, cocidos, cárnicos y grasos, también los

---

estiércoles de toda clase de animales. Estos residuos se manejan debidamente confinados entre excedentes de jardín y de poda de árboles: verdes, secos o leñosos. Se prensan húmedos con el objetivo de lograr el aislamiento del aire pudridor, las moscas y demás vectores de enfermedades (p.2)”

La construcción de pacas biodigestoras se realiza por capas, empezando por una capa de material marrón como poda y hojarasca en la base, se continua con los restos de alimentos y material rico en nitrógeno y se repite el proceso hasta llenar el molde. A medida que se avanza en el proceso se debe ir compactando el material y siempre la última capa debe ser de material marrón, debido a que este protegerá los restos de alimentos de una fuerte exposición al oxígeno que puede provocar pudrición. (López, 2024).

La descomposición en las pacas biodigestoras se da en condiciones anaerobias no estrictas, es decir que la presencia de oxígeno es baja y no favorece el crecimiento de microorganismo aeróbicos, sin embargo, prevalecen los microorganismos anaerobios facultativos que pueden crecer, reproducirse y realizar la descomposición a pesar de la poca cantidad de oxígeno presente en el sistema. Un parámetro de control dentro del proceso de fermentación de las pacas biodigestoras es la altura de estas, debido a que este se considera un indicador de su proceso de compostaje. Existe una relación inversa entre la altura de la paca y el proceso de descomposición, cuanto más ha avanzado el proceso más disminuye la altura de la paca. Se dice que el tiempo mínimo para que la paca biodigestora ya haya culminado el proceso y tenga como material resultante compost maduro es de 6 meses, la paca debería tener una altura de 50 cm a este punto del proceso. (López, 2024).

### **3.6 Estabilidad, madurez y calidad del compost**

Al finalizar el proceso de compostaje se busca que el producto resultante pueda ser aprovechado y utilizado en primera instancia para ser aplicado a suelos. Sin embargo, si el compost se encuentra inmaduro y sin estabilizar puede provocar problemas en su almacenaje, distribución y uso, pues puede generar malos olores, desarrollo de componentes fitotóxicos y efectos negativos en el crecimiento de las plantas. En este punto es importante saber que la madurez y la estabilidad son propiedades diferentes, la estabilidad es más fácil de medir y se refiere al grado de descomposición de los materiales de partida en el compost, describe las condiciones en las que se encuentra el material y se puede medir a través de métodos físicos como el olor, color, densidad óptica de los extractos, métodos químicos como el contenido de materia orgánica, relación carbono – nitrógeno, porcentaje de cenizas, pH, entre otros. (Barrena, 2006).

Un compost maduro debe ser apto para el crecimiento de plantas y normalmente se asocia al grado de humificación de material. Sin embargo, para esta propiedad aún no se ha encontrado un método aceptado ampliamente y fiable que cuantifique la madurez para todos los tipos de compost. Lo anterior debido a que el compost requiere de una valoración para saber si ese producto puede ser utilizado en la actividad que se requiera, por lo que esta madurez va a depender de las exigencias de cada actividad. Aun así, para poder darle uso a cualquier tipo de compost se debe garantizar que este sea un producto estable y que no represente toxicidad para el suelo y las plantas. (Barrena, 2006).

La calidad del compost esta influenciada por el tipo de material que se composta, el desarrollo del proceso de compostaje, la procedencia del material, el tipo de colecta del residuo

orgánico, los procesos de selección secundaria y el método de compostaje utilizado. Los materiales que están dentro del proceso de compostaje determinarán el tipo de abono orgánico que se obtendrá, La calidad no solo se debe medir al final de proceso, sino que es importante para garantizar un buen compost que se monitoreen los parámetros fisicoquímicos relevantes del sistema durante el proceso de compostaje y también que se realicen controles en las materias primas. Al igual que la madurez la calidad del compost también está influenciada por el uso final que se le vaya a dar al producto, por eso es importante conocer el propósito y así definir qué tipo de características son más relevantes en el monitoreo. (Barrena, 2006). Para el caso particular de estudio, la valoración de si el producto del compostaje obtenido a partir de la paca biodigestora proporciona abono de calidad se parte de la norma en Colombia conocida como la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 del 2011, que establece los requisitos que debe cumplir el compost para poder tener un uso agrícola. Los parámetros que tienen en cuenta la norma son: Humedad, cenizas, carbono orgánico oxidable, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad, retención de humedad (CRA), metales pesados, nitrógeno total, silicio total, potasio y fósforo totales. (López, 2024).

---

## 4. Metodología

### 4.1 Participación en la elaboración de pacas biodigestoras

El escenario de prácticas es la Universidad de San Buenaventura (USB) seccional Medellín, en su sede de Bello, Antioquia. Durante los seis meses de prácticas en la Unidad de Gestión Ambiental de la Institución se participó en la elaboración de las pacas biodigestoras cada semana o semana y media en conjunto con la persona encargada del centro de acopio de residuos sólidos del campus.

La colecta del material orgánico proveniente de los restaurantes y cafeterías del campus universitario se lleva a cabo diariamente por el empleado encargado del centro de acopio de residuos de la Universidad (Josefina Café, Restaurante Abadía, Café SanBuena y Cafetería, La Frutera). Cada día se recogen aproximadamente 31 kilogramos de residuos orgánicos.

La elaboración de pacas biodigestoras se llevó a cabo en una zona abierta detrás de las instalaciones de la Universidad. La zona cuenta con suelo de poca inclinación, se encuentra al aire libre, descubierta y cerca de allí se guardan los contenedores tapados con todo el residuo orgánico recolectado. Además, todo el material de poda y de hojarasca producido en el campus es depositado también en esta zona. Los moldes para la construcción de las pacas son de 90 cm de ancho y 20 cm de alto. Estos moldes son armables, por lo que se puede modificar el alto de la paca según la cantidad de residuos sólidos que se quieran procesar. Se puede ensamblar máximo 3 moldes por paca, lo que da lugar a pacas de 90 cm de ancho y 80 cm.

El primer paso para la elaboración de las pacas es crear una base de ramas y palos de madera, tapar estos materiales con hojarasca y poda a veces fresca; en otras ocasiones seca

dependiendo de la disponibilidad de material marrón en la zona. Una vez lista esta primera capa se proceden a abrir las bolsas de residuos orgánicos de los contenedores y depositar todo el material en la paca. Se depositan regularmente de 3 a 4 bolsas de residuos orgánicos de los contenedores, aclarando que no hay un control respecto a esto. Se intenta que el material orgánico quede en el centro de la paca, con el objetivo de evitar que éste se esparza hasta las paredes del molde, para así construir una especie de nido alrededor del material orgánico que proteja los residuos; se tapa esta primera capa de desechos orgánicos con más material marrón, y se compacta pisando el material dentro de la paca y posteriormente utilizando compactadoras manuales. A continuación, se muestra una imagen del proceso de compactación en la elaboración de las pacas biodigestoras en la USB:



**Figura 1.**  
*Proceso de compactación de pacas biodigestoras.*

Se repite el proceso de manera sucesiva hasta llenar el molde y teniendo en cuenta que la última capa de la paca sea siempre una abundante cantidad de poda y hojarasca. Normalmente se realizan de dos a cuatro pacas por encuentro, lo cual está limitado por la cantidad de moldes.

#### **4.2 Entrevista a expertos en el campo**

Se realizó un encuentro académico con la Ingeniera ambiental de la Universidad de Antioquia Laura Linares, que cuenta con experiencia en la gestión integral de residuos sólidos y quien ha trabajado en el Programa Giro Sostenible 2.0 para la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos en la Universidad de Antioquia. Durante la entrevista se resolvieron dudas sobre el proceso de descomposición de las pacas biodigestoras, se trató de manera más detallada sobre lo que es el compostaje y cómo funciona de manera interna el proceso y se conocieron opiniones de la experta sobre: la procedencia y tipo de materiales adicionados a las pacas, inhibición en el proceso de descomposición, caracterización del abono, parámetros de control más indicativos, influencia del tamaño de partícula, consecuencias por la presencia de plásticos y otros residuos no aprovechables en el material de partida.

Durante el encuentro la experta realizó recomendaciones sobre el estudio artículos científicos e información bibliográfica para fortalecer el conocimiento sobre la temática relacionada con pacas biodigestoras. Todos los temas tratados están relacionados con lo observado durante la elaboración de las pacas biodigestoras en el campus universitario de la Universidad de San Buenaventura.

### 4.3 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se realizó con la finalidad de ampliar el conocimiento en el tema del sistema de compostaje a través de pacas biodigestoras, aprovechamiento de residuos orgánicos y conocer qué factores puede interferir en la madurez, estabilidad y calidad del abono. Además de buscar información sobre el debido proceso o las mejores prácticas a la hora de aplicar esta tecnología. A continuación, se especifican las palabras clave, las delimitaciones, los comandos de búsqueda y bases de datos implementadas durante la búsqueda de material bibliográfico:

**Tabla 1.**

*Parámetros implementados durante la búsqueda de material bibliográfico.*

<b>Palabras clave:</b> Paca biodigestora, residuos orgánicos, gestión de residuos, limoneno, mejores prácticas, compostaje, manuales, compost, abono orgánico, calidad, estrategias, degradación, waste, cal, inóculos, lombricomposta, biodigester bale, indicadores, separación, recogida, tratamiento.
<b>Bases de datos:</b> Google Scholar, Scopus, Dialnet, Scielo, Nature, Base de datos UDEA, Science Direct.
<b>Comandos de búsqueda:</b> OR, AND
<b>Delimitaciones:</b> Artículos científicos, tesis y trabajos de grados, manuales, documentos gubernamentales, libros.

Una vez se realiza la búsqueda bibliográfica se seleccionaron, leyeron y analizaron documentos de interés y que cumplieran con lo requerido para brindar información sobre las pacas biodigestoras y lo observado durante su elaboración, algunos de los documentos se muestran en el siguiente portafolio bibliográfico:

**Tabla 2.**

*Portafolio bibliográfico.*

Título	Autor	Año de publicación	Lugar de publicación	Tipo de documento
Manejo limpio y sano	Guillermo Silva Pérez	2012	Academia.edu	Artículo

<b>de residuos biodegradables en pacas digestoras silva</b>				
<b>Análisis de la influencia del tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de degradación biológica mediante pacas digestoras</b>	Laura Juliana López	2024	Repositorio institucional Universidad de Antioquia	Trabajo de grado
<b>Compostaje de residuos sólidos orgánicos: Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso</b>	Raquel Barrena Gómez	2006	Tesis doctorals en Xarxa	Tesis
<b>Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos a través de Sistemas de Compostaje y Lombricultura en el Valle de Aburrá</b>	Luis Aníbal Sepúlveda Villada Jhon Alexander Alvarado Torres	2013	Área metropolitana	Manual
<b>Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia</b>	Laura Catalina Ossa.	2016	Repositorio Institucional Universidad de Antioquia	Trabajo de grado
<b>Dinámica de descomposición de residuos orgánicos a través del método Paca Biodigestora</b>	Laura Catalina Ossa.	2022	Repositorio Institucional Universidad de Antioquia	Tesis de maestría

<b>Optimización de las variables implicadas en el proceso de compostaje de RSU</b>	Margarita Delgado Rodríguez	2012	Repositorio Universidad Internacional de Andalucía	Libro
<b>Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste</b>	Begoña Ruiz Xavier Flotats	2016	Biochemical Engineering Journal	Artículo científico
<b>Evaluación de la estabilidad del compost de residuos agrícolas producido por el centro de biosistemas de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano</b>	Juanita Rubio Robledo	2023	Repositorio Institucional Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano	Tesis de grado
<b>Best practice for bio-waste collection as a prerequisite for high-quality compost.</b>	Henning Friege Yasmin Eger	2021	Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy.	Artículo científico
<b>Best Practices and Challenges to Composting in a Restaurant Setting</b>	Christopher Jon Audette	2018	Repositorio Universidad de Augsburg	Tesis de posgrado
<b>A systematic review of the occurrence of microplastics in compost: Understanding the abundance, sources, characteristics and ecological risk</b>	Nasim Nourozi, Tooraj Massahi, Monireh Nouri, Maryam Mardani, Hooshyar Hossini	2024	Results in Engineering	Artículo científico

<b>Norma Técnica Colombiana 5167</b>	Icontec internacional	2011	Icontec	Norma
<b>Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) del Municipio de Versalles, Valle del Cauca</b>	Gustavo Castro García, Martha Constanza Daza Torres Luís Fernando Marmolejo Rebellón	2016	Gestión y Ambiente Universidad Nacional de Colombia	Artículo científico
<b>Detection and specific chemical identification of submillimeter plastic fragments in complex matrices such as compost</b>	Steiner et al.	2024	Scientific reports	Artículo científico

#### 4.4 Análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos.

Se realizaron análisis en laboratorio del abono resultante de una paca biodigestora elaborada en el mes de marzo del año 2024. La recolección de las muestras se hizo el día 20 de noviembre del 2024. El abono orgánico recolectado cumplía 8 meses en el proceso de compostaje a la hora de la toma de muestras. Se tomaron 3 muestras, cada una se almaceno en bolsas herméticas (ziploc).

Las muestras fueron llevadas al laboratorio de análisis fisicoquímicos de la Universidad de San Buenaventura.



**Figura 2.**

*Muestras de compost resultante.*

Los parámetros que se analizaron en el laboratorio fueron: pH, humedad y contenido de cenizas. Estos parámetros se encuentran dentro de la norma NTC 5167 de 2011 para términos de calidad del abono, no fue posible analizar todos los parámetros que conforman la norma debido a la gran demanda de equipos para las mediciones.

#### ***4.4.1 Medición de pH.***

Este proceso se realizó a través de un pHmetro, un equipo capaz de medir el pH. Para ello se introdujo el electrodo del dispositivo directamente en una de las muestras de abono tratando de llegar a aquellas partes en donde el material se encontraba más húmedo, se esperaron unos segundos y se registró el valor de pH arrojado.

#### ***4.4.2 Contenido de humedad.***

Se integraron todas las muestras para la medición del contenido de humedad del abono orgánico. Se utilizó el método gravimétrico para obtener los valores de humedad del material resultante, se tomaron 6 muestras de 5 gramos cada una, por lo cual se enumeraron los recipientes de porcelana del 1 al 6, se pesó cada recipiente vacío en la balanza analítica y se registraron los respectivos pesos. Posteriormente se subió cada recipiente a la balanza para que ésta fuera tarada y se le adicionó a cada recipiente en su debido momento una pequeña cantidad del abono orgánico hasta que la balanza registró los 5 gramos aproximadamente. Los valores de abono orgánico adicionado a cada recipiente también fueron registrados.

Una vez están todos los recipientes listos con los 5 gramos de material, con ayuda de pinzas las 6 cápsulas fueron ingresadas a la estufa de secado y se dejaron en el laboratorio aproximadamente 24 horas a 105°C.



**Figura 3.**

*Procedimiento en laboratorio para el hallazgo de contenido de humedad*

*Nota.* En la **figura a** contiene la muestra inicial para iniciar con el pesaje, en la **figura b** se ejemplifica el proceso de pesaje de los 5 gramos de abono orgánico por recipiente, **la figura c** muestra las cápsulas de porcelana dentro del equipo de secado.

Pasadas las 24 horas se registraron los pesos de las 6 capsulas de porcelana con el abono seco. Estos pesos se registran para así realizar los cálculos correspondientes al método gravimétrico y obtener el contenido de humedad de cada una de las 6 muestras. Finalmente, con estos seis valores se realiza un promedio de humedad del abono orgánico. La fórmula para hallar el contenido de humedad es la siguiente:

### ***Ecuación 1***

*Fórmula para porcentaje de humedad.*

$$\%Humedad = \left( \frac{(P1 - P2)}{P} \right) X 100$$

P1 = Peso de la capsula + muestra

P2 = Pesos de la capsula + muestra seca

P = Peso de la muestra

#### ***4.4.3 Contenido de cenizas.***

Para hallar el porcentaje de cenizas del abono orgánico en el laboratorio se llevaron 3 de las muestras resultantes del secado (muestra 2, 4 y 6 respectivamente) a la mufla a 550°C durante 3 horas. Transcurrido este tiempo se pesaron las cápsulas de porcelana y se registraron los pesos para así realizar los cálculos correspondientes. A continuación, se muestra la fórmula utilizada para hallar los valores de porcentaje de cenizas de las muestras, estos valores fueron promediados para obtener un porcentaje de cenizas final.

***Ecuación 2***

*Fórmula para porcentaje de cenizas.*

$$\%Cenizas = \left( \frac{(C1 - C2)}{C} \right) \times 100$$

*C1 = Peso de la capsula + cenizas*

*C2 = Peso de la capsula sola*

*C = Peso de la muestra seca*

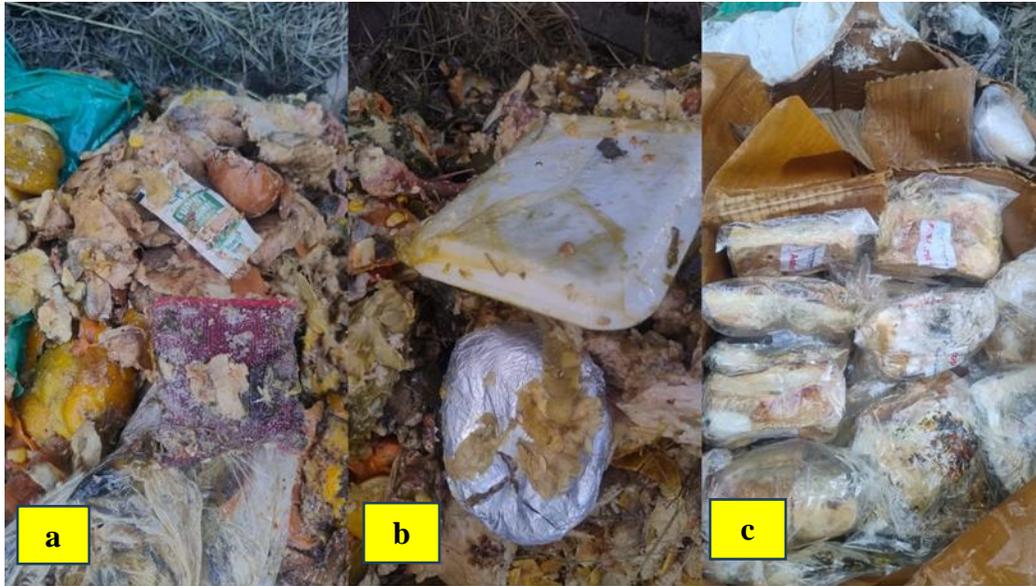
## 5. Resultados y análisis

Durante el proceso de elaboración de las pacas biodigestoras se evidenciaron algunos hallazgos, iniciando con lo encontrado recurrentemente dentro de las bolsas que contienen los residuos orgánicos. Durante la elaboración de las pacas era común encontrar residuos plásticos y no aprovechables, como bolsas plásticas, cubiertos, empaques de alimentos, alimentos dentro de su respectiva envoltura, materiales hechos de icopor, aluminio, residuos de fármacos e incluso productos de aseo como esponjas para lavar platos. Algunos de los hallazgos evidenciados se pueden observar a continuación.



**Figura 4**  
*Hallazgos durante la elaboración de pacas biodigestoras 1.*

*Nota.* En la **figura a** se observan residuos plásticos y una envoltura de fármaco, dentro de los residuos orgánicos de la **figura b** se evidencian cubiertos, bolsas y sachets de salsa, en la **figura c** se encuentran bolsas plásticas ziploc.



**Figura 5**

*Hallazgos durante la elaboración de pacas biodigestoras 2.*

*Nota.* En la **figura a** se observan sachets de salsas, bolsas plásticas y esponja de lavar platos, en los residuos de la **figura b** hay un recipiente de icopor, papel chicle y un alimento envuelto en papel aluminio y en la **figura c** se observan sándwiches empaquetados en bolsas plásticas.

Los hallazgos en los residuos orgánicos utilizados en la elaboración de las pacas biodigestoras evidencian una separación incorrecta en la fuente, afectando tanto la calidad del compost como la duración de las fases del proceso. La presencia de plásticos, difíciles de degradar, genera microplásticos (MP) que interfieren en el compostaje y contaminan el producto final. Según Nourazi et al. (2024), el compost de residuos domésticos y de restaurantes contiene altos niveles de MP. Al generar compost en base a material de partida con MP se pueden alterar propiedades fisicoquímicas el suelo, los procesos de nutrientes, la retención de agua y el comportamiento

microbiano por la ingesta de MP debido a la proliferación de patógenos y sustancias tóxicas provenientes del plástico fragmentado.

La mayoría de los plásticos hallados corresponden a polietileno (PE) y poliestireno (PS), que se fragmentan en el suelo en forma de películas plásticas o fragmentos, y que según Nourazi et al. (2024) interfieren en el movimiento y evaporación del agua en el suelo, afectado así el crecimiento de las plantas. La presencia de plásticos en el abono puede facilitar la entrada de MP en la cadena alimentaria, con riesgos para la salud humana y ambiental.

Además, la presencia de plásticos podría impedir la comercialización del abono por parte del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), autoridad reguladora en Colombia.

Durante la elaboración de las pacas biodigestoras se evidencia una alta presencia de cáscaras de frutos cítricos, llegando en ocasiones a constituir la mayor parte del material orgánico. Lo anterior puede provocar que el pH dentro de la paca sea demasiado ácido. Un pH bajo dificulta la actividad microbiana durante las diferentes fases del proceso.

Además, estudios confirman que las cáscaras de cítricos contienen limoneno, un compuesto que, en grandes cantidades, puede inhibir el proceso de compostaje y ralentizar la biodegradación, esto se logra porque el limoneno ataca a los microorganismos volviendo más permeable su membrana y provocando así la fuga de su contenido celular, la comunidad microbiana es sometida a un mal funcionamiento cuando se encuentra muy expuesta a este compuesto. (Ruiz y Flotats, 2016).

De igual forma, era común que las pacas incluyeran residuos cárnicos o alimentos cocidos. Los residuos cárnicos tienen enzimas que generan olores fuertes y putrefactos, atrayendo animales

carroñeros como gallinazos y roedores, los cuales escarbaban y dañaban la composta. Para mitigar este problema, se empezó a añadir más material marrón, como poda, hojarasca y ramas al proceso.



**Figura 6.**  
*Pacas biodigestoras desechas por actividad de carroña.*

El material resultante de algunas pacas biodigestoras, incluso después de más de siete meses de proceso, no cumplió con condiciones como olor neutro o terroso, y presentaba numerosos residuos orgánicos sin descomponer, lo que evidencia un compost inestable pese al tiempo transcurrido que aún no se encuentra listo para su uso. Estos inconvenientes suceden por la ausencia de monitoreo de los parámetros durante las distintas fases del compostaje lo que dificulta determinar el momento óptimo para el uso del abono orgánico. Esta ausencia de seguimiento impide evaluar parámetros fisicoquímicos de control, como la humedad, el pH, la altura de la paca,

la temperatura y la relación carbono - nitrógeno, los cuales a su vez funcionan como un indicador de la evolución del proceso de degradación. (Román et al., 2013).

Asimismo, la falta de monitoreo durante la fase de maduración genera incertidumbre sobre la calidad del compost final, lo que limita su uso potencial y dificulta la implementación de mejoras en el futuro. (Barrena, 2006).

### 5.1 Resultados de análisis en laboratorio.

A continuación, se muestran los valores obtenidos para los parámetros analizados en laboratorio, también se muestran los valores óptimos permisibles para los parámetros según la NTC 5167 de 2011, que evalúa así la calidad de los abonos orgánicos.

**Tabla 3.**

*Resultados análisis en laboratorio.*

<b>Resultados de análisis físicoquímico en laboratorio</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Humedad</b>	54,4385	%
<b>Cenizas</b>	67, 3574	%
<b>pH</b>	7,5	pH

**Tabla 4.**

*Valores permisibles para abonos o fertilizantes orgánicos sólidos NTC 5167- 2011.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor para garantizar</b>	<b>Unidad</b>
<b>Humedad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiales de origen máximo animal 20%</li> <li>• Materiales de origen máximo vegetal 30%</li> </ul>	%
<b>Cenizas</b>	Máximo 60%	%
<b>pH</b>	Mayor de 4 y menor de 9	pH

*Fuente.* (Norma técnica colombiana NTC 5167, 2011).

En el laboratorio, el valor de pH para el abono orgánico fue de 7,5 valor que se encuentra dentro del rango óptimo para la NTC 5167 de 2011, que es entre 4 y 9, por otro lado, el porcentaje de humedad registrado fue de 54,4385% valor que no cumple con lo establecido en la NTC. Este elevado valor de humedad puede ser un indicio de que en el medio hay un poco más del agua requerida para que los microorganismos realicen la debida disolución y transporte de nutrientes, si los niveles de humedad llegan a ser muy altos podría generar saturación en el sistema y lavado de nutrientes en el medio. (Román et al., 2013).

Adicionalmente, el alto contenido de humedad encontrado también está relacionado al tipo de material de partida, las pacas biodigestoras elaboradas están hechas de residuos de jardín y alimentos, los cuales presentan contenido de humedad que oscila entre 50% y 80%, lo cuales son valores muy altos e influyen en el porcentaje de humedad del compost resultante. (Tchbanoglous, 1994, como se citó en López, 2024). Por esta razón tiene sentido que el porcentaje de humedad sea alto en el abono resultante, ya que, el material de partida también condiciona la humedad en el compostaje.

En cuanto al porcentaje de cenizas, el valor arrojado en el análisis de laboratorio fue de 67,3574% superando el valor máximo recomendado por la NTC de 60%. Este parámetro tampoco cumple con lo estandarizado, las cenizas en el compost están relacionadas con los minerales y sales en el sustrato, este valor se incrementa a medida que avanza el proceso de compostaje gracias a la mineralización del material orgánico. (Ossa, 2016). Sin embargo, en este caso, el elevado porcentaje de cenizas podría estar asociado a un contenido significativo de residuos inorgánicos, como tierra o arenas, que no aportan materia orgánica utilizable al compost. Asimismo, es posible que el alto contenido de cenizas esté relacionado con la presencia de sales minerales derivados de

alimentos procesados y cocidos, que frecuentemente se incorporan a las pacas biodigestoras. El compost obtenido de biorresiduos contiene una elevada concentración de sales minerales, lo que influye en los porcentajes de ceniza del producto resultante. (Castro et al., 2016). Un alto porcentaje de cenizas es un indicativo de que el compost posee más de la materia inorgánica requerida lo que deja al producto con menos materia orgánica para ser aprovechada por el suelo, lo cual es propósito principal del uso de compost.

Teniendo en cuenta los valores óptimos de la NTC 5167 de 2011 la muestra de abono orgánico analizada no cumple con los requisitos de calidad, ya que, para que se dé cumplimiento los resultados de todos los parámetros que se deben medir debe estar dentro de los rangos de cumplimiento.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Estrategias de mejora para el proceso de compostaje con pacas biodigestoras.**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, es fundamental implementar mejoras en el sistema de pacas biodigestoras de la Universidad de San Buenaventura. Estas estrategias buscan optimizar el proceso desde su etapa inicial, garantizando la producción de un abono orgánico con parámetros fisicoquímicos más controlados y que al final se ajusten a los estándares normativos. Esto no solo impactará positivamente en la calidad y estabilidad del compost final, sino que también contribuirá a un manejo más eficiente y sostenible. A continuación, se definen las estrategias:

#### ***6.1.1 Capacitación al personal de los restaurantes sobre compostaje y el sistema de pacas biodigestoras de la USB***

La formación del personal de los restaurantes en conceptos básicos de compostaje y funcionamiento del sistema de pacas biodigestoras es esencial para mejorar el proceso. Estas capacitaciones constituyen el primer paso para vincular a la comunidad bonaventuriana con el proyecto, sensibilizándolos sobre la importancia de sus acciones, especialmente en la correcta separación de residuos orgánicos en la fuente. Al concienciar a este grupo clave en la separación de residuos, se puede reducir significativamente la llegada de materiales plásticos y no aprovechables al proceso de elaboración de las pacas biodigestoras.

### ***6.1.2 Instalación de contenedores exclusivos para residuos orgánicos en las cocinas de los restaurantes***

Tras las capacitaciones, es fundamental proporcionar herramientas que permitan aplicar lo aprendido. La instalación de contenedores diseñados exclusivamente para residuos orgánicos en las cocinas facilita la recolección selectiva, refuerza el compromiso del personal con el proyecto y disminuye el ingreso de residuos no orgánicos al material de partida para el compostaje. Para evitar confusiones, los contenedores deben ser claramente identificados de los destinados a otros tipos de desechos. Este enfoque fomenta un inicio más eficiente del proceso de compostaje y asegura la calidad del material de partida.

### ***6.1.3 Creación de una guía o manual del proceso de compostaje en la USB***

La elaboración de un manual sobre el compostaje en la Universidad de San Buenaventura es crucial para sistematizar y estandarizar el proceso. Este documento debe incluir información clave sobre las fases del compostaje, sus parámetros de control y su importancia ambiental. Además, debe detallar los pasos para la elaboración de pacas biodigestoras en el campus, especificando los materiales con los que se elaboran, y para evitar pacas elaboradas de un solo tipo de material orgánico, ya sea solo se alimentos o solo de cascaras de cítricos. La guía debe incluir explicaciones claras acerca de la importancia de mezclar distintos tipos de residuos orgánicos para que así haya variedad de material y se evite la inhibición de la degradación por limoneno y malos olores por abundancia de residuos cárnicos. La guía especificaría el paso a paso y cómo ajustar la

relación carbono – nitrógeno para que al inicio del proceso este se encuentre en 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno. Cuando se ajusta o se cumple con la relación carbono – nitrógeno los microorganismos presentes en el proceso cuentan con el combustible necesario para realizar la degradación de manera eficiente. Con el ajuste también se puede prevenir la llegada de animales carroñeros, que podrían dañar las pacas, la creación de este manual facilitará la continuidad y trazabilidad del proyecto a medida que nuevos practicantes se integren a la Unidad de Gestión Ambiental de la universidad.

#### ***6.1.4 Plan de monitoreo de parámetros de control durante el compostaje***

Este plan tiene como objetivo garantizar un seguimiento adecuado del proceso de compostaje. Una vez elaboradas las pacas biodigestoras, se propone medir parámetros de control como temperatura, humedad, pH, relación carbono – nitrógeno y altura de las pacas. Estas mediciones iniciales permitirán determinar las condiciones de partida del proceso y realizar ajustes necesarios en las pacas existentes o en las futuras. Además, se asegura que los valores iniciales sean óptimos para el desarrollo del compostaje.

Se deben programar mediciones de seguimiento o control de acuerdo con las fases del compostaje, lo que mejorará las condiciones a lo largo del proceso y evitará incertidumbre sobre la calidad del producto final. Es crucial llevar un control sistemático de estos parámetros para identificar y corregir deficiencias durante la elaboración de las pacas.

### ***6.1.5 Pretratamiento de los alimentos orgánicos***

Se propone implementar una fase de pretratamiento del material orgánico durante la elaboración de las pacas. Esto incluye la eliminación de residuos plásticos y no aprovechables de los residuos orgánicos recolectados, así como el triturado o picado parcial de los alimentos. Triturar o picar el material de partida reduce el tamaño de las partículas, lo que facilita la acción de los microorganismos al hacer los sustratos más asimilables y evita la presencia de residuos no degradados al final del proceso. Las pacas elaboradas con material triturado o picado generan mayor cantidad de abono orgánico en comparación con aquellas hechas con material entero, debido a la mejor degradación de los componentes. (López, 2024).

El abono orgánico obtenido de las pacas biodigestoras en la USB no cumple con los estándares de calidad establecidos por la NTC 5167 de 2011, presentando deficiencias en parámetros como el porcentaje de humedad y de cenizas. La falta de monitoreo de parámetros de control dificulta determinar a ciencia cierta la culminación de las fases del compostaje.

La implementación futura de estrategias de mejora propuestas permitirá fortalecer el proceso desde su inicio, garantizando el cumplimiento de las fases del compostaje y la obtención de un abono orgánico de alta calidad y estabilidad. Esto evitará riesgos asociados al uso de compost inestable e inmaduro, como malos olores, presencia de sustancias tóxicas y patógenos en suelo, problemas en el crecimiento de las plantas, cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, entre otros.

Un abono más estable y de mejor calidad en la USB ampliaría significativamente las oportunidades de aprovechamiento del material. Las estrategias de mejora fortalecerán el sistema de compostaje, permitiendo que el abono resultante pueda utilizarse en zonas verdes de la

universidad, proyectos de huertas, iniciativas comunitarias e, incluso, la creación de convenios con comunidades o negocios locales. A largo plazo, y con un sistema que cumpla con la normativa vigente, sería posible considerar la comercialización del producto, maximizando el impacto positivo del compostaje en la USB.

## Referencias

- Barrena, R. *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso*. [Memoria de tesis, Universidad Autónoma de Barcelona]. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma de Barcelona. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5307/rbg1de1.pdf>
- Castro, G; Daza, M y Marmolejo, L. (2016). Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) del Municipio de Versalles, Valle del Cauca. *Gestión y Ambiente*, 19 (1), 179 – 191. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/64555/53672-297646-1-PB.pdf?sequence=1>
- Delgado, M. (2012). *Optimización de las variables implicadas en el proceso de compostaje de RSU*. Universidad Internacional de Andalucía. <https://dspace.unia.es/handle/10334/6398>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Guía nacional para la adecuada separación de residuos sólidos 2022* [Guía de residuos sólidos]. Departamento nacional de planeación. [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Guia\\_Residuos%20Solidos\\_Digital.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Guia_Residuos%20Solidos_Digital.pdf)
- Friege, H y Eger, Y. (2022). Best practice for bio-waste collection as a prerequisite for high-quality compost. *Waste Management & Research*, 40 (1), 104 – 110. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X211033714>
- Galvis, J. A. (2019). *Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución*. *Gestión & Región*, 22 – 101 – 119. <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/gestionyregion/article/view/149>
- Gobierno de Colombia. (2016). *Política para el desarrollo integral de la primera infancia: Estrategia de cero a siempre* [Documento CONPES No. 3874]. Departamento Nacional de Planeación. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3874-de-2016/>
- Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. (2011). *Norma técnica colombiana NTC 5167*. Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. <https://www.cenicana.org/ntc-5167-2022-productos-para-la-industria-agricola-productos-organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo/>
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P. y Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development. DC World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- López, L. (2024). *Análisis de la influencia del tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de degradación biológica mediante pacas digestoras*. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/39749>
- Nasim, A; Tooraj A; Monireh A, Maryam, C y Hooshyar B. (2024). A systematic review of the occurrence of microplastics in compost: Understanding the abundance, sources,

- characteristics and ecological risk. *Results in Engineering*, 24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024018826?via%3Dihub>
- Ossa, L. (2022). *Dinámica de descomposición de residuos orgánicos a través del método Paca Biodigestora*. [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/28802>
- Ossa, L. (2016). *Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia*. [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/13416>
- Ossa-Carrasquilla, L., Correa-Ochoa, M. y Múnera-Porras, L. (2020). *La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica*. *Producción + Limpia*, 15 (2), 71-91. Publicación electrónica del 11 de agosto de 2021. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>
- Resolución No.090832 de 2021 [Instituto agropecuario colombiano]. Por medio de la cual se establecen los requisitos para la comercialización, distribución, almacenamiento de los insumos agropecuarios y semillas para siembra. Enero 26 de 2021. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/regulacion-y-control-de-medicamentos-veterinarios/resolucion-090832-del-26-de-enero-2021.aspx>
- Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. FAO. E-ISBN 978-92-5-307845-5
- Rubio, J. (s.f.). Evaluación de la estabilidad del compost de residuos agrícolas producido por el centro de biosistemas de la universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. [Trabajo de grado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio Institucional - Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/jspui/handle/20.500.12010/33846>
- Ruiz, B y Flotats, X. (2016). Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. *Biochemical Engineering Journal*, 109, 9 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.12.011>
- Sánchez, N. y Rojas J. (s.f.). *Manual composteras. Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost*. <https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3818/Manual%20Composteras.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sepúlveda, L y Alvarado, J. (2013). *Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Ed.1). ISBN: 978-958-8513-69-0.
- Silva, G. (2012). *Manejo limpio y sano de residuos biodegradables en Pacas Digestoras Silva: Una alternativa hacia Basura Cero en Medellín para proteger la salud pública, el ambiente y la agricultura ecológica*. Medellín - Colombia. [https://www.academia.edu/34067428/Paca\\_Digestora\\_Silva](https://www.academia.edu/34067428/Paca_Digestora_Silva)

- Sossa, E; Agbangba, C; Windékpè, T; Jamali, O; Alladé, I; Donsaré, N; Yalinkpon, F; y Lucien, G. (2024). Dynamics of co-composting of pineapple harvest and processing residues with poultry litter and compost quality. *Sci Rep*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66335-z>
- Steiner, T; Leitner, L; Zhang, Y; Möller, J; Löder, M; Greiner, A; Laforsch, C y Freitag, R. (2024). Detection and specific chemical identification of submillimeter plastic fragments in complex matrices such as compost. *Sci Rep* 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51185-6>
- Tello, P. (2018). *Gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Ediciones Proper Mx. <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/GESTION-INTEGRAL-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-URBANOS-LIBRO-AIDIS.pdf>
- Unidad de gestión ambiental de la Universidad de San Buenaventura. (2024). *Residuos orgánicos* [Libro de Excel]
- Universidad de San Buenaventura Medellín. (2022, 12 de mayo). *Conoce más sobre la Unidad de Gestión Ambiental*. Noticias Universidad de San Buenaventura Medellín. <https://www.usbmed.edu.co/noticias/ampliacion-informacion/artmid/1732/articleid/6725/conoce-mas-sobre-la-unidad-de-gestion-ambiental>

**Anexo N. Poster**

En último lugar, incluirás el anexo del poster que utilizarás en la jornada de prácticas académicas.