



Análisis de la influencia del porcentaje de humedad en la eficiencia del proceso de degradación de biorresiduos en pacas digestoras

Daniel Felipe Puerta Herrera

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Sanitario

Asesor interno

Natalia Espinosa Aguirre, Ingeniera Ambiental

Asesor externo

Carlos Esteven Pulgarín Muñoz, Ph.D (c), MS. C, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Escuela ambiental

Ingeniería Sanitaria

2024

Cita	(Puerta Herrera, 2024)
Referencia	Puerta Herrera, D. F. (2024). <i>“Análisis de la influencia del porcentaje de humedad en la eficiencia del proceso de degradación de biorresiduos en pacas digestoras”</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez

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

Dedico este trabajo de grado a aquellos que han sido mi fuente constante de inspiración y apoyo a lo largo de esta travesía académica.

A mis padres, quienes han sido mis guías inquebrantables. Su amor, sacrificio y ejemplo me han impulsado a perseguir la excelencia y a nunca rendirme.

A mis amigos y compañeros, quienes han compartido risas, desafíos y triunfos a lo largo de esta travesía. Gracias por ser mi red de apoyo y por hacer que esta experiencia sea memorable.

A los profesores del alma Mater cuya sabiduría y orientación han sido la brújula que me ha guiado en este viaje académico.

A todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi crecimiento y éxito académico, les dedico este logro. Vuestra presencia en mi vida ha dejado una marca indeleble.

Este trabajo es un tributo a todos ustedes, quienes han hecho posible que alcance esta meta.

Gracias por ser parte de mi historia y por compartir este logro conmigo.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profunda gratitud a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, a mis asesores, Carlos Esteven Pulgarín Muñoz y Natalia Espinosa Aguirre por su orientación experta, paciencia y valiosos aportes que fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de este proyecto. Su dedicación y compromiso son ejemplos que llevaré conmigo en mi carrera académica y profesional.

Agradezco sinceramente a mis compañeros de clase y amigos que brindaron apoyo moral y compartieron ideas en discusiones enriquecedoras. Su colaboración fue esencial para superar los desafíos y alcanzar los objetivos propuestos.

También extiendo mi reconocimiento a la ingeniera ambiental Laura Linares Rodríguez y a Luis Emilio Hurtado, a todo el equipo de jardinería de la universidad de Antioquia y sobre todo al proyecto Giro sostenible, quienes generosamente ofrecieron su apoyo, tiempo y conocimientos para enriquecer este trabajo.

Finalmente agradezco a mi familia por su constante respaldo, comprensión y aliento. Su apoyo incondicional ha sido mi mayor fortaleza.

Gracias a todos los que formaron parte de este viaje académico. Su contribución ha dejado una huella imborrable en mi formación profesional.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2 Marco teórico	14
3 Metodología	20
4 Resultados y análisis	24
4.1 Parámetros Físicoquímicos iniciales	24
4.2 Humedad	26
4.3 Temperatura y pH.....	30
4.4 Altura y pesos iniciales y finales.....	33
5 Conclusiones	37
6 Recomendaciones.....	38
Referencias	39

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados análisis fisicoquímicos iniciales.	25
Tabla 2 Resultados de abono producido.....	34

Lista de figuras

Figura 1 Horizontes y composición de una paca digestora: Diseño experimental.	21
Figura 2 Precipitación ciudad de Medellín en los meses de Noviembre, Diciembre 2023 y Enero 2024 respecto a 100 mm de lluvia.....	27
Figura 3 Precipitación ciudad de Medellín en los meses de Diciembre 2023 y Enero y Febrero 2024 respecto a 100 mm de lluvia.....	27
Figura 4 Resultados de toma de muestras de humedad en pacas digestoras.....	28
Figura 5 Resultados de toma de muestras de Temperatura en pacas digestoras.....	31
Figura 6 Resultados de toma de muestras de pH en pacas digestoras.	32
Figura 7 Resultados de toma de muestras de Altura en pacas digestoras.	33

Listado de imágenes

Imagen 1 Pacas digestoras.....	22
Imagen 2 Abono resultante paca con humedad controlada.....	35
Imagen 3 Abono resultante paca con humedad no controlada.....	36

Resumen

Según la ONU, a nivel mundial, se desperdician 1,300 millones de toneladas de alimentos anualmente, lo que conduce a problemas ambientales. La mayoría de estos desechos acaban en vertederos, generando gases de efecto invernadero y lixiviados perjudiciales. Para abordar estos biorresiduos, es crucial una gestión ambiental adecuada. El compostaje y los biodigestores son las tecnologías más comunes, descomponiendo la materia orgánica con la ayuda de microorganismos. A pesar de su efectividad, han enfrentado desafíos, como el control de olores y gases tóxicos. Otras alternativas, como las pacas digestoras, han ganado popularidad, pero requieren más reconocimiento y estudios. Debido a lo anterior, en el presente trabajo se evaluó la influencia que tiene la humedad sobre la degradación de la materia orgánica, proporcionando mejor información en base a las pacas digestoras como tecnologías sostenibles. El experimento consistió en la construcción de 6 pacas digestoras con diferentes porcentajes de humedad: 2 de 100%, 2 de 50% y dos blancas (humedad promedio de los residuos ingresados o sin control de parámetros). Los parámetros tomados fueron humedad, pH, temperatura y altura. Teniendo en cuenta lo anterior, se identificó que las pacas que tenían la humedad controlada produjeron una mayor cantidad de abono en comparación con las pacas que tenían muy poca humedad, las cuales, produjeron un abono muy poco práctico, donde el abono resultante fue seco y poco manejable. Esto permitió demostrar la importancia que tiene la humedad en el proceso de transformación producido por las pacas digestoras.

Palabras clave: Pacas digestoras, Compostaje, Humedad, Temperatura, Biorresiduos.

Abstract

According to the United Nations, globally, 1.3 billion tons of food are wasted annually, leading to environmental problems. Most of this waste ends up in landfills, generating greenhouse gases and harmful leachate. Adequate environmental management is crucial to address these biowaste issues. Composting and biodigestion are the most common technologies, breaking down organic matter with the help of microorganisms. Despite their effectiveness, they face challenges such as odor and toxic gas control. Other alternatives like digestate bales have gained popularity but require more recognition and study. Therefore, this study evaluated the influence of moisture on organic matter degradation, providing better insights into digestate bales as sustainable technologies. The experiment involved constructing 6 digestate bales with varying moisture levels: 2 at 100%, 2 at 50%, and two controls (average moisture of input residues or uncontrolled parameters). Parameters measured included moisture, pH, temperature, and height. It was identified that bales with controlled moisture produced more fertilizer compared to those with very low moisture, which resulted in impractical fertilizer that was dry and difficult to handle. This demonstrated the importance of moisture in the transformation process facilitated by digestate bales.

Keywords: Digester bales, Composting, Humidity, Temperature, Biowaste.

Introducción

La problemática del desperdicio de alimentos es un desafío global con importantes implicaciones ambientales y socioeconómicas. Según datos de la ONU, cada año se pierden o desperdician enormes cantidades de alimentos, alcanzando aproximadamente 1.300 millones de toneladas a nivel mundial (Oviedo-Ocaña, 2017). Estos alimentos desechados, también conocidos como biorresiduos, representan una amenaza para el medio ambiente debido a la falta de una disposición final adecuada. Es preocupante que más del 50% de estos residuos terminen en vertederos o rellenos sanitarios, donde su descomposición contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y lixiviados que generan impactos negativos tanto sanitarios como ambientales (Gómez, 2020; Vergara & Tchobanoglous, 2012). En este contexto, la gestión adecuada de los residuos sólidos o biorresiduos se convierte en un aspecto crucial de la gestión ambiental, ya que su tratamiento depende en gran medida de las condiciones óptimas del medio ambiente para garantizar una correcta recirculación de la materia orgánica (Román, 2013).

La Universidad de Antioquia no está exenta de este desafío. Gracias a la reimplementación de los "Domo Café" en la sede principal de la institución se ha generado una cantidad significativa de "Borra de café" (residuos resultantes de la preparación de café filtrado). Para el año 2019, se estimaba que esta producción alcanzaba aproximadamente los 95 kilogramos por día en el campus universitario (Grupo aliados con el planeta UdeA, 2023). Además, la presencia de puestos de comida informal, ubicados clandestinamente en las instalaciones universitarias, también contribuyen a la generación de biorresiduos sin una disposición final clara.

Consciente de esta problemática y comprometida con el desarrollo de soluciones sostenibles, la Universidad de Antioquia ha iniciado programas para la gestión integral de residuos orgánicos, como el proyecto Giro Sostenible en su versión 2.0. Este proyecto busca aprovechar el potencial de los biorresiduos generados en la universidad de una manera inteligente y sostenible. Una de las principales iniciativas dentro de este proyecto es la implementación de la paca digestora, una tecnología innovadora diseñada para descomponer los biorresiduos y transformarlos en abono orgánico de alta calidad (Silva-Perez, 2012). Sin embargo, a pesar de sus beneficios potenciales, las pacas digestoras son aun relativamente desconocidas en cuanto a su aplicación para el tratamiento de biorresiduos, y su aceptación tanto social como científica es irregular (Silva-Perez,

2012). Por lo tanto, el propósito de este estudio fue identificar cómo afecta la humedad la eficiencia en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos ingresados en la paca digestora. Lo anterior, midiendo los parámetros involucrados en la transformación de los biorresiduos (pH, temperatura, humedad, etc); y teniendo en cuenta el comportamiento de la humedad en el proceso de compostaje aerobio, donde la humedad en un rango entre 50% y 60% tiene mejor eficiencia y si es menor de 50%, el proceso de descomposición sería más lento y no sería completamente efectivo (George Tchobanoglous, 1994), en función a la cantidad final de abono obtenido.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Analizar la influencia que tiene el porcentaje de humedad en la eficiencia del proceso de degradación de biorresiduos en pacas digestoras.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia que tiene el porcentaje de humedad sobre los parámetros fisicoquímicos que describen el proceso de degradación de los biorresiduos en pacas digestoras.
- Analizar la relación que tiene la humedad en la descomposición de los biorresiduos con la cantidad final del abono producido por las pacas digestoras.

2 Marco teórico

En las culturas prehispánicas la limpieza pública formaba parte de la actividad diaria de la población. En la gran Tenochtitlán alrededor de mil personas recogían la basura, los tiraderos se ubicaban en tierras pantanosas, la basura se utilizaba para iluminar la ciudad y la materia séptica y excretas se utilizaba como abono. (Pilar Tello Espinoza, 2018)

Así se inicia la gestión de los residuos sólidos en la América Latina. La conquista y la colonia incorporaron los usos y costumbres de la Europa de la época. En el tiempo, las prácticas de entrega, recolección y transporte no variaron en su concepto fundamental, sino solo en el uso de equipo. La gran transformación se logra con el manejo en la disposición final al eliminar los humeantes vertederos por rellenos sanitarios. Esto sucedió en la segunda mitad del siglo XX, es decir, casi 500 años después de la llegada de los conquistadores. Hoy en día gracias a los avances ambientales y tecnológicos se promueve a lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a través de un desempeño de excelencia en la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) (Pilar Tello Espinoza, 2018).

Los residuos sólidos son todos aquellos materiales descartados, que resultan de un proceso de manufactura, modificación, uso o consumo; se clasifican según su estructura química, origen y posible destino final. En esta categorización, se incluyen los residuos sólidos orgánicos putrescibles (RSOP), que son materiales naturales que no han sufrido una transformación natural significativa y aún sirven como fuente de energía para algunos microorganismos (bacterias, hongos y otros agentes biológicos), además, poseen un grado de humedad que promueve su biodegradación y, por ende, su conversión en abono (González, 2016)

Dentro de los RSOP se encuentran los residuos forestales, como los restos de poda, césped, ramas, hojas y tallos; materiales naturales caracterizados por su elevado contenido de carbono debido a su naturaleza lignocelulósica, y bajos niveles de humedad y nutrientes, lo que ralentiza su descomposición. Asimismo, forman parte de los RSOP los desechos de animales, estiércol, lodos biológicos, sobras de comida, legumbres y frutas enteras o parcialmente consumidas, que, a diferencia de los residuos forestales, presentan un alto contenido de humedad y nutrientes (Martínez & González, 2018). Sin embargo, todo material orgánico está compuesto por moléculas

de carbono, nitrógeno, fósforo, oxígeno y otros macro y micronutrientes esenciales para las plantas (Kamuk, Velis, & Gilbert, 2015).

Diariamente se generan grandes cantidades de material orgánico debido al aumento en la demanda, procesamiento y consumo de recursos necesarios (agrícolas, ganaderos, forestales, etc.) por parte de la población humana; esto es consecuencia del crecimiento poblacional acelerado y el desarrollo social. Considerando que solo el 2% de la cantidad de RSOP generados recibe un tratamiento adecuado para su reutilización, un 15% se destina a la alimentación animal y el resto se deposita en vertederos o rellenos sanitarios, se prevé que para el año 2050 la cantidad de desechos sólidos orgánicos aumentará en un 70% a nivel mundial si no se toman medidas al respecto (Ossa Carrasquilla, 2016).

La gestión deficiente de los RSOP implica su disposición mediante técnicas como el relleno sanitario, la acumulación en áreas abiertas o inadecuadas sin control, quemas al aire libre, entierros, vertidos en cuerpos de agua, entre otros. Lo anterior contribuye a la degradación ambiental y a efectos adversos en la salud humana, principalmente debido a la propagación de vectores y enfermedades (González, 2016).

El relleno sanitario suele ser la técnica más utilizada para la disposición final de los RSOP, debido a la falta de conciencia ambiental en cuanto a la separación de desechos aprovechables y no aprovechables desde su origen. En este proceso, todos los desechos se envían directamente al relleno sanitario, donde, se descomponen generando lixiviados, gases tóxicos y un residuo que no puede reintegrarse al ciclo biológico, ya que, contiene compuestos tóxicos y metales pesados que pueden afectar el suelo, otros microorganismos y la calidad de vida humana (González, 2016).

El adecuado manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) es esencial para abordar los desafíos ambientales y de salud asociados con su generación, además, de su potencialidad de reutilización como fuente de energía, es importante conocer en detalle las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, como características principales se tienen:

Contenido de humedad: Definida como la cantidad de agua contenida en un material. El contenido de humedad de los residuos sólidos puede expresarse de dos formas: el contenido volumétrico de humedad, que se refiere a la relación entre el volumen de agua contenida y el

volumen total de los residuos; o el contenido gravimétrico de humedad, que representa la relación entre el peso del agua contenida y el peso total de los residuos (Lund, 1996)

Tamaño de partícula y distribución del tamaño: Esta propiedad es de consideración importante dentro de la recuperación de materiales, especialmente con medios mecánicos, como cribas, trommel, y separadores magnéticos (George Tchobanoglous, 1994). Los componentes de los residuos se suelen describir según su longitud, anchura y altura (Gerard Kiely, 1999)

Capacidad de campo: Se refiere a la cantidad total de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad, por encima de la cual el agua drena libremente. La capacidad de campo de los residuos es de una importancia crítica para determinar la generación de lixiviados en los vertederos u otros métodos como las pacas digestoras. Esta propiedad varía con el grado de presión aplicada y el estado de descomposición del residuo (George Tchobanoglous, 1994)

Por otra parte, los residuos debido a sus características únicas pueden ser aprovechados de diversas maneras. Por ejemplo, el gas metano producido puede ser utilizado como combustible, contribuyendo a la generación de energía sostenible. Asimismo, los residuos orgánicos, ricos en nutrientes, ofrecen oportunidades para la elaboración de compost, mejorando la fertilidad del suelo y promoviendo la recuperación de tierras degradadas (George Tchobanoglous, 1994)

Existen varias tecnologías para el tratamiento de los residuos orgánicos o biorresiduos, el compostaje y los biodigestores son los métodos más utilizados, en los cuales se llevan a cabo procesos de descomposición biológica, donde, la participación de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes es esencial (Zi Xiang Keng a, 2020), siendo así una de las opciones con mayor aplicación (R.A Slater, 2001). Además, varios factores como su bajo presupuesto, sencillez de fabricación y mantenimiento los han constituido como una de las tecnologías de mayor aplicación en países desarrollados y en vía de desarrollo. (Zhentong Li 1, 2013).

Las tecnologías sostenibles como lo son el compostaje y los biodigestores, a pesar de ser de los más utilizados mundialmente, demuestran que no son completamente efectivas (Luciana Pranzetti Barreira, 2006) incluso en el territorio colombiano donde las anteriores se encuentran en su auge. En el caso del compostaje, por ejemplo, por su condición aerobia requiere de una

oxigenación permanente para evitar malos olores o generación de gases tóxicos, regular la temperatura y el pH en el sistema (Pilar Román, 2013); en estas condiciones los microorganismos aerobios transforman la materia orgánica en biomasa celular y en compuestos oxidados (Xavier Elías Castells, 2012). Por su parte, los biodigestores requieren de una condición totalmente anaerobia, donde los niveles de oxígeno sean bajos o nulos favoreciendo metabolismos anaerobios como la metanogénesis y así, el metano producido permite su uso como potencial energético (H. Nikpey a, 2014)

Actualmente, se han realizado investigaciones y se vienen evaluando otro tipo de tecnologías ambientales que facilitan un tratamiento integral para los biorresiduos, como es el caso de las pacas digestoras, (Ossa Carrasquilla, 2016), permitiendo realizar un proceso anaerobio facultativo en el cual la materia orgánica o RSOP se convierten en abono (Fabricia Silva da Rosa, 2017). Su construcción está basada en capas y se puede comparar con la técnica de pastel de hojaldre, en el cual, la capa externa de la paca digestora debe estar conformada por materia vegetal como hojarasca, poda o aserrín que actúa como capa protectora de los biorresiduos del exterior y del oxígeno, evitando así su pudrición (Silva-Perez, 2012). En el interior, se colocan los biorresiduos como restos de alimentos, frutas, verduras, borra de café, entre otros. Luego, se cubre nuevamente con una capa protectora de hojarasca, se compacta, y se repite el proceso hasta llenar el molde de la paca u obtener la altura deseada, como se puede observar en la Figura 1.

Se infiere que el proceso que ocurre dentro de las pacas biodigestoras es una digestión anaerobia; una reacción bioquímica mediante la cual se descompone la materia orgánica en ausencia total de oxígeno y bajo la influencia de un conjunto específico de bacterias (bacterias hidrolíticas, acetogénicas, metanogénicas), promoviendo procesos metabólicos anaerobios como la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, los cuales a su vez facilitan la producción de productos como biogás (una mezcla de gases), cuyo componente principal es el metano, y digestato que es una mezcla de minerales (N, P, K, Ca, etc.) (Cámara Moguel, 2014). Sin embargo, el proceso de transformación de la materia orgánica en pacas biodigestoras, no se da bajo condiciones totalmente anaerobias, dado a que las pacas son ensambladas y mantenidas durante este proceso a la intemperie, es decir, que el proceso se da en un sistema abierto y variable, que posibilita un intercambio de materia y energía entre las caras externas de la paca y el entorno (anaerobio facultativo) (Ossa Carrasquilla, 2016).

Las pacas digestoras cuentan con varias bondades en cuanto a su práctica en la industria ya que proporcionan una mejor gestión de los biorresiduos, reciclaje de nutrientes, e incluso pueden ser utilizadas por la industria inmobiliaria, como un objeto de embellecimiento de paisaje sostenible (materia sostenible), para aquellos condominios que no cuentan con áreas verdes (J.B. Holm-Nielsen, 2019). Cabe resaltar que estas también cuentan con una serie de parámetros físicoquímicos que requieren una comprensión profunda de factores clave que influyen en su descomposición. Entre estos factores, el pH, la temperatura y la humedad son elementos importantes que determinan la eficiencia y la calidad del proceso.

En el contexto del compostaje y las pacas digestoras, el pH del material desempeña un papel esencial, ya que afecta directamente la actividad microbiana. Se ha establecido que un pH óptimo se encuentra en el rango de 7 a 7.5. Dentro de este intervalo, los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica operan en condiciones óptimas, facilitando un proceso eficiente y controlado (Instruments, 2024).

La temperatura, por su parte, es un indicador fundamental para evaluar la eficiencia y el grado de estabilización alcanzado durante el compostaje. La temperatura influye directamente en la magnitud de la degradación de la materia orgánica y se divide en tres fases que ya están bien definidas: la fase mesófila inicial, con temperaturas inferiores a 45°C; la fase termófila, con temperaturas superiores a 45°C; y la fase mesófila final o enfriamiento, cuando se retorna a la temperatura inicial (Ossa Carrasquilla, 2016).

En cuanto a la humedad, es crucial mantener un equilibrio adecuado para el desarrollo microbiano y, por ende, para el éxito del compostaje. Se ha sugerido que la humedad óptima se sitúa entre el 50% y el 70%. Cuando la humedad desciende por debajo del 30%, la actividad biológica se reduce significativamente. En contraste, si la humedad supera el 70%, se corre el riesgo de que el agua ocupe los espacios intergranulares, dificultando la transferencia de oxígeno y propiciando condiciones anaeróbicas (Ossa Carrasquilla, 2016). Sin embargo, hay cierta variabilidad en los estudios, ya que, algunos autores sostienen que el rango óptimo se encuentra entre el 50% y el 60%, y que una disminución por debajo del 40% resulta en una reducción de la velocidad de fermentación (George Tchobanoglous, 1994).

Por otra parte, el comportamiento de las pacas digestoras puede verse afectado por el clima, en particular por las lluvias y la sequía. Las lluvias pueden aumentar la humedad de las pacas, lo que puede dificultar el proceso de descomposición. La sequía, por otro lado, puede reducir la humedad de las pacas, lo que puede provocar la muerte de las bacterias descomponedoras (Lopez, 2019).

Este análisis detallado de los parámetros más importantes en el proceso de compostaje destaca la necesidad de un monitoreo cuidadoso para garantizar condiciones óptimas que favorezcan la descomposición eficiente y sostenible de los residuos orgánicos. La comprensión de estas variables contribuye no solo a la mejora de los procesos de tratamiento, sino también a la promoción de prácticas más efectivas y respetuosas con el medio ambiente.

3 Metodología

El enfoque metodológico utilizado en este trabajo se centró en la investigación, análisis e interpretación de datos relacionados con las pacas digestoras, través de fuentes documentales y trabajo de campo; con el fin de comprender el funcionamiento y efecto de la humedad de las pacas digestoras en la degradación de la materia orgánica y la producción de abono. A continuación, se describen detalladamente las etapas de la metodología empleada para investigar y analizar este proceso.

Diseño de experimento

Construcción y desarrollo de pacas biodigestoras

El lugar seleccionado para la construcción de las pacas digestoras fue la Universidad de Antioquia en su sede principal. Este lugar contaba con características adecuadas, ya que estaba a la intemperie, lo que permitía comprobar una de las ventajas de las pacas digestoras: su poco o casi nulo mantenimiento. Por otra parte, los residuos utilizados se obtuvieron de los domos de la universidad ("borra de café") y la tienda juguitos ("residuos de frutas"). Además, la hojarasca se recolectó de los árboles presentes en el campus universitario.

Se construyeron un total de 6 pacas digestoras. El molde de las pacas digestoras se hizo de madera y contó con dimensiones de 50 cm de altura, 50 cm de ancho y 50 cm de largo (Figura 1), dando así un volumen de 0.125 m³. La relación del sustrato ingresado fue de 1:1, con un 0.25% de borra de café, 0.25% de residuos orgánicos y un 50% de hojarasca.

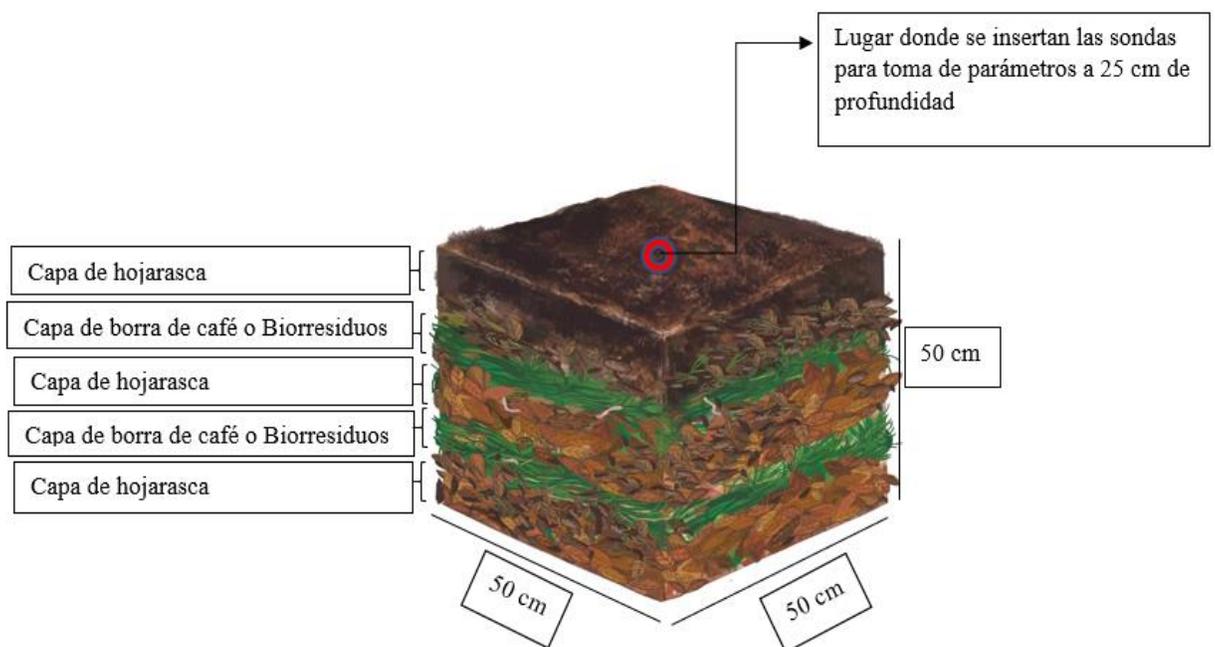
Para llevar a cabo la construcción de una paca digestora, se implementaron los siguientes pasos:

1. Se inició colocando el molde de madera con la superficie del suelo permeable en el lugar designado.

2. Se aplicó una primera capa de hojarasca, brindando protección a la paca y permitiendo que los líquidos producidos por los residuos pudieran filtrar adecuadamente en el suelo.
3. Se introdujo la primera capa de residuos orgánicos y borra de café en el centro de la primera capa de hojarasca. Esto se hizo para que la hojarasca circundante protegiera los residuos orgánicos y la borra de factores externos, evitando el deterioro de la paca digestora, la generación de malos olores y el interés de animales de gran tamaño en su interior.
4. Se cubrieron todos los residuos introducidos con una segunda capa de hojarasca.

Figura 1

Horizontes y composición de una paca digestora: Diseño experimental.



Fuente: programa para la gestión ambiental de residuos orgánicos UdeA (Giro Sostenible UdeA), 2023.

5. Se compactó la primera "porción" de la paca para eliminar todo el oxígeno presente y facilitar el proceso de descomposición anaerobia. Este proceso se realizó mediante pasos fuertes sobre la paca hasta lograr una buena consistencia.
6. Se repitieron los pasos 2, 3, 4 y 5 respectivamente hasta llenar por completo el molde.
7. Una vez que el molde estuvo completamente lleno y compacto, se procedió a retirar el molde de madera, dejando la paca digestora lista para iniciar su proceso de degradación (Imagen 1) en un período de 4 meses aproximadamente.

Imagen 1

Pacas digestoras.



Fuente: Propia, práctica social UdeA (Giro Sostenible UdeA), 2023.

Control y toma de mediciones.

Una vez construidas las 6 pacas digestoras, se inició la toma de muestras. En este trabajo, se tomaron los parámetros de humedad, pH, temperatura y altura. Inicialmente, se tomó la humedad cada 2 días, y dependiendo del avance, se realizó la toma dos veces por semana durante un periodo de 87 días. Tanto la humedad como los demás parámetros se tomaron mediante 3 sondas

introducidas a 25 cm en el centro de la paca digestora por uno de sus lados, como se puede observar en la (Figura 1), con la excepción de la altura que se media con un metro.

Es importante destacar que las pacas digestoras tenían diferentes grados de humedad: 100%, 50%, y dos blancos o controles (humedad promedio de los residuos ingresados o sin control de parámetros). Debido a factores climáticos en la ciudad de Medellín y con el fin de mantener la humedad en los rangos mencionados anteriormente, cada vez que se realizaban las mediciones, se regaba un promedio de 20 litros de agua a las 2 pacas de 100%. A las pacas de 50%, solo se les introducía 10 litros si era necesario; es decir, si su grado de humedad descendía por debajo del 50%. Las 2 pacas restantes no tenían intervención alguna.

Caracterización de muestras

La caracterización fue realizada por el grupo interdisciplinario de estudios intermoleculares de la Universidad de Antioquia “GIEM”, justo al inicio de la práctica. En este proceso, se tomaron los residuos ingresados y se midió el carbono orgánico total, NTK, pH, coliformes, *E. coli*, macrocontaminantes, Fósforo total, Sodio total, Zinc total, Potasio total, Calcio total, Magnesio total, etc. Basándose en la normativa 5167 del 2011, conocida como “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5167”. Esto permitió evaluar la calidad de los residuos ingresados en las pacas digestoras para identificar si el proceso de descomposición si iba a ser el correcto.

Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado a partir de series de tiempo, en el que se examinaron las fluctuaciones, tendencias y patrones estacionales presentados en los datos obtenidos a lo largo de 87 días observados en las (Figuras 4, 5, 6 y 7), en estos se identifican variables como el pH, la humedad, la temperatura y la altura, con el fin de observar cómo se dio el proceso de transformación de los biorresiduos en abono.

4 Resultados y análisis

4.1 Parámetros Físicoquímicos iniciales

Como se mencionó en la metodología, a las pacas se les introdujeron biorresiduos y borra de café para que pudiera tener lugar el proceso de fermentación o transformación de estos a un abono orgánico. Estos materiales contaron con unos parámetros físicoquímicos iniciales que pueden observarse en la (Tabla 1).

El abono orgánico derivado de la transformación de biorresiduos, debe ser sometido a diferentes ensayos, que permitan su aprobación para ser usado como fertilizante en los suelos. Esto incluye conocer de manera prematura como están compuestos los residuos utilizados para la elaboración de este. La mezcla de material orgánico a transformar debe proporcionar una buena relación entre los principales nutrientes, esto para que haya una buena proliferación microbiana, dado que los microorganismos generalmente utilizan 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno; por tanto se considera que una relación carbono/nitrógeno entre los 20 y 35, es adecuada, para un buen proceso de transformación de la materia orgánica, dado que, durante el proceso fermentativo algunas fuentes de carbono se convierten en dióxido de carbono y el nitrógeno se mineraliza en nitratos (Márquez, Blanco, & Capitán, 2008).

Según la norma técnica colombiana NTC 5167 (2011), los residuos utilizados para la producción de abono deben de contar con una serie de características, como lo vendrían siendo: un contenido de humedad entre 35% y 60% debido a que si es menor, el producto obtenido puede llegar a ser inestable o ser un producto de difícil manejo, o si es mayor este podría presentar pudrición; un contenido de cenizas máximo del 60%; un contenido mínimo de carbono orgánico oxidable total del 15%; un contenido de nitrógeno total entre el 2% y el 3%; un pH mayor de 4 y menor de 9 y una densidad máxima de 0,6 g/cm³. Además, la norma considera un buen abono orgánico, cuando al inicio se cuenta con la presencia de macro y micronutrientes como fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, sodio, en al menos 1% de la muestra, debido a contenidos mayores de carbono y nitrógeno en relación con los micronutrientes y a un alto contenido de cenizas, que reflejan un buen proceso de mineralización de la materia orgánica (ICONTEC, 2011).

Tabla 1

Resultados análisis fisicoquímicos iniciales.

Resultados Análisis Fisicoquímicos		
Parámetro	Resultado	Unid.
Humedad	64,1	%
Cenizas	24,2	%
Pérdida por volatilización	75,8	%
CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico)	49,5	meq/100 g
CO (Carbono orgánico oxidable total)	34,1	%
CIC/CO (CIC en términos de CO)	145,3	meq/100 g CO
CRA (Capacidad de Retención de Humedad)	147,2	%
Densidad real	0,5	g/cm ³
pH	5,17	U pH
C.E (Conductividad eléctrica)	0,16	dS/m
N-Org. total (Nitrógeno orgánico total)	1,76	%
C/N (Carbono/Nitrógeno)	19,4	-
Fósforo total	0,102	%
Sodio total	0,0521	%
Zinc total	0,00499	%
Potasio total	1,075	%
Calcio total	1,262	%
Magnesio total	0,615	%

Fuente: grupo interdisciplinario de estudios intermoleculares de la Universidad de Antioquia “GIEM”2023

Al relacionar estos requisitos con los resultados obtenidos en la (Tabla 1), se observa que la humedad de los residuos ingresados fue del 64,1%, lo cual excede el límite máximo permitido por la norma, el contenido de cenizas estuvo dentro del límite establecido con 24,2%, la relación carbono/nitrógeno es de 19,4 la cual estuvo dentro del rango permitido por la norma, un pH de 5,17

la cual también cumplió, una densidad de $0,5 \text{ g/cm}^3$ adaptada a la norma y la presencia de macro y micro nutrientes como fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc y sodio cercanas a 1%. Sin embargo, el contenido de nitrógeno total fue de 1,76%, ligeramente por debajo del límite mínimo del 2% establecido por la norma.

Casi todos los parámetros cumplieron con los estándares para la producción de un buen abono orgánico, excepto el nitrógeno y la humedad. Sin embargo, cabe aclarar que estuvieron muy cerca de los valores establecidos. Se puede concluir que la mezcla de material usado en las pacas digestoras es apta y que el abono resultante, teóricamente, tiene altas probabilidades de ser un abono orgánico de calidad.

4.2 Humedad

En este trabajo investigativo, se llevó a cabo un análisis entre la interacción del clima, la humedad y los resultados obtenidos. La dinámica del clima desempeñaba un papel importante en la investigación, especialmente considerando la ubicación geográfica de Medellín. Esta ciudad, con clima monzónico, caracterizado por temperaturas templadas, elevada humedad y con una temperatura promedio de 22° C (Spark, 2023), .

En un periodo de investigación que abarcó aproximadamente 87 días entre el 22 de noviembre del 2023 y el 16 de febrero del 2024, se observaron las variaciones climáticas que pudieran influir en los resultados, específicamente de la humedad. En la Figura 2, se presentan las condiciones de precipitación de Medellín durante el experimento, las cuales, impactaron directamente los datos recopilados durante el desarrollo de la investigación.

Figura 2

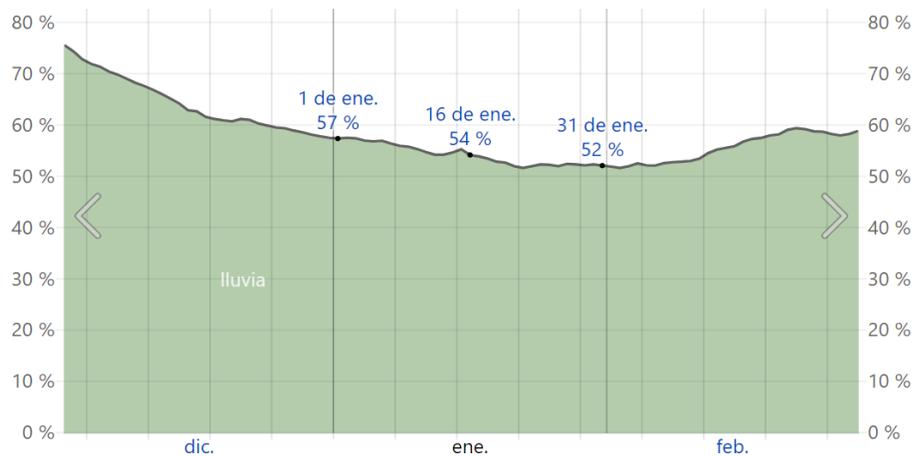
Precipitación de la ciudad de Medellín en los meses de Noviembre, Diciembre 2023 y Enero 2024 respecto a 100 mm de lluvia.



Fuente: ((SRTM), 2023,2024)

Figura 3

Precipitación ciudad de Medellín en los meses de Diciembre 2023 y Enero y Febrero 2024 respecto a 100 mm de lluvia.



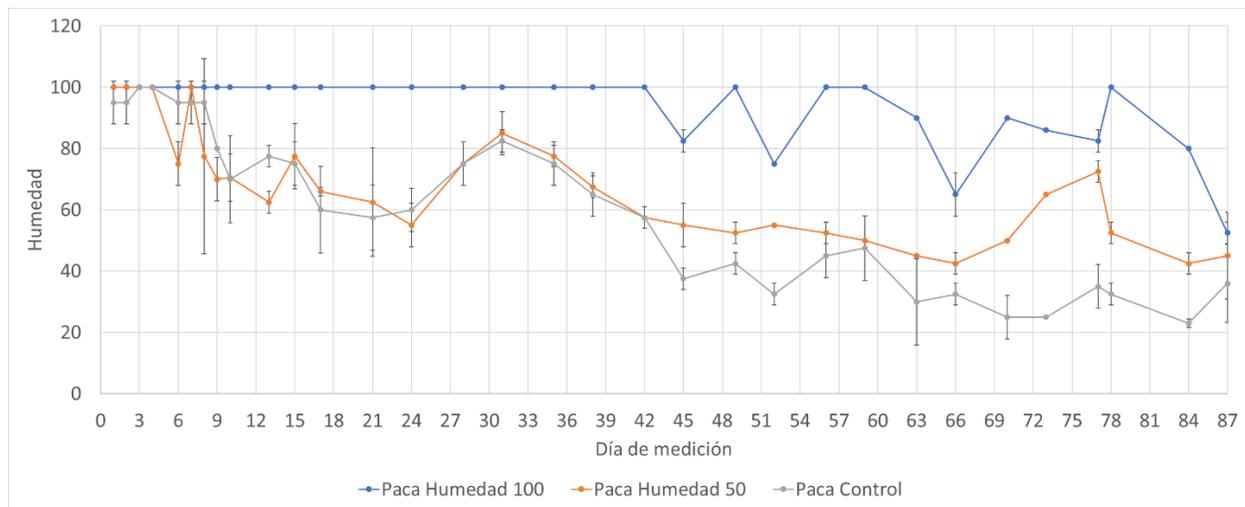
Fuente: ((SRTM), 2023,2024) Nota: durante un mes en relación con la cantidad total de lluvia que se esperaría para ese período en particular en una ubicación geográfica específica. Se

expresa como un porcentaje, donde 0% indicaría que no hubo lluvia en absoluto durante ese mes, mientras que un 100% significaría que la cantidad de lluvia fue exactamente lo que se esperaría para ese mes en particular.

Los porcentajes de la Figura 2 y 3, se calcularon comparando la cantidad real de lluvia registrada durante el mes con la cantidad promedio histórica de lluvia para ese mes en esa ubicación. Por ejemplo, si en enero se espera que llueva un promedio de 100 mm en una determinada área, pero solo caen 50 mm durante ese mes, el porcentaje de precipitación sería del 50% ((SRTM), 2023,2024)

Figura 4

Resultados de toma de muestras de humedad en pacas digestoras.



Fuente: Elaboración propia 2024.

En la Figura 4, se puede observar la humedad promedio entre cada uno de los tratamientos (dos de 100% humedad, dos de 50% humedad y dos sin control de parámetros). Debido a que se estaba aproximando una ola de calor que daría inicio a finales de noviembre, a cada una de las pacas, excepto a control se les estaba agregando cierta cantidad de agua, 20 litros de agua a las pacas con una humedad del 100% y 10 litros de agua a las pacas con una humedad del 50%; las

pacas de control funcionaban con condiciones atmosféricas naturales que se estaban presentando en Medellín.

Al principio todas las pacas mantenían una buena cantidad de humedad cercana al 100%, esto debido a que las pacas estaban recién construidas y todavía se contaba con toda la humedad de los residuos orgánicos. Además, el clima comenzó siendo algo nublado y con leves lluvias alcanzando un porcentaje de precipitación del 82% a mediados del mes de noviembre (Figura 2). Sin embargo, iniciando diciembre las condiciones atmosféricas comenzaron a cambiar, con un porcentaje de precipitación de alrededor de 76% (Figura 1) y terminando con un porcentaje de precipitación de 57%; debido a que este mes inicio con el Fenómeno del Niño, llegando a temperaturas cercanas a los 30 ° C (Spark, 2023). Lo anterior, generó que todas las pacas comenzaran a presentar cambios en su humedad interna.

Debido a las altas temperaturas como consecuencia de una temporada seca junto con el evento climático el Niño, se evidencia una progresiva reducción en el porcentaje de humedad interna de las pacas digestoras, que inicialmente estaba en el rango del 100%, alcanzando un 37,5% para las pacas de control el 5 de enero del 2024, día de medición número 45 (Figura 4). Estos cambios podrían indicar que las pacas digestoras estaban ingresando en una fase en la que las bacterias descomponedoras fermentadoras estaban comenzando a experimentar una mortalidad regular, lo que podría comprometer su función de descomponer los residuos orgánicos, ralentizando o incluso deteniendo el proceso de formación de abono orgánico (George Tchobanoglous, 1994).

En contraste, en las pacas digestoras donde se controlaba la humedad mediante la adición de agua, para el 5 de enero del 2024 (día de medición 45) las condiciones climáticas parecían tener un impacto menor, con una humedad del 55% y 82,5% para las pacas designadas como "50%" y "100%" respectivamente. Esto sugiere que estas pacas aún mantenían activo su grupo de bacterias fermentadoras y, teóricamente, el proceso de transformación de residuos orgánicos seguía en curso (George Tchobanoglous, 1994).

Siguiendo con las condiciones meteorológicas secas de Medellín, se dio una disminución continua de la humedad en las pacas digestoras, impactando incluso a aquellas que se les controlaba la humedad ("50%" y "100%"), que registraron humedades internas del 42,5% y 65% respectivamente el 26 de enero de 2024, día de medición número 66 (Figura 4). Sin embargo,

gracias al riego semanal, pudieron mantener niveles de humedad adecuados para sostener la actividad de las bacterias fermentadoras y, por ende, el proceso de transformación (George Tchobanoglous, 1994).

Por el contrario, las pacas de control, que operaban sin intervención adicional de agua y estaban sujetas únicamente a las condiciones ambientales locales, presentaron una humedad interna del 32,5% en la misma fecha de medición, lo que indica una actividad bacteriana mínima o nula, sugiriendo que el proceso de transformación de los residuos orgánicos se había detenido debido a la baja humedad (George Tchobanoglous, 1994).

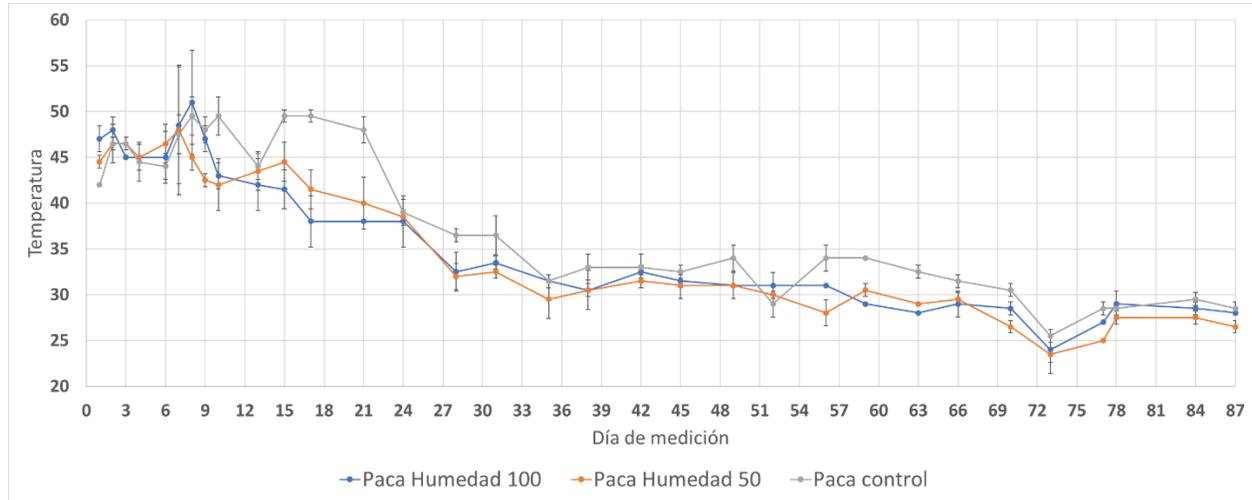
Llegando al último mes, se pudo observar que el porcentaje de precipitación presentó un aumento y paso de un 52% correspondiente a enero, a un 57% de precipitación hasta el último día de medición que fue el 16 de febrero del 2024 (Figura 3), generando un aumento en la humedad de las pacas digestoras. Sin embargo, el aumento no fue considerable, dando como resultado una humedad interna final de 45%, 52,5% y 36% para las pacas de “50% , 100% y control respectivamente.

4.3 Temperatura y pH

En términos generales, temperaturas más altas aceleran la actividad microbiana, lo que se traduce en una descomposición más rápida de la materia orgánica. Este aumento en la actividad biológica puede mejorar la eficiencia del proceso. Por otro lado, el pH, que indica la acidez o alcalinidad del medio, desempeña un papel crucial en la viabilidad de diferentes microorganismos. Cada tipo de microorganismo tiene un rango específico de pH en el cual prospera mejor. En el contexto de la descomposición, es esencial mantener un pH específico para favorecer el crecimiento de las poblaciones microbianas deseadas y prevenir la proliferación de organismos no deseados (Ossa Carrasquilla, 2016). Durante el periodo en el que se realizó el proyecto (87 días) estos parámetros fueron tomados y en base a la práctica se obtuvieron los resultados representados en las Figuras 5 y 6.

Figura 5

Resultados de toma de muestras de Temperatura en pacas digestoras.

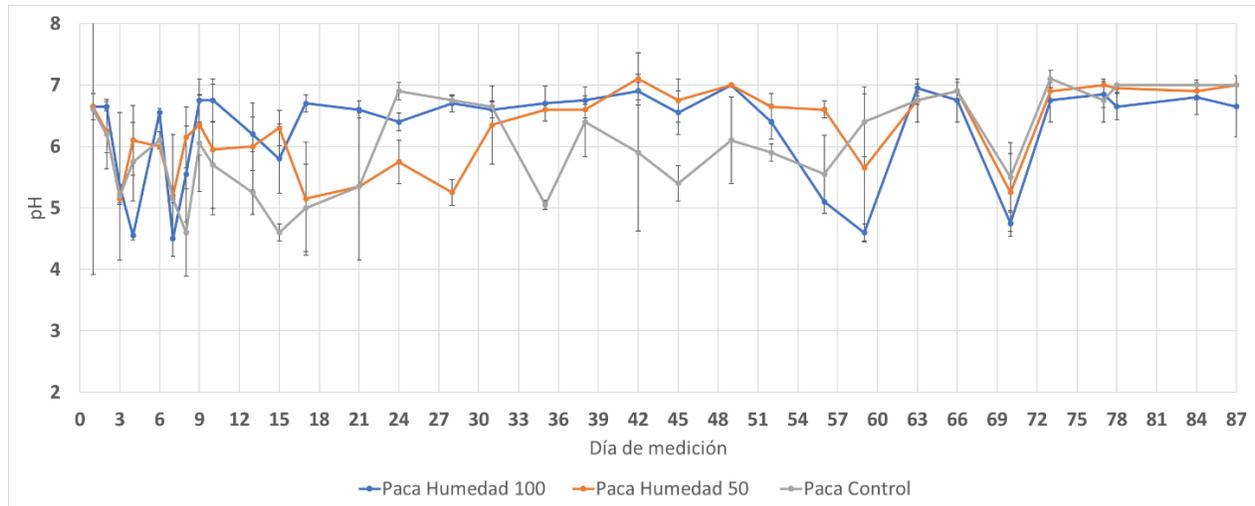


Fuente: Elaboración propia 2024.

En la Figura 5 se puede ver como la temperatura en los primeros días de medición alcanza temperaturas promedio entre los 42°C y los 51°C, esto debido al proceso de digestión anaerobia, en el cual las bacterias fermentadoras descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir o transformar el abono (Ossa Carrasquilla, 2016). La actividad de estas bacterias estuvo influenciada por la temperatura, ya que su tasa metabólica aumenta con el calor. En general, temperaturas más altas suelen promover una mayor actividad bacteriana y, por lo tanto, una mayor tasa de descomposición de la materia orgánica. (Pilar Román, 2013). Sin embargo, a partir del día de medición 15 (6 de diciembre del 2023) se puede observar que las temperaturas empiezan a descender, lo que puede significar que el grupo de bacterias está terminando su actividad metabólica acelerada y está entrando en un modo de adaptación regulada, esto quiere decir, que el proceso de transformación esta estable o llegando a su fin. Además, se puede observar que las pacas con humedad de 50% y 100% suelen tener temperaturas un poco inferiores a las pacas de control, esto debido a que se les esta adicionando agua para poder mantener la humedad bajo las condiciones establecidas, pero la diferencia es tan poca que no suele ser un factor determinante.

Figura 6

Resultados de toma de muestras de pH en pacas digestoras.



Fuente: Elaboración propia 2024.

En todo el periodo de estudio, el pH de las pacas digestoras presento muy pocas variaciones (Figura 6), lo cual permitió identificar que en el proceso de fermentación y/o descomposición sí estuvieron presentes el grupo de bacterias requeridas para que se diera la transformación de los residuos orgánicos o biorresiduos a un abono orgánico, resaltando que estas bacterias viven en pH entre 5,5 y 7 y alcanzan su máximo potencial con buenas temperaturas rondando los 45°C (Ossa Carrasquilla, 2016) como se puede observar en la (Figura 5). Además, se puede evidenciar que las pacas “50% y 100” tuvieron un pH ligeramente superior a las pacas de control, esto posiblemente debido a que contaban con una humedad mayor a las pacas de control.

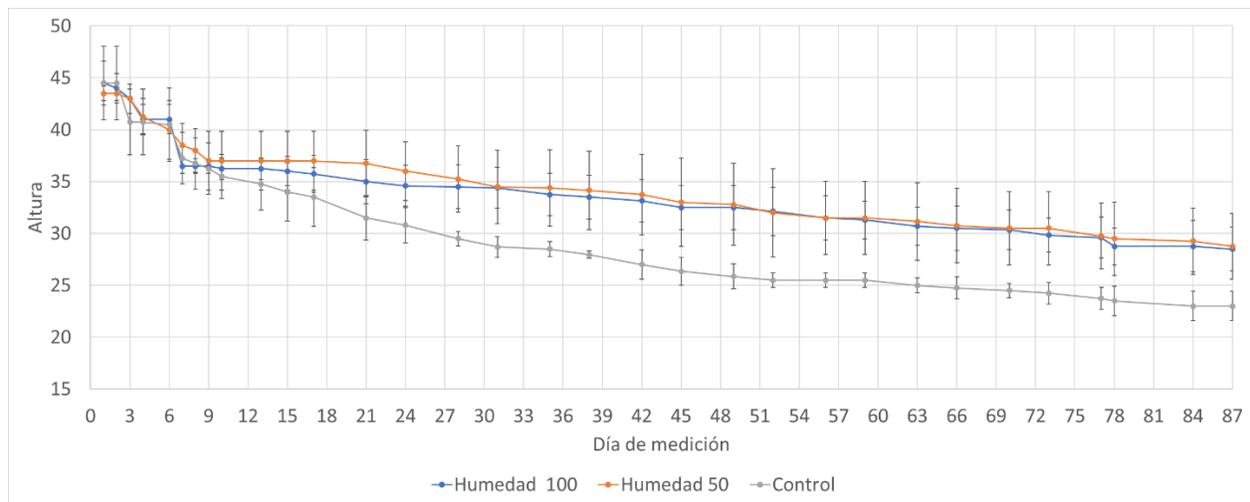
Algunos datos específicos presentaron resultados de pH diferentes, esto se puede deber al uso incorrecto o al estado deteriorado de los elementos de medición, además, de la diferencia de las humedades en las pacas digestoras.

4.4 Altura y pesos iniciales y finales

En la Figura 7 se observan los valores de la altura de las pacas y en la Tabla 2 se encuentra el peso del abono obtenido por paca. Estas son variables físicas importantes en la obtención de abono en pacas digestoras, ya que, proporcionan información valiosa sobre el rendimiento y la eficacia del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica.

Figura 7

Resultados de toma de muestras de Altura en pacas digestoras.



Fuente: Elaboración propia 2024.

En los primeros días de medición se puede observar que todas las pacas digestoras presentan su máximo nivel de altura promedio de 44,5 cm para las pacas de 100% y control; y de 43,5 para las pacas de “50%”, esto debido a que todos los materiales como residuos orgánicos, hojarasca y borra de café se encuentran totalmente frescos conservando su estado y forma inicial, completamente hidratados en el caso de los residuos y no transformados en el caso de la hojarasca y la borra de café. Al pasar el tiempo, se puede observar que las pacas digestoras iban perdiendo altura de manera gradual, esto quiere decir que las bacterias fermentadoras estaban realizando su proceso de transformación de biorresiduos a abono y se realiza una compactación por acción de la gravedad y factores climáticos secos debido a la poca precipitación (Figura 2 y 3); llegando a su

punto más bajo donde adquieren valores promedios de 28,5 cm , 28,75 cm y 23 cm para las pacas de “100% , 50% y control” respectivamente. Obteniendo una pérdida en diferencia de altura de 16 cm para las pacas con 100% de humedad, 14,7 cm para las pacas de 50% de humedad y 21,5 cm para las pacas de control. Cabe resaltar que el promedio de perdida fue menor para las pacas de “100% y 50%” debido a que a estas se les estaba adicionando agua por lo que su interior mantuvo con mayor humedad, por lo tanto, la perdida en altura no se vio tan afectada como si se venía presentado en las pacas de control, cuyo porcentaje de humedad interna era menor.

Tabla 2

Resultados de abono producido.

	Abono producido en Kg	Hojarasca o material seco restante en Kg	Peso resultante total en Kg
Pacas con humedad al 100%	26,5	7,5	34
Pacas con humedad al 50%	20,5	7,5	28
Pacas control	9,5	6	15,5

Fuente: elaboración propia 2024

Nota: En su construcción todas las pacas contaban con 46kg de peso total sumando residuos, borra de café y hojarasca.

En la Tabla 2, se puede observar la producción de abono en el día de desarme (16 de febrero de 2024), la cual, evidencia la influencia de las condiciones de humedad en el proceso de descomposición anaerobia facultativa en las pacas digestoras.

Como se mencionó en la metodología las pacas tenían un peso total inicial de aproximadamente 46 kg cada una, difiriendo de los pesos resultantes totales. Este resultado era esperado, ya que, el día de construcción representa el inicio del proceso y no se había llevado a cabo suficiente tiempo para que se produjera la descomposición anaerobia, que es la responsable de la generación de abono.

Sin embargo, el día de desarme revela resultados importantes. Se destaca una producción considerable de abono, especialmente en las pacas con humedad al 100% y al 50%. La hojarasca, que constituye un componente importante, contribuyó significativamente a la producción de abono en estas pacas. Este hallazgo sugiere que la presencia de humedad es esencial para activar y mantener el proceso de descomposición anaerobia.

En contraste, las pacas de control, que carecen de una intervención específica en términos de humedad, mostraron una producción de abono menor en comparación con las pacas con condiciones de humedad (Imagen 3). Esto sugiere que la humedad juega un papel significativo en el proceso de descomposición anaerobia, debido a que, las pacas de control, experimentaron una descomposición menos eficiente (Reyes, 2020).

El análisis resalta la importancia de mantener niveles óptimos de humedad para favorecer el crecimiento y la actividad microbiana responsables de la descomposición anaerobia (Silva-Perez, 2012). Además, se demuestra que la presencia de hojarasca, en combinación con condiciones de humedad adecuadas, impulsa significativamente la producción de abono (Imagen 2 y 3).

Estos resultados tienen implicaciones prácticas para la optimización de la producción de abono en sistemas de pacas digestoras. La gestión efectiva de la humedad, junto con la inclusión de materiales ricos en carbono como la hojarasca, residuos orgánicos y la borra de café, pueden ser clave para maximizar la eficiencia del proceso y obtener un abono de alta calidad.

Imagen 2

Abono resultante paca con humedad controlada.



En la Imagen 2, se observa un abono húmedo de alta calidad distinguido por su aspecto oscuro y terroso, una textura suelta y granulada, además, este abono presentaba un aroma fresco y natural.

Imagen 3

Abono resultante paca con humedad no controlada.



Fuente: elaboración propia 2024.

A diferencia de la Imagen 2, en la Imagen 3 se evidencia un abono muy seco, distinguido por su apariencia árida y descolorida, evidenciando una falta de humedad que resulta en una textura dura y granulada que se deshace con dificultad. Además, este abono carecía del aroma fresco y natural asociado con la actividad biológica saludable.

5 Conclusiones

1. Las pacas digestoras representan una alternativa viable para la gestión de residuos orgánicos en zonas rurales y periurbanas, siendo relativamente simples de implementar y operar.
2. El clima, especialmente las lluvias y la sequía, tiene un impacto significativo en el funcionamiento de las pacas digestoras, afectando la humedad y, por ende, el proceso de descomposición.
3. Para mitigar el impacto de la sequía, se pueden regar las pacas para mantener la humedad adecuada y apoyar a las bacterias descomponedoras.
4. Se evidenció que las pacas con control de humedad mantuvieron una actividad microbiana más activa y una mayor producción de abono en comparación con las pacas de control sin intervención en la humedad.
5. La temperatura y el pH se mantuvieron dentro de rangos óptimos para el crecimiento de las bacterias fermentadoras durante todo el período de investigación, lo que favoreció el proceso de descomposición anaerobia.
6. La altura y el peso de las pacas al inicio y al final del proceso de descomposición mostraron una disminución significativa, indicando una descomposición exitosa de los residuos orgánicos y la producción de abono.

6. Recomendaciones

Es crucial considerar el clima local al construir pacas digestoras, ya que, las condiciones climáticas pueden afectar su eficiencia. Las lluvias pueden causar inundaciones en las pacas o, como ocurrió en este estudio, un evento El Niño pueden llevarlas a deshidratarse, lo que resulta en una menor producción de abono en aquellas pacas donde la humedad no fue controlada. Por lo tanto, se debe realizar un monitoreo continuo de las condiciones climáticas, incluyendo la temperatura y la precipitación, ya que, estos factores tienen un impacto significativo en el proceso de digestión anaeróbica.

Se debe establecer un sistema de control de humedad para garantizar que las pacas mantengan niveles adecuados de humedad, especialmente en condiciones extremas. Es importante mantener condiciones que favorezcan la actividad de las bacterias fermentadoras, responsables de descomponer la materia orgánica, lo que implica tomar medidas para evitar que las pacas se sequen o se inunden, generando que el proceso de descomposición se detenga.

Referencias

- (SRTM), S. R. (Noviembre, Diciembre, Enero, febrero de 2023, 2024). *Weather Spark*. Obtenido de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/m/22535/1/Tiempo-promedio-en-enero-en-Medell%C3%ADn-Colombia#Figures-Rainfall>
- Arango, I. (2018). Diseño y construcción de un digestor anaeróbico de pacas de residuos orgánicos para la producción de biogás. *Revista colombiana de Ciencia Animal*, 219-228.
- Cámara Moguel, K. C. (2014). *LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y LA BIOQUÍMICA*. Villahermosa, Tabasco; México: Kuxulkab' 17 (32).
- Edgar Ricardo Oviedo-Ocaña, L. F.-R.-L. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *SciElo*, 31-42.
- Fabricia Silva da Rosa, L. C. (2017). Sustentabilidade ambiental nos hotéis, contribuição teórica e. *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo*, 39-60.
- George Tchobanoglous, S. V. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. En S. V. George Tchobanoglous, *Gestión integral de residuos sólidos* (pág. 775). España: Environmental Science.
- Gerard Kiely, J. M. (1999). *Ingeniería Ambiental-Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. España: MC Graw Hill.
- Gómez, F. (11 de 03 de 2020). *panasonic*. Obtenido de <https://blog.panasonic.es/ecologia/hacer-compost-transformar-un-problema-en-solucion/>
- González, J. A. (2016). Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución. *Nº 22*, 101-119.
- GrupoaliadosconelplanetaUdeA. (05 de 2023). *Programa Para la Gestión Integral de Residuos Orgánicos -Giro Sostenible UdeA-*. Obtenido de Programa Para la Gestión Integral de Residuos Orgánicos -Giro Sostenible UdeA-: https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/unidades-academicas/ambiental/!ut/p/z1/jZFBT8MwDIX_CjtwjpO023KMumpqV3UNsFFymbw2QNCabrRDiF9PBLsMiW4-2dL37KdnoklJtMMP-

4K9bR3u_PyKx5tchTFIEWTz9C4CFfD1GoSQAJQ8_gBTETEqa8hgQUOQKi7yh2VUz
FJG9DV6-KckXXKcfAPTw-vTSA

H. Nikpey a, M. A. (2014). *Applied Energy- Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas*. ELSEVIER.

ICONTEC, I. C. (23 de 03 de 2011). *Normas Técnica Colombiana [NTC] 5167*. Obtenido de <https://www.icontec.org/>

Instruments, H. (2024). *Hanna Instruments*. Obtenido de Hanna Instruments: <https://www.hannacolombia.com/agro/blog/item/temperatura-y-ph-en-el-proceso-de-compostaje>

J.B. Holm-Nielsen, T. A.-P. (2019). *Bioresource Technology- The future of anaerobic digestion and biogas utilization*. Denmark: ELSEVIER.

javier, f. (2015). *Evaluacion tecnica del proceso de floculacion con los coagulantes empleados en la planta de tratamiento de agua potable*. Bucaramanga : Universidad Bolivariana .

Kamuk, B., Velis, C., & Gilbert, J. (2015). *ECONOMIA CIRCULAR: CARBONO, NUTRIENTES Y SUELO. Asociación internacional de residuos sólidos (ISWA)*.

Lopez, J. (2019). Evaluacion del comportamiento de pacas digestoras en condiciones de lluvias y sequia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 113-122.

Luciana Pranzetti Barreira, A. P. (2006). *Usinas de compostagem do Estado de São Paulo*:. São Paulo - SP - Brasil: IPH - Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e de Pesquisas Hospitalares.

Lund, H. F. (1996). *Manual McGraw Hill de reciclaje*. España: McGraw-Hill Interamericana de España.

Márquez, P. B., Blanco, M. J., & Capitán, F. C. (2008). *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*. Sevilla,huelva, España: (IRNAS) Libros y partes de libros.

Martínez, N., & González, L. P. (2018). *Guía Técnica Para el Aprovechamiento de Residuos*. Bogota: Grupo de Investigación Sistemas Integrados de Producción Agrícola y Forestal (SIPAF).

Ossa Carrasquilla, L. C. (2016). *Aplicación de la tecnología de las pacas biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia*. Medellín: Universidad de Antioquia.

-
- Pilar Román, A. p. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Santiago de Chile : Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Pilar Tello Espinoza, D. D. (2018). *Gestión integral de residuos orgánicos*. Mexico: Proper Mx.
- R.A Slater, J. F. (2001). *Resources, Conservation and Recycling*. China: ScienceDirect.
- Revista Agricultura, G. E.-H. (2017). Ventajas de la fertilización con calcio en cultivos. *Agricultura-Revista Agropecuaria desde 1929*.
- Reyes, J. J. (2020). Efecto del clima en el comportamiento de las pacas digestoras . *Revista colombiana de ciencia Animal*, 329-337.
- Silva-Perez, G. (2012). *MANEJO LIMPIO Y SANO DE RESIDUOS BIODEGRADABLES EN PACAS DIGESTORAS SILVA*. Medellin: Academia.
- smith. (2020). Gestión de Residuos Sólidos Urbanos: Prácticas Sostenibles. *Editorial ABC*.
- Spark, W. (mensual de 12 de 2023). *Weather Spark*. Obtenido de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/m/22535/12/Tiempo-promedio-en-diciembre-en-Medell%C3%ADn-Colombia>
- Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión integral de los residuos sólidos urbanos*. España: Environmental science.
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective. *ANNUAL REVIEWS*, 277-309.
- Xavier Elías Castells, X. F. (2012). *Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos.
- Zhentong Li 1, H. L. (20 de Julio de 2013). *Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review*. Obtenido de pubmed: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23876506/>
- Zi Xiang Keng a, S. C.-T. (2020). *Journal of Cleaner Production*. china: ElSevier.