



Evaluación del proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora y su emisión de GEI, en cuatro zonas de vida ubicadas en el departamento de Antioquia en Colombia.

Juana Patricia Peñalosa Bernal

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

David Aguiar Gil, Magíster (MSc) en Ingeniería

Asesora

Laura Catalina Ossa Carrasquilla, Magíster (MSc) en Gestión Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Peñalosa Bernal, 2022)
Referencia	Peñalosa Bernal, J. P. (2022). <i>Evaluación del proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora y su emisión de GEI, en cuatro zonas de vida ubicadas en el departamento de Antioquia en Colombia</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>

Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental (G-LIMA)
Proyecto financiado por el fondo de apoyo de trabajos de grado del CODI.

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

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.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por iluminar y guiar cada uno de los pasos que he dado hasta el día de hoy.

Quiero agradecerle a la Universidad de Antioquia por haberse convertido en mi segunda casa, por los conocimientos brindados y por ampliar mi mente para comprender los diversos puntos de vista que nos ofrece el mundo.

Gracias a la Facultad de Ingeniería, al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) y al Grupo de investigación G-LIMA por el apoyo económico otorgado para la realización del trabajo de grado. Así mismo agradecerle a la Institución Educativa Arturo Velázquez, a la Secretaría de Medio Ambiente de Sabaneta y a la Corporación CORPODIL, por abrirle las puertas a los proyectos de investigación y permitirle a la academia avanzar en la adquisición de nuevos conocimientos.

A todos los docentes que hicieron parte de este proceso y forjaron gran parte de lo que hoy soy, los cuales, con su experiencia, pasión, conocimiento incentivaron mi crecimiento como profesional y a nivel personal. En especial a Laura Catalina Ossa Carrasquilla, quien en este último año me ha brindado orientación, conocimiento y mentoría en todo este proceso.

A mi esposo Daniel con quien tengo una gratitud infinita por haberme sacado de las crisis más fuertes que enfrente siendo un gran apoyo, un consejero y un hombre que tomo mis sueños como suyos.

A mi hijo Martín, un niño que se convirtió en la razón más fuerte para culminar este proceso y demostrarle a la sociedad que aun con bendiciones inesperadas es posible seguir cumpliendo sueños personales.

A mi madre, madrina y hermanos por siempre creer en que mí y en que lo podía lograr a pesar de las adversidades.

A mis amigos de la Universidad de Antioquia que se han convertido en mis hermanos de sangre y sin lugar a duda es de los mejores regalos que recibí en todo este proceso.

Finalmente, gracias a mí, por atreverme a soñar que era posible graduarme en una de las mejores universidades del país, por superar todos los obstáculos mentales y vivenciales que hace siete años he venido enfrentando para hoy poder decir, fui capaz y no me rendí.

Tabla de contenido

1. Resumen.....	9
2. Abstract	10
3. Introducción	11
4. Objetivos	13
4.1. Objetivo general	13
4.2. Objetivos específicos.....	13
5. Marco teórico	14
5.1. Pacas biodigestoras	14
5.2. Proceso de descomposición de la paca biodigestora.....	15
5.3. El abono generado en la paca biodigestora	16
5.4. Clasificación climática de Holdridge	19
5.5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	20
6. Metodología.....	22
6.1. Montaje de las pacas biodigestoras	23
6.2. Monitoreo de las variables fisicoquímicas	23
6.3. Evaluación de la calidad y madurez del abono obtenido	24
6.4. Estimación de la emisión de GEI	25
8. Resultados y análisis	27
8.1. Montaje de las pacas biodigestoras	27
8.1.1. Universidad de Antioquia (UdeA)	27
8.1.2. Institución Educativa Arturo Velázquez (IEAV).....	28
8.1.3. Corporación para el Desarrollo Integral Local (CORPODIL):.....	30
8.1.4. Reserva la Romera	32

8.2.	Monitoreo de las variables fisicoquímicas	35
8.2.1.	bh-PM.....	35
8.2.2.	bs-T.....	37
8.2.3.	bmh-PM.....	38
8.2.4.	bmh-MB	40
8.2.6.	Comparación de los parámetros entre zonas de vida	43
8.2.6.1.	Temperatura	43
8.2.6.2.	Humedad	45
8.2.6.3.	pH.....	46
8.2.6.4.	Altura de las pacas	48
8.3.	Evaluación de la calidad y madurez del abono obtenido	50
8.3.1.	Parámetros fisicoquímicos	50
8.3.2.	Análisis microbiológico del abono.....	54
8.3.3.	Análisis fitotóxico del abono.....	55
8.4.	Estimación de la emisión de GEI	56
9.	Conclusiones	58
10.	Recomendaciones.....	60
11.	Referencias bibliográficas	61

Lista de tablas

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del abono.....	17
Tabla 2 Parámetros microbiológicos	18
Tabla 3 Parámetros fitotóxicos.....	18
Tabla 4 Zonas de vida para el departamento de Antioquia	19
Tabla 5 Descripción de los instrumentos de medición.....	24
Tabla 6 Distribución de los residuos orgánicos por cada paca biodigestora.....	34
Tabla 7 Monitoreo de variables fisicoquímicas en bh- PM.....	35
Tabla 8 Monitoreo de variables fisicoquímicas en bs-T	37
Tabla 9 Monitoreo de variables fisicoquímicas en bmh- PM	38
Tabla 10 Monitoreo de variables fisicoquímicas en bmh- MB	40
Tabla 11 Coeficiente de variación para cada variable.....	42
Tabla 12 Validación de datos de temperatura estadísticamente.....	44
Tabla 13 Validación de datos de humedad estadísticamente	45
Tabla 14 Validación de datos de pH estadísticamente	47
Tabla 15 Validación de datos de altura de las pacas estadísticamente.....	49
Tabla 16 Parámetros fisicoquímicos en bh-PM	50
Tabla 17 Parámetros fisicoquímicos en bs-T	51
Tabla 18 Parámetros fisicoquímicos en bmh-PM	51
Tabla 19 Parámetros fisicoquímicos en bmh-MB	52
Tabla 20 Porcentaje de masa por zona de vida	53
Tabla 21 Microorganismos presentes en las muestras de abono.....	54
Tabla 22 Prueba de Índice de Germinación	55
Tabla 23 Prueba de actividad respirométrica	55

Lista de figuras

Figura 1 Metodología aplicada para el desarrollo de la investigación.....	22
Figura 2 Montaje de las pacas biodigestoras en la UdeA	28
Figura 3 Montaje de las pacas biodigestoras en IEAV	30
Figura 4 Montaje de las pacas biodigestoras en CORPODIL.....	32
Figura 5 Montaje de las pacas biodigestoras en la Romera	33
Figura 6 Variación de las temperaturas en las cuatro zonas de vidas	43
Figura 7 Variación de la humedad en las cuatro zonas de vida	45
Figura 8 Variaciones del pH en las cuatro zonas de vida	46
Figura 9 Variaciones de altura de las pacas en las cuatro zonas de vida	48
Figura 10 Emisión total de GEI por municipio.....	56
Figura 11 Emisión de metano y óxido nitroso evaluado en cada municipio	57
Figura 12 Reducción total de GEI por municipio	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
msnm	metros sobre el nivel del mar
RV	Residuo Vegetal
RD_{CR}	Residuo orgánico doméstico crudo
RD_{COC}	Residuo orgánico doméstico cocido
ROD	Residuo orgánico doméstico
FES	Fermentación en Estado Sólido
CV	Coefficiente de Variación
UdeA	Universidad de Antioquia
IEAV	Institución Educativa Arturo Velázquez
CORPODIL	Corporación para el Desarrollo Integral Local
T	Temperatura
TA	Temperatura ambiente
mm	Milímetros
°C	Grados centígrados
Kg	Kilogramos
Bh-PM	Bosque húmedo Premontano
Bs-T	Bosque seco Tropical
Bmh-PM	Bosque muy húmedo Premontano
Bmh-MB	Bosque muy húmedo Montano Bajo
GIEM	Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares

1. Resumen

Actualmente existen diversos sistemas de tratamiento de residuos orgánicos, entre los más conocidos están el compostaje, el vermicompostaje y la digestión anaeróbica, siendo el compostaje el más aplicado. Una de las formas de tratamiento que en las últimas dos décadas ha ganado aceptación y reconocimiento social y científico, es la paca biodigestora gracias a la naturaleza del método, su fácil operación y la calidad de su abono. Las investigaciones realizadas hasta la fecha son estudios exploratorios y descriptivos en donde se abordan temas relacionados con la variación de los parámetros fisicoquímicos, la calidad del abono obtenido, la efectividad del sistema para procesar los residuos generados en contextos urbanos y rurales. Sin embargo, debido a las escasas investigaciones, aún se desconoce si la zona de vida tiene incidencia en la descomposición de los residuos en la paca biodigestora y los impactos ambientales que ésta ocasiona. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora y su emisión de Gases de Efecto Invernadero, en cuatro zonas de vida ubicadas en el departamento de Antioquia, Colombia. Para esto, se instalaron sistemas de pacas en diferentes municipios de Antioquia, los cuales trataron en total cerca de 519 Kg de residuos orgánicos, produjeron 155.7 Kg de abono y emitieron 99.39 KgCO_{2eq}. Se concluyó que la zona de vida incide en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en la paca biodigestora, influenciando directamente los cambios en las variables de temperatura y altura.

Palabras clave: abono, descomposición de los residuos, emisión de Gases de Efecto Invernadero, pacas biodigestoras, residuos orgánicos, sistemas de tratamiento, zona de vida.

2. Abstract

Currently, there are several organic waste treatment systems, among the best known are composting, vermicomposting and anaerobic digestion, with composting being the most widely applied. One of the forms of treatment that in the last two decades has gained social and scientific acceptance and recognition is the biodigester bale, thanks to the nature of the method, its easy operation and the quality of its compost. The research carried out to date are exploratory and descriptive studies that address issues related to the variation of physicochemical parameters, the quality of the compost obtained, and the effectiveness of the system for processing waste generated in urban and rural contexts. However, due to the scarce research, it is still unknown if the life zone has an incidence on the decomposition of waste in the biodigester bale and the environmental impacts it causes. The objective of this research was to evaluate the process of transformation of organic waste through the biodigester bale and its Greenhouse Gas emissions in four life zones located in Antioquia, Colombia. For this purpose, bale systems were installed in different municipalities of Antioquia, which treated a total of about 519 Kg of organic waste, produced 155.7 Kg of compost and emitted 99.39 KgCO₂eq. It was concluded that the life zone affects the decomposition process of organic waste in the biodigester bale, directly influencing by changes in temperature and altitude variables.

Keywords: biodigester bale, compost, decomposition of waste, Greenhouse Gas emissions, life zone, organic waste, treatment systems.

3. Introducción

La alternativa de disposición de residuos sólidos más empleada actualmente en Colombia son los rellenos sanitarios. En donde, para el año 2020 se dispusieron alrededor de 11.21 millones de toneladas de residuos sólidos (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD], 2021, p.3). Durante la operación de los mismos, se ha identificado algunos aspectos ambientales que al no tratarse correctamente generan afectaciones al medio ambiente. Un primer aspecto es la generación de lixiviados los cuales contaminan los cuerpos de agua superficiales ubicados en el área de influencia y los suelos, aportándoles metales pesados, altas concentraciones de nitrógeno, coliformes totales, entre otros (Álvarez Hernández & Ramirez, 2019, p.38-40). Así mismo, con esta técnica se ocupan grandes terrenos que provocan un impacto visual y paisajístico, sin embargo, el problema mayor es que cada vez son menos los espacios idóneos disponibles para su construcción y en Colombia el 23.28% de los sitios autorizados¹ les queda una vida útil inferior a 3 años (SSPD, 2021, p.30). Por otro lado, la generación de material particulado y emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) afectan la calidad del aire a pequeña, mediana y gran escala (Álvarez Hernández & Ramirez, 2019, p.41). Adicionalmente, la generación de olores, proliferación de vectores son otras de las implicaciones que se tienen en este tipo de sistema de tratamiento (Vallejo Ocampo, 2016)

Como solución a las problemáticas mencionadas, hoy en día los departamentos del Huila, Meta y Antioquia le apuestan a la separación de los residuos en la fuente, con lo cual se busca disminuir el porcentaje de residuos que ingresa al relleno, así mismo prolongar su vida útil, reducir la generación de lixiviados y la emisión de GEI, dándoles un aprovechamiento y/o tratamiento a través de alternativas como compostaje y vermicompostaje desarrollado en plantas de tratamiento de residuos orgánicos (SSPD, 2021, p.35-40).

Ahora bien, según el Documento CONPES 3874, (2016), el 61% de los residuos sólidos generados corresponden a los residuos orgánicos y por ende es el tipo de residuo que más se dispone en los rellenos sanitarios (p.41). Por lo que se estima que cerca de siete millones de t/año correspondan a cantidades de residuos sólidos orgánicos. Dentro de los sistemas de tratamiento orgánico más conocidos en Colombia se tienen el compostaje, el vermicompostaje y la digestión anaeróbica. No obstante, el compostaje se ha instaurado como la técnica más implementada en el

¹ Los sitios autorizados identificados en el país corresponden a rellenos sanitarios y celdas de contingencia

país debido a los bajos costos de inversión y operación en comparación con las otras técnicas de tratamiento (Banco Mundial et al., 2021).

En Antioquia, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) le viene apostando al aprovechamiento de los residuos orgánicos a pequeña escala, inicialmente llevada a cabo en ambientes rurales y poco a poco se ha ido extendiendo a ambientes urbanos. Esta estrategia se ha mostrado viable por la facilidad operativa, ha logrado que los generadores separen sus residuos *in situ* y obtengan el abono para sus actividades de jardinería o agrícolas. Dentro de los métodos empleados se encuentran los compostadores compactos, vermicompostaje, compostaje en pilas, compostaje con compartimientos y la paca biodigestora, entre otras (Sepúlveda Villada & Alvarado Torres, 2013).

La paca biodigestora se viene evaluando y documentando hace dos décadas, tiempo en el cual ha ganado popularidad social e investigativa. Las publicaciones documentadas son en su mayoría estudios exploratorios y descriptivos en el que se profundizan conocimientos como el tratamiento de los residuos orgánicos, la variación de los parámetros fisicoquímicos durante el proceso de descomposición, la evaluación de la calidad del abono orgánico obtenido, la generación de experiencias de educación ambiental y los impactos socioambientales del método (Ossa-Carrasquilla et al., 2020). No obstante, debido a las escasas investigaciones, aún se desconoce si la zona de vida tiene incidencia en la descomposición de la paca biodigestora y los impactos ambientales que ésta ocasiona.

A razón de ello, el propósito del presente trabajo de investigación es evaluar el proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora en cuatro zonas de vida diferentes, ubicadas en el departamento de Antioquia, con el objetivo de conocer la incidencia de los factores ambientales en los parámetros fisicoquímicos, la calidad y madurez del abono obtenido y las emisiones de GEI emitidas. Para que finalmente, este estudio sirva como avance y aporte mayor evidencia sobre el análisis del tratamiento de los residuos orgánicos bajo esta alternativa.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar el proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora y su emisión de GEI, en cuatro zonas de vida ubicadas en el departamento de Antioquia en Colombia.

4.2. Objetivos específicos

- 4.2.1.** Comparar las variaciones de temperatura, pH, humedad y cambios de altura de la paca biodigestora durante la descomposición de los residuos orgánicos en las diferentes zonas de vida.
- 4.2.2.** Determinar la calidad y madurez del abono obtenido de las pacas en cada zona de vida a través de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos.
- 4.2.3.** Analizar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero obtenidas en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en la paca biodigestora.

5. Marco teórico

5.1. Pacas biodigestoras

La alternativa utilizada en este estudio es la Paca Biodigestora definida como una biotecnología que permite descomponer todo tipo de residuos orgánicos bajo condiciones anaeróbicas no estrictas, mediante la acción de microorganismos anaerobios facultativos y aerotolerantes, los cuales llevan a cabo su actividad biológica a través de la fermentación, específicamente fermentación de sustrato sólido (Ossa Carrasquilla, 2016). Dentro de sus principales características se encuentran que en un metro cúbico se pueden procesar cerca de 500 a 600 Kg de residuos orgánicos, no requiere infraestructura, opera a la intemperie, presenta ausencia de malos olores, elimina la proliferación de plagas e impide la generación de gases tóxicos (Ardila Delgado et al., 2015; Ossa Carrasquilla, 2016; Posada Marín, 2015).

Una de las mayores ventajas analizadas en las pacas es que permiten descomponer diferentes tipos de residuos orgánicos. Ardila Delgado et al. (2015) procesaron poda de jardín y estiércol; Ossa Carrasquilla (2016) utilizó residuos vegetales como hojarasca y poda, combinados con residuos orgánicos domésticos crudos (cáscaras de fruta y verduras); Pulgarín Muñoz & Wills Betancur (2019) aplicaron el sistema utilizando residuos orgánicos domésticos, residuos vegetales y lodos biológicos en diferentes proporciones; Cardona Sánchez (2018) y Quiceno Botero (2021) utilizaron hojarasca, borra de café y residuos orgánicos domésticos; Posada Marín (2015) empleó residuos orgánicos domésticos crudos, poda, hojarasca, aserrín, cascarilla de arroz, también agregó melaza, levadura de cerveza y bocashi para acelerar el proceso de descomposición; finalmente, Arteaga & Castaño (2015) utilizaron hojarasca, residuos domésticos crudos y cocidos.

Así mismo, diversos autores hacen alusión al tiempo de descomposición de los residuos orgánicos mediante la paca biodigestora. Algunos autores consideran que el tiempo requerido para obtener un sustrato maduro y estabilizado es de al menos seis meses para una paca de 1 m³ (Cardona Sánchez, 2018; Pulgarín Muñoz & Wills Betancur, 2019; Velázquez Cigarroa et al., 2017). Otros autores consideraron un tiempo mínimo de cuatro meses (Ardila Delgado et al., 2015) con un volumen inicial de 1 m³ y Posada Marín (2015) realizó el experimento para tres meses con pacas de 0.8 m³ de volumen.

Por otro lado, Arenas Osorno (2017) y Posada Marín (2015) compararon el sistema de la paca biodigestora con el compostaje² y encontraron proximidades en sus resultados, por ejemplo que durante el proceso de descomposición, la evolución de la temperatura y los cambios en el pH guardaban similitud; también que los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos obtenidos de las muestras de abono no diferían significativamente y las fases mesófilas, termófilas, de estabilización y maduración estaban presentes en ambos métodos, lo que conlleva a pensar que en los procesos mencionados se puedan considerar similares ambos sistemas.

5.2. Proceso de descomposición de la paca biodigestora

El proceso de descomposición de la materia orgánica a través de la paca biodigestora está determinado por los cambios y las variaciones de los parámetros temperatura, humedad, pH y altura de la paca, los cuales están directamente influenciados por la naturaleza del material, las condicionales ambientales externas y las particularidades del microclima (Ossa Carrasquilla, 2016).

La temperatura influye en la mineralización, en el tipo y en la velocidad de crecimiento de la población microbiana que crece en el interior del sistema (Sepúlveda Villada & Alvarado Torres, 2013). Existe un rango de temperaturas óptimas para el crecimiento y desarrollo de cierto tipo de microorganismos que, al cambiarles este rango, su actividad microbiana disminuye o entra en estado de latencia. Por otro lado, con respecto a la Fermentación en Estado Sólido (FES) es importante considerar que la generación de calor es directamente proporcional a la actividad metabólica que están desarrollando los organismos (Ballardo Matos, 2016). Según investigaciones previas se ha observado que dentro del proceso se presentan dos fases representativas asociadas a la temperatura; la primera de ellas es la fase mesófila ($T < 45^{\circ}\text{C}$), en la cual el sistema empieza a temperatura ambiente (TA), los organismos se empiezan a adaptar, a metabolizar los residuos y como consecuencia se genera un incremento en la temperatura; luego se presenta continua la fase termófila ($T > 45^{\circ}\text{C}$), donde se muestra una actividad microbiana intensa y exotérmica, lo que consecuentemente logra la eliminación de microorganismos patógenos para los seres humanos, animales y/o vegetales. Posteriormente, la actividad microbiana disminuye, así mismo la

² Definido como un proceso de descomposición aeróbica realizado por microorganismos, en el que, bajo condiciones de temperatura y humedad adecuadas, permite transformar la materia orgánica en un material homogéneo y asimilable por las plantas llamado compost (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2013)

temperatura alcanzando nuevamente una fase mesófila, hasta llegar a la TA (Cuadros, 2008; Marquez-Benavides, 2016).

Otro factor de gran relevancia es la humedad siendo un parámetro crucial en los procesos FES. El rango adecuado de humedad está en función de los requerimientos de los microorganismos, la naturaleza del sustrato y el tipo de producto final (Pastrana, 1996). Según Haug, citado por Ballardo Matos (2016) se recomienda un rango de humedad entre 40-60% para una matriz orgánica a fermentar. Si la humedad desciende por debajo del 40%, la actividad microbiana se expone a una mala difusión de los nutrientes por lo cual se inhibirá el crecimiento microbiano, la degradación será más lenta y los microorganismos pueden presentar estrés hídrico, de forma contraria, si se excede el 65% de humedad, se saturan los poros presentes en el sustrato impidiendo la circulación de aire en la matriz, por lo tanto se disminuye la disponibilidad de oxígeno y se aumenta el riesgo de contaminación bacteriana (Ballardo Matos, 2016; Pastrana, 1996).

El tercer factor decisivo es el pH, el cual suele ser muy variado dependiendo de la actividad microbiana presente en el sustrato y así mismo este condiciona el crecimiento de ciertos microorganismos descomponedores por ejemplo, algunas bacterias suelen desarrollarse en un rango entre 6.0 - 7.5, mientras que los hongos prefieren ambientes entre 5.5 - 8.0 (Cuadros, 2008). Durante la descomposición de los residuos orgánicos, el pH inicial suele alcanzar valores ácidos ($4.5 < \text{pH} < 5.5$), luego a medida que disminuye el metabolismo microbiano puede registrar un pH básico ($8 < \text{pH} < 9$) y al finalizar el proceso alcanzar la neutralidad (Bueno Márquez et al., 2005; Salazar, 2014).

El último factor es la altura de la paca biodigestora en donde según el estudio de Ossa Carrasquilla (2016) es un indicativo visual que permite constatar que la paca se está descomponiendo gradualmente con el paso del tiempo. Normalmente, cuando la paca alcanza la mitad o un poco menos de su altura inicial y se tienen condiciones óptimas de humedad, se podría tener un primer acercamiento con el abono en donde al retirar los primeros centímetros de la capa superior se observará un color marrón, con una textura y olor parecido a la tierra de capote de los bosques, lo que indica que el material cumple con las condiciones mínimas visibles para ser aprovechado.

5.3. El abono generado en la paca biodigestora

El abono es definido como el producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos ya sea de origen animal, vegetal, residuos orgánicos separados en la fuente o de una

mezcla entre ellos (Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167, 2022). La NTC 5167/2022 establece los requisitos que deben cumplir los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del abono para que este pueda ser aplicado en los suelos, como se muestra en la Los análisis fisicoquímicos brindan características y propiedades físicas y químicas presentes en el abono, las cuales son muy útiles para establecer la disponibilidad de nutrientes, los elementos químicos presentes y la granulometría del material. En la Tabla 1 se mencionan los parámetros que por normativa se deben realizar en este análisis.

Tabla 1 y Tabla 2.

Los análisis fisicoquímicos brindan características y propiedades físicas y químicas presentes en el abono, las cuales son muy útiles para establecer la disponibilidad de nutrientes, los elementos químicos presentes y la granulometría del material. En la Tabla 1 se mencionan los parámetros que por normativa se deben realizar en este análisis.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos del abono

Parámetro	Unidad	Valor óptimo
<i>Cenizas</i>	%	Máximo 60%
<i>CIC</i>	meq/100g	Mínimo 30 meq/100g
<i>CIC/CO</i>	meq/100g CO	No definido
<i>Carbono orgánico oxidable total</i>	%	Mínimo 15%
<i>Conductividad eléctrica (1/200)</i>	dS/m	Menor a 3
<i>CRA</i>	%	Mínimo 100%
<i>Densidad (20 C)</i>	g/cm ³	Máximo 0,6 g/cm ³
<i>Fosforo total</i>	%	No definido
<i>Humedad</i>	%	Máximo 25%
<i>Nitrógeno orgánico total</i>	%	Mínimo 1%
<i>pH (10%)</i>	-	Mínimo 4 - Máximo 9
<i>Relación (C/N)</i>	-	Máximo 25
<i>Características organolépticas</i>	-	Reportar
<i>Granulometría del material</i>	-	Reportar

Con el análisis microbiológico se determina la calidad sanitaria de un material y su aptitud para distintos usos. Estos reportan la estimación de microorganismos (mesófilos, termófilos, mohos, levaduras, enterobacterias y salmonellas) mediante aislamientos microbiológicos y conteos de las unidades formadoras de colonias (UFC) (Corlay Chee et al., 2011).

Tabla 2

Parámetros microbiológicos

Parámetro	Unidad	Valor óptimo
Salmonella ssp	g	Ausente en 25g
Coliformes totales	NMP	Menor 1000
Coliformes fecales	-	Ausente
E Coli	-	Ausente
Huevos de Helmineto viables	-	Menos a 1 en 4g
Mesófilos	UFC/g	Reportar el recuento de microorganismos en el análisis microbiológico
Termófilos	UFC/g	
Mohos	UFC/g	
Levaduras	UFC/g	
Enterobacterias	UFC/g	

Los análisis fitotóxicos buscan determinar la estabilidad y madurez del abono antes de utilizarse en los suelos, con el objetivo de analizar si éste afecta o favorece el desarrollo de las plantas ante la presencia de componentes fitotóxicos (Ossa Carrasquilla, 2016). El término madurez hace alusión al grado de descomposición de sustancias fitotóxicas y la estabilidad se refiere al grado de descomposición de la materia orgánica (Paradelo et al., 2010). Los efectos fitotóxicos en un material orgánico inmaduro se deben a diferentes factores, entre los cuales destacan la presencia de ácidos volátiles orgánicos, de amonio, de sales y de metales pesados (Varnero M et al., 2007). Diversos autores utilizan la prueba del índice de germinación y de la actividad respirométrica para determinar el análisis fitotóxico.

Tabla 3

Parámetros fitotóxicos del abono

Parámetro	Unidad	Clasificación
Índice de germinación (IG) ^a	%	IG>80 Ausencia de sustancias fitotóxicas
		80<IG<50 Presencia moderada de sustancias fitotóxicas
		IG<50 Fuerte presencia de sustancias fitotóxicas
Actividad respirométrica ^b	mgCO ₂ /g	Menor a 8 son valores óptimos

Nota. ^a Clasificación obtenida de Zucconi, citado por Urriola et al. (2021); ^b Información tomada de Varnero M et al. (2007)

5.4. Clasificación climática de Holdridge

La zona de vida es definida como un conjunto de asociaciones, relacionadas entre sí con respecto a los valores promedios de biotemperatura (T), precipitación (P) y humedad (Holdridge, 1978). Según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge para Antioquia se establecen las mostradas en Tabla 4.

Tabla 4 Zonas de vida para el departamento de Antioquia

Pisos altitudinales	Altitud (msnm)	T (°C)	P (mm)	Zona de vida
Tropical	0-1000	> 24	1000-2000	Bosque Seco Tropical (bs-T)
Tropical	0-1000	> 24	2000-4000	Bosque Húmedo Tropical (bh-T)
Tropical	0-1000	> 24	4000-8000	Bosque muy Húmedo Tropical (bmh-T)
Tropical	0-1000	> 24	>8000	Bosque pluvial tropical (bp-T)
Premontano	1000-2000	18-24	1000-2000	Bosque Húmedo Premontano (bh-PM)
Premontano	1000-2000	18-24	2000-4000	Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-PM)
Premontano	1000-2000	18-24	>4000	Bosque Pluvial Premontano (bp-PM)
Montano Bajo	2000-3000	12-18	1000-2000	Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB)
Montano Bajo	2000-3000	12-18	2000-4000	Bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB)
Montano Bajo	2000-3000	12-18	>4000	Bosque Pluvial Montano Bajo (bp-MB)

Nota. Información consolidada de CORANTIOQUIA (2005)

Dada la naturaleza del método de la paca biodigestora y teniendo en cuenta que con este sistema se lleve a cabo un proceso basado en la metodología de biomímesis, ya que se emula la actividad que hace el bosque de forma natural al descomponer sus residuos (Silva Pérez, 2018), es importante mencionar que en los bosques la descomposición de la materia orgánica es un proceso que relaciona la dinámica del suelo con la dinámica de la vegetación en donde intervienen factores bióticos y abióticos. La temperatura y la humedad son los dos factores abióticos más importantes que controlan la tasa de descomposición bajo condiciones naturales (Arguello Arias, 1991). Olson citado por Arguello Arias (1991) menciona que a temperaturas bajas se tiende a retardar la actividad biológica por lo que se obtienen bajas tasas de descomposición.

Dado que en el presente estudio, se busca evaluar la incidencia de los factores ambientales en cada zona de vida, se debe tener en cuenta que para los meses en los que se realizó la investigación, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se viene presentando el

fenómeno del El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)³ con el episodio de La Niña desde septiembre del año 2020 hasta la fecha (OMM, 2022). En Colombia, este episodio se caracteriza por una disminución en las temperaturas y el aumento en las precipitaciones en las regiones pacífica, Caribe y Andina (IDEAM, s.f.).

5.5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

En la última década, la estimación de la emisión de GEI en el compostaje ha sido estudiada por diversos autores aplicando diferentes metodologías; una de las más reconocidas y aceptadas a nivel mundial es la del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Según sus directrices, los GEI que intervienen en el proceso de descomposición son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Con respecto al CO₂, existe una producción natural debida a los procesos biológicos, la cual se considera de origen biogénico; realizados por los animales y las plantas, como la respiración o descomposición, lo que hace que la emisión de este gas se considere de origen biogénico; el CH₄ estimado que se libera hacia la atmósfera varía entre menos del uno por ciento del contenido de carbono inicial del material, por último, las emisiones de N₂O ocurren en menor concentración, esta varía desde menos del .5% hasta un 5% del contenido inicial de nitrógeno del material (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2006). Autores como Otoma & Diaz (2017) y Qdais et al. (2019) han empleado esta metodología, ellos estimaron para el proceso de ciclo de vida⁴ una emisión de 0.39 tCO_{2eq}/t_R⁵ y 0.332 tCO_{2eq}/t_R, respectivamente. Así mismo, Yeo et al. (2020) y Yedla & Sindhu, (2016) calcularon solo para el proceso de tratamiento biológico por compostaje, una emisión de 0.116 tCO_{2eq}/t_{RO}⁶ de residuo orgánico y 1.1 tCO₂/t_R, respectivamente.

Otros autores como McDougall et al. (2001), Thanh et al. (2015) y Yeo et al. (2019) recomiendan utilizar el abono obtenido en el proceso de compostaje como fertilizante para el suelo con el fin de disminuir la emisión de GEI ocasionada por la producción de fertilizantes químicos. Yeo et al. (2019) afirman que una tonelada de compost puede sustituir 37 Kg de urea; McDougall et al. (2001) aseguran que el abono aporta 7.1 Kg de nitrógeno (N), 4.1 Kg de fósforo (P₂O₅), 5.4

³ “Es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera. Este fenómeno tiene una gran influencia en las condiciones climáticas de diversas partes del mundo y comprende tres fases: El Niño, La Niña y una fase neutra” (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2014).

⁴ Incluye todos o algunos procesos como recolección y transporte, operación y/o tratamiento biológico.

⁵ tCO_{2eq}/t_R: tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de residuo.

⁶ tCO_{2eq}/t_{RO}: tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de residuo orgánico.

Kg de potasio (K_2O) por tonelada de abono húmedo y Thanh et al. (2015) utilizando la metodología de la calculadora de GEI del Instituto Global de Estrategias Ambientales (IGES) concluyeron que el compostaje podría aumentar significativamente la cantidad de producción de fertilizantes orgánicos y reducir las emisiones de GEI en comparación con el relleno sanitario.

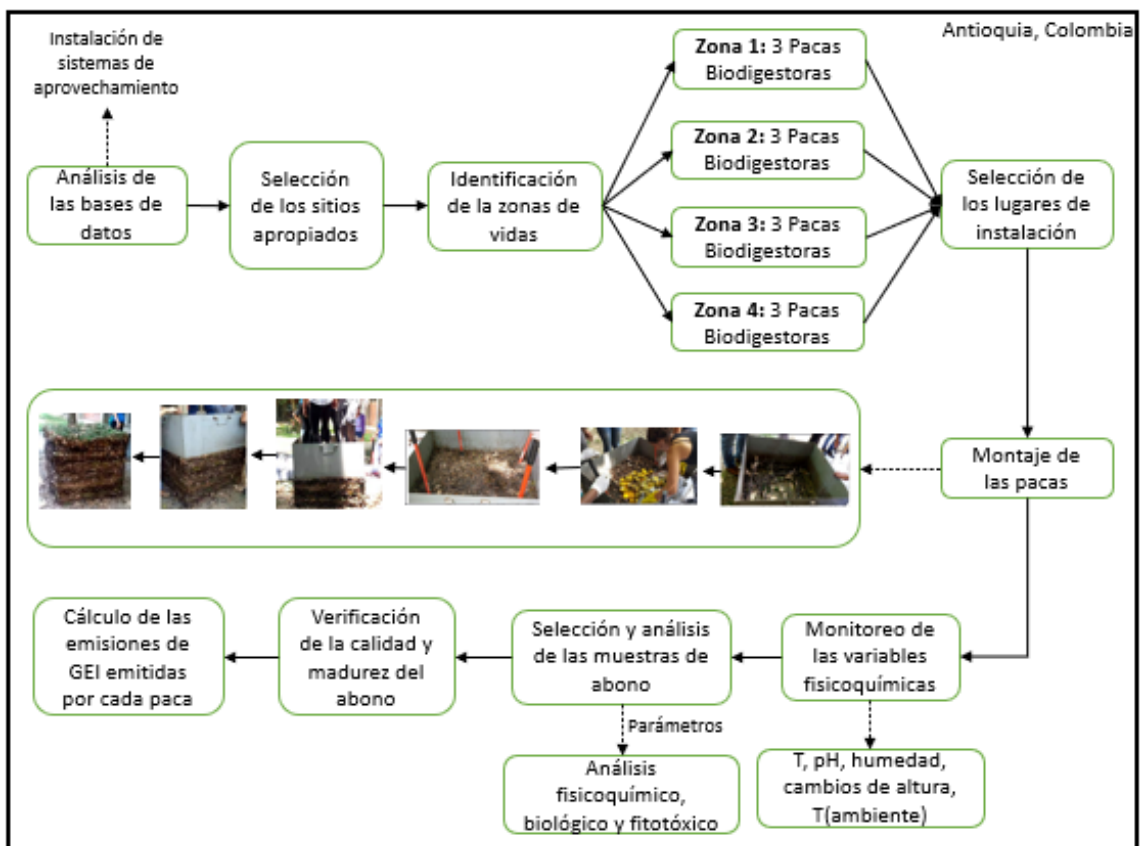
Con respecto a las investigaciones sobre la emisión de GEI en la paca biodigestora aún son incipientes y no se cuenta con un método matemático y/o experimental que analice las emisiones de GEI en el sistema. No obstante autores como Rivera Espinosa & Ossa Carrasquilla (2017) y Silva Pérez (2018) consideran que este método no produce gases contaminantes debido a que su proceso de descomposición es por fermentación alcohólica; así mismo Arteaga & Castaño (2015) en su análisis experimental *in situ*, no evidenciaron la presencia de metano con el sistema de medición utilizado y Arenas Osorno (2017) y Posada Marín (2015) aunque no evaluaron la generación de gases, compararon el sistema de la paca biodigestora con el del compostaje y encontraron proximidades en sus resultados por lo que debido a las escasas investigaciones se asumirá que la emisión de GEI en la paca biodigestora es igual que para el sistema de compostaje.

6. Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó un estudio descriptivo como se muestra en la Figura 1, primero, se hizo un análisis de la base de datos suministrada por la Universidad de Antioquia, la cual desarrolló entre el año 2021 y 2022 un Convenio Interadministrativo con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) en donde se instalaron en los diez municipios de la Región Metropolitana y el triángulo turístico de occidente, 185 sistemas de tratamiento de residuos orgánicos. Con esta información se seleccionaron cuatro sitios en los que se garantizará que el montaje de las pacas biodigestoras fuera funcional, contando con la disponibilidad de residuos orgánicos para su tratamiento y así mismo que tres de ellos estuvieran ubicados en zonas de vida diferente a bosque húmedo Premontano (bh-PM). Luego se identificaron las características de cada zona de vida seleccionada y se instalaron dos o tres pacas biodigestoras en cada sitio.

Figura 1

Metodología aplicada para el desarrollo de la investigación



Nota. Fotografías tomadas de (Ossa Carrasquilla, 2016).

6.1. Montaje de las pacas biodigestoras

La investigación aplicó un diseño experimental de efectos fijos, en donde el principal factor de cambio fue la zona de vida, la unidad experimental fue la paca biodigestora y se realizó en lo posible tres repeticiones para garantizar la viabilidad estadística. Cada paca tuvo un volumen inicial de .125 metros cúbicos aproximadamente y para su ensamble se utilizó un molde de madera plástica con amarres metálicos. El montaje experimental de las pacas biodigestoras se realizó siguiendo la metodología aplicada por Ossa Carrasquilla (2016) la cual constó de ocho pasos en los que se van asentando capas de residuo vegetal y de Residuos Orgánicos Domésticos (ROD), hasta alcanzar la capacidad máxima de la formaleta. Estos ocho pasos se mencionan a continuación:

Paso 1: Homogenización de los residuos, en este paso se mezclan todos los residuos orgánicos de manera que su distribución sea lo más homogénea y uniforme posible.

Paso 2: Instalación de la formaleta y base de RV, se ubica la formaleta en un lugar plano y de suelo blando, dentro de ella se coloca la primera capa de residuo vegetal llamada capa base.

Paso 3: Capa de RV – Nido (se repite tres veces), se vierte otra capa de residuo vegetal que servirá de nido para albergar posteriormente los residuos orgánicos.

Paso 4: Capa de ROD (se repite tres veces), se introduce una capa de residuos orgánicos en el centro de la formaleta de manera que no toque los bordes hasta la capacidad máxima que pueda contener el nido.

Paso 5: Cubrimiento (se repite tres veces), se esparce nuevamente hojarasca para cubrir los ROD.

Paso 6: Asentamiento (se realiza en medio de cada paso después del segundo), en este paso se asienta todo el material capa tras capa con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de oxígeno presente.

Paso 7: Capa RV final, este paso sirve para separar la última capa de ROD del medio externo.

Paso 8: Retiro de la formaleta




6.2. Monitoreo de las variables fisicoquímicas

Se hizo el monitoreo de las variables fisicoquímicas (pH, temperatura, humedad y altura de la paca) siguiendo la metodología utilizada Ossa Carrasquilla (2016) distribuidas en 10 visitas cada 14 días, para un tiempo total de 127 días en cada zona de vida, es importante tener en cuenta que la visita 1 hace alusión al día en que se realizó el montaje en cada sistema. Se realizaron las

mediciones *in situ* y el dato de la temperatura, pH y porcentaje de humedad de cada sistema de tratamiento se tomó en el centro de la cara superior y a 1/2 de la altura de la paca. Las variaciones en la altura de la paca se midieron desde el suelo hasta la superficie de la paca en cada cara lateral. También se registró el dato de la temperatura ambiente. Para la realización de estas actividades se utilizaron instrumentos de medición mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5

Descripción de los instrumentos de medición

Instrumento de Medición	Evidencia fotográfica	Descripción
<i>Multiparamétrico digital</i>		Con este instrumento se realizó la medición de la temperatura y pH a 20 cm de profundidad, la cual es la capacidad máxima de la sonda. El instrumento, reporta un rango de pH entre 3.5 y 9 medidos; para la temperatura puede realizar la medición en grados Celsius o grados Fahrenheit en un rango de -9°C a 50°C.
<i>Medidor de humedad de abono Reotemp</i>		Con esta herramienta se realizó la medición de humedad a 20 cm de profundidad, tiene una sonda de 70 cm y reporta los valores en un rango de 0 a 10 siendo 0 seco y 10 saturado
<i>Flexómetro</i>		Con este instrumento se realizó la medición de la altura de la paca medida en centímetros (cm), posee un error de +/- 0.5 mm.

6.3. Evaluación de la calidad y madurez del abono obtenido

Luego de los 127 días del proceso de descomposición, se tomó una muestra compuesta por cada zona de vida, las cuales se llevaron al laboratorio para realizar un análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico en donde se determinó su calidad y madurez, siguiendo los estándares del Laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares – GIEM y la NTC 5167/2022.

6.4. Estimación de la emisión de GEI

La evaluación y cuantificación de las emisiones de GEI se efectuó siguiendo la metodología dada por el IPCC para los inventarios nacionales de emisión de GEI del año 2006. Para realizar la estimación de la emisión de CH₄ y N₂O se definió el tipo de sistema de tratamiento, la masa de residuo orgánico a tratar y los factores de emisión para cada gas.

Para calcular la emisión y reducción de GEI en la paca biodigestora se asumió que este sistema procesa los residuos de forma similar al sistema de compostaje, razón por la cual se calculó utilizando la Ecuación 1:

$$\begin{aligned}
 & \text{Emisión GEI} = \\
 & M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{CH}_4} \times PCG_{\text{CH}_4} \times \frac{1}{1000} + M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times PCG_{\text{N}_2\text{O}} \times \frac{1}{1000}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En donde,

Emisión GEI: Emisión total del sistema, KgCO_{2eq}

M_{aprov}: Masa de residuo que se va a aprovechar, Kg

FE_{CH4}: Factor de emisión para el metano, 4 gCH₄/Kg de residuo orgánico en base húmeda.

PCG_{CH4}: Potencial de calentamiento global para el metano, 28

FE_{N2O}: Factor de emisión para el óxido nitroso, 0.3g N₂O /Kg de residuo orgánico en base húmeda.

PCG_{N2O}: Potencial de calentamiento global para el óxido nitroso, 265

Dado que no se tienen los factores de emisión propios para Colombia, se tomaron los valores por defecto de las directrices del IPCC (2006). Estos factores asumen que los residuos tratados tienen entre un 25% a 50% de carbono orgánico degradable (COD), un 2% de nitrógeno (materia seca) y un contenido de humedad de aproximadamente el 60% (IPCC, 2006). Para los valores del potencial de calentamiento global se establecieron como referencia los del quinto informe de evaluación del IPCC: cambio climático 2013 (AR5), siendo este el último informe vigente a la fecha.

Para calcular la reducción total de GEI debido al uso del abono en actividades agrícolas o de jardinería reemplazando la aplicación de los fertilizantes químicos, se empleó la metodología tomada de la calculadora de GEI del IGES del año 2013. La cual se calcula teniendo en cuenta la producción de abono, el porcentaje que se utiliza con objetivos agrícolas o de jardinería y la masa de residuos que se van a compostar, tal como se muestra en la Ecuación 2:

$$\text{Reducción GEI} = \left(\text{Prod abono} \times \frac{\text{Abono}_{FA}}{100} \right) \times \left(E_{CO_2} + (E_{CH_4} \times PCG_{CH_4}) + (E_{N_2O} \times PCG_{N_2O}) \right) \quad (2)$$

En donde,

Reducción GEI: Reducción de GEI debido al uso de fertilizantes químicos evitados, KgCO_{2eq}

Prod abono: Cantidad total de producción de abono, Kg

Abono_{FA}: Abono utilizado para fines agrícolas o de jardinería, %

E_{CO2}: CO₂ evitado, 0.0213 KgCO₂/Kg de abono

E_{CH4}: CH₄ evitado, 0.00000338 KgCH₄/Kg de abono

E_{N2O}: N₂O evitado, 0.0000685 KgN₂O/Kg de abono

Debido a que en Colombia no se tienen establecidos valores de emisión E_{CO2}, E_{CH4}, E_{N2O} se utilizaron los datos estándares internacionales de países de Norte América y Europa. Estos valores suponen que la masa de los residuos orgánicos de entrada al sistema tiene una humedad del 50% y se aclara que las emisiones corresponden tanto a las de producción como a las del consumo de energía durante el proceso de fabricación (McDougall et al., 2001).

8. Resultados y análisis

8.1. Montaje de las pacas biodigestoras

Después de analizar las bases de datos se seleccionaron cuatro lugares de instalación en diferentes municipios del departamento de Antioquia que cumplieran con las siguientes características: que generaran o estuvieran cerca de generadores de residuos orgánicos domésticos y vegetales; en donde se contara con un espacio disponible para realizar la instalación, con suelo blando y plano, a la intemperie y que tuvieran facilidad de acceso vehicular. Los sitios seleccionados se mencionan a continuación:

8.1.1. Universidad de Antioquia (UdeA)

La Universidad de Antioquia está ubicada en la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia, se localiza entre el paralelo 6°16' 3.07" de latitud Norte y el meridiano 75°34' 8.41" de longitud Oeste de Greenwich, tiene 1456 msnm, posee una temperatura y precipitación promedio anual de 21.5°C y 1685 mm respectivamente, lo que según la Tabla 4 pertenece a una zona de vida de bosque húmedo Premontano (bh-PM).

Para el montaje en la UdeA, se recogieron 96 Kg de residuos orgánicos los cuales se distribuyeron entre 70 Kg de ROD y 26 Kg de residuos vegetales. Los ROD se obtuvieron de cuatro restaurantes de la universidad y del Centro Comercial Bosque Plaza entre los que se encontraban residuos domésticos crudos (RD_{CR}) como cáscara de papa, plátano, frijol, residuos de frutas (fresa, piña, maracuyá, naranja), lechuga, tomate, entre otros y residuos domésticos cocidos (RD_{COC}) como desechos de arroz, sopa y huesos de pollo principalmente. El residuo vegetal correspondió a la hojarasca la cual se recogió de las zonas verdes de la universidad y se encontraba parcialmente seca.

Se armaron dos pacas biodigestoras el 30 de enero del 2022 como se evidencia en la Figura 2. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repitieron 3 veces vertiendo las cantidades mostradas en la Tabla 6, este proceso se realizó con la colaboración de los compañeros contratistas del Convenio Interadministrativo de la UdeA, AMVA y CORANTIOQUIA. La relación de los residuos fue de 3:1 aproximadamente, por cada 3 Kg de RD_{CR} y RD_{COC} se usó 1 Kg de hojarasca.

Figura 2

Montaje de las pacas biodigestoras en la UdeA



Nota. El proceso de construcción de la paca se encuentra detallado en el ítem 6.1

8.1.2. Institución Educativa Arturo Velázquez (IEAV)

La Institución Educativa Arturo Velázquez (IEAV) se encuentra ubicada en el municipio de Santa Fe de Antioquia se localiza entre el paralelo 6°33'03" de latitud Norte y el meridiano 1°44'43" de longitud Oeste de Greenwich, está a 550 msnm, con una temperatura y precipitación

promedio anual de 27°C y 1002 mm respectivamente, lo que según la Tabla 4 pertenece a una zona de vida de bosque seco Tropical (bs-T).

Para el montaje, se dispusieron en total 135 Kg de residuos orgánicos de los cuales 90 Kg correspondieron a RD_{CR} recolectados de las diferentes verdulerías cercanas, entre los residuos se observaba la presencia de yuca, papa, zanahoria, lechuga, cebolla, frijol, plátanos, guayaba, piña, banano tomate, repollo, cáscara de huevo, de frijol, de banano, entre otros. También se dispuso de 45 Kg de RV correspondiente a hojarasca compuesta de hojas grandes y secas, el cual es un residuo producido en la misma institución. La relación de los residuos fue de 2:1, es decir por cada 2 Kg de RD_{CR} se utilizó 1 Kg de hojarasca.

Se armaron tres pacas biodigestoras el 2 de marzo del 2022 con el paso a paso que se evidencia en la Figura 3. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repitieron 3 veces vertiendo las cantidades mostradas en la Tabla 6, este proceso se realizó con la ayuda de los estudiantes de la institución.

Figura 3

Montaje de las pacas biodigestoras en IEAV



Nota. El proceso de construcción de la paca se encuentra detallado en el ítem 6.1

8.1.3. Corporación para el Desarrollo Integral Local (CORPODIL):

La Corporación para el Desarrollo Integral Local (CORPODIL) se encuentra ubicada en el municipio de Caldas se localiza entre el paralelo 6°05'19" de latitud Norte y el meridiano 75°38'10" de longitud Oeste de Greenwich, está a 1750 msnm, con una temperatura y precipitación promedio

anual de 19°C y 2523 mm respectivamente, lo que según la Tabla 4 pertenece a una zona de vida de bosque muy húmedo Premontano (bmh-PM).

Para el montaje, se dispusieron en total 168 Kg de residuos orgánicos de los cuales 90 Kg correspondieron a RD_{CR} recolectados de las diferentes verdulerías cercanas, entre los residuos se observaba la presencia de lechuga, cascara de piña, maracuyá, banano, limón, plátano, naranja, de zanahoria, coliflor, de mango, ají y cascara de frijol. También se dispuso de 78 Kg de RV correspondiente a poda seca este residuo se obtiene como producto de las actividades de corte de césped dentro de la corporación. La relación de los residuos fue de 1.15:1 aproximadamente, lo que significa que por cada 1.15 Kg de RD_{CR} se usó 1 Kg de poda

Se construyeron tres pacas biodigestoras el 5 de marzo del 2022 con el paso a paso que se evidencia en la Figura 4. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repitieron 3 veces vertiendo las cantidades mostradas en la Tabla 6, este proceso se realizó con la ayuda de mujeres cabeza de familia.

Figura 4

Montaje de las pacas biodigestoras en CORPODIL



Nota. El proceso de construcción de la paca se encuentra detallado en el ítem 6.1

8.1.4. Reserva la Romera

La Reserva la Romera se encuentra ubicada en el municipio de Sabáneta se localiza entre el paralelo 6°07'.472" de latitud Norte y el meridiano 75°35'.019" de longitud Oeste de Greenwich, está a 2450 msnm, con una temperatura y precipitación promedio anual de 13.96°C y 2434 mm

respectivamente, lo que según la Tabla 4 pertenece a una zona de vida de bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB).

Para el montaje, se dispusieron en total 120 Kg de residuos orgánicos en total de los cuales 60 Kg correspondieron a RD_{CR} que se adquirieron de un restaurante cercano en donde se observaba la presencia de lechuga, cascara de piña, banano, plátano, naranja, cascara de frijol, repollo, ahuyama y papa, así mismo se recolectaron 60 Kg de hojarasca la cual se recogió de la misma reserva y se encontraba húmeda. La relación de los residuos fue de 1:1 respectivamente.

Se realizó el montaje de dos pacas biodigestoras el 10 de marzo del 2022 con el paso a paso que se evidencia en la Figura 5. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repitieron 3 veces vertiendo las cantidades mostradas en la Tabla 6 este proceso se realizó con la colaboración de los guardabosques del lugar.

Figura 5

Montaje de las pacas biodigestoras en la Romera





Nota. El proceso de construcción de la paca se encuentra detallado en el ítem 6.1

Tabla 6

Distribución de los residuos orgánicos por cada paca biodigestora

Distribución de los residuos orgánicos por paca

Lugar	UdeA	IEAV	CORPODIL	La Romera
Ciudad	Medellín	Santa Fe de Antioquia	Caldas	Sabaneta
No de pacas	2	3	3	2
Pasos/Unidades	Kg	Kg	Kg	Kg
2: base	4	4	4	4
3: capa de RV	1	2	4	4
4: capa de ROD	20	10	10	10
5: cubrimiento RV	1	1	2	2
3: capa de RV	1	2	4	6
4: capa de ROD	10	10	10	10
5: cubrimiento RV	1	1	2	2
3: capa de RV	1	2	4	6
4: capa de ROD	5	10	10	10
5: cubrimiento RV	1	1	2	2
7: capa RV final	3	2	4	4
Total RV	13	15	26	30
Total ROD	35	30	30	30

En todos los sistemas se trataron en total 519 Kg de residuos orgánicos de los cuales 310 Kg correspondieron a residuos orgánicos domésticos crudos y cocidos y 209 Kg de hojarasca y poda. Como se observó en los diferentes municipios, a pesar de que el volumen máximo fue el mismo para cada paca, la cantidad total de residuos dispuestos varió en cada una de ellas. Esto se debió según lo observado al tamaño y a la humedad de los residuos. Es decir, cuando los RD_{CR} y/o

RD_{COC} eran de mayor tamaño, se requería más hojarasca, y la paca alcanzaba su capacidad máxima más rápido mientras que si los residuos eran pequeños y la hojarasca estaba húmeda el sistema era capaz de tratar mayor cantidad de residuos.

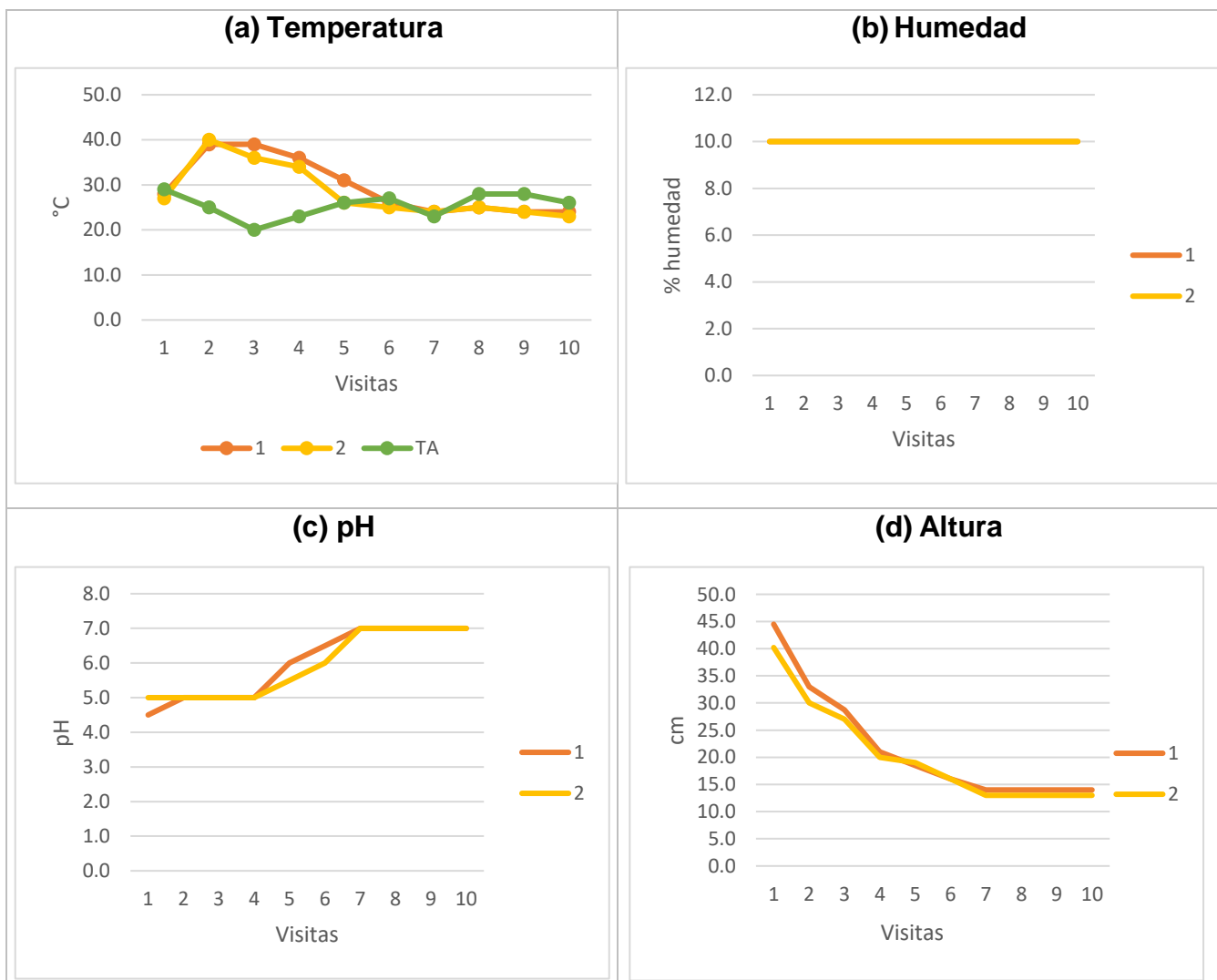
8.2. Monitoreo de las variables fisicoquímicas

A continuación, se presenta una descripción del comportamiento del pH, temperatura, humedad y altura de la paca por cada zona de vida. Para facilitar la comprensión del análisis, los datos mencionados tendrán un orden ascendente, es decir, siempre se hablará primero de la paca 1, seguida de la paca 2 y en donde aplique se finalizará con los datos de la paca 3.

8.2.1. bh-PM

Tabla 7

Monitoreo de variables fisicoquímicas en bh- PM



En la zona de vida bh-PM se observó que la temperatura de las pacas en la visita 1 estuvieron cercanas a la TA (29°C), luego durante los primeros 14 días, la temperatura empezó a incrementar alcanzando valores de 40°C y 39°C para cada paca, lo que muestra que en los días de monitoreo no se registraron temperaturas características de la fase termófila, luego la Paca 1 mantuvo esta temperatura y la Paca 2 descendió hasta los 36°C en la visita 3, este comportamiento se aprecia de manera clara en la figura de la Tabla 7(a). A partir de la visita 2 la temperatura en ambas pacas empezó a descender paulatinamente en donde llegando a la visita 5, Paca 1 tiene una temperatura de 31°C y dista de Paca 2 (26°C) en 5°C. En la visita 6, las pacas se aproximaron a la TA y a partir de la visita 7, la temperatura de ambas pacas se mantuvo en un rango entre $23 < T < 25$ por debajo de la TA.

En la figura de la Tabla 7(b) se puede observar que la humedad estuvo constante durante las 10 visitas conservando siempre un estado de saturación, esto ocurrió debido a las precipitaciones recurrentes en la ciudad de Medellín ya que las pacas se encontraban a la intemperie.

Con respecto a la variación del pH, inicialmente las pacas registraron un pH ácido (4.5 y 5.0) y se mantuvieron en un valor de 5.0 hasta la visita 4, con lo cual se puede decir que esto se debió al tipo de residuo que se está tratando, después de la visita 5 el pH empezó a incrementar hasta llegar a 7.0 en la visita 7, valor en el cual se mantuvo hasta el final.

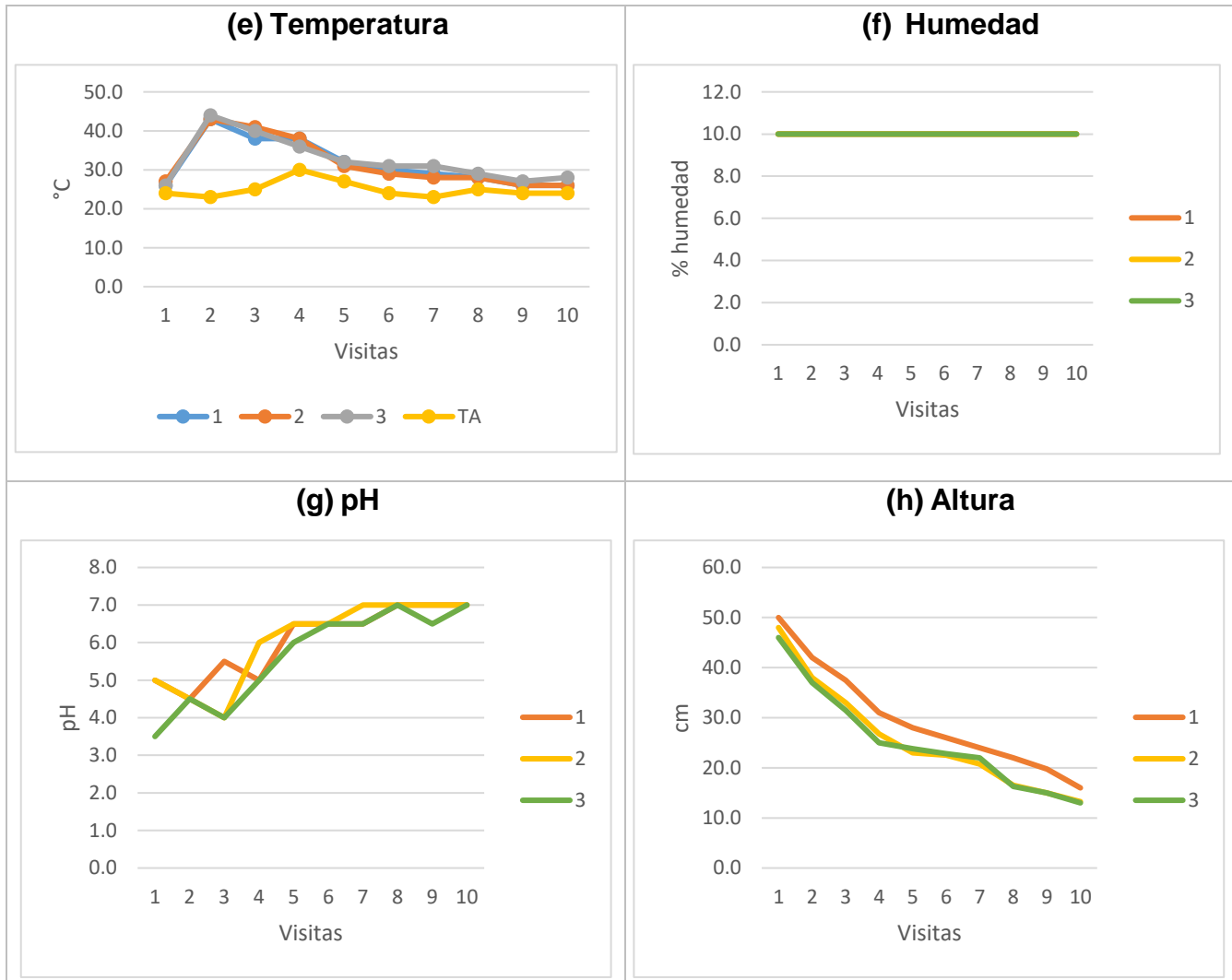
En la visita 1, la altura de las pacas fue de 44 y 40 cm respectivamente, luego tuvieron una disminución acelerada de 11 y 10 cm respectivamente según los valores registrados en la visita 2. Después de la visita 2, las pacas tuvieron un decrecimiento gradual hasta llegar a la visita 7 donde se estabilizaron. Cada paca disminuyó en total 30 y 27 cm respectivamente.

Con el comportamiento de las cuatro variables, se observaron momentos característicos por rango de visitas por ejemplo en la Visita 2 donde las pacas están experimentando un aumento en la temperatura, el pH se mantuvo ácido y la altura decreció rápidamente. Después de la visita 7, la temperatura estuvo por debajo de la TA, el pH se neutralizó y no se observó variación en la altura de la paca, de lo que se puede inferir que las pacas han llegado a una fase de maduración y la actividad microbiana se ha detenido.

8.2.2. *bs-T*

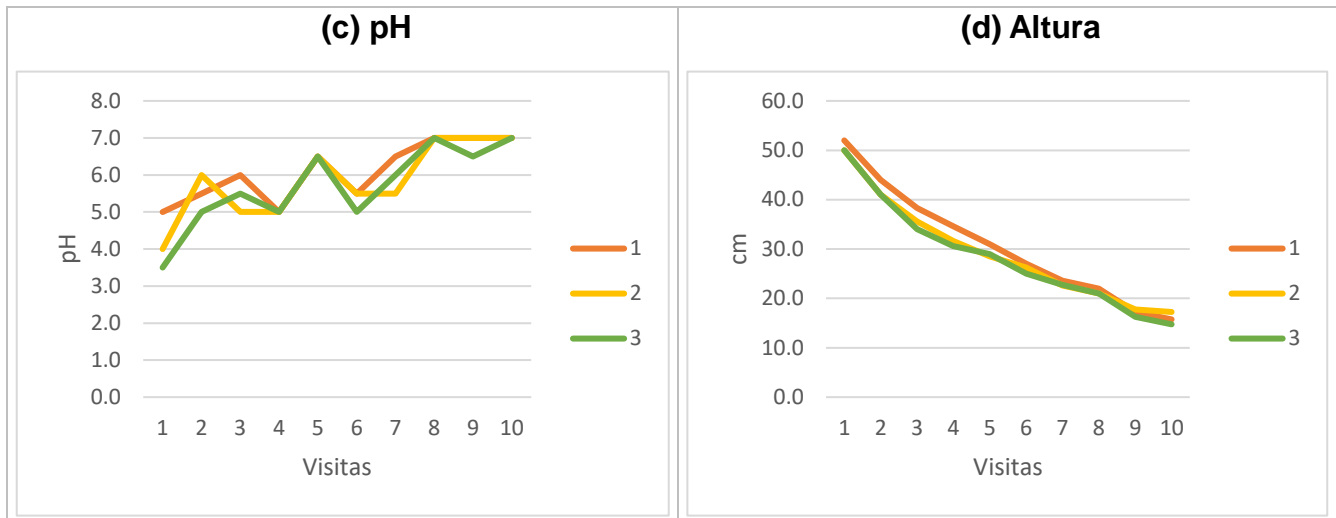
Tabla 8

Monitoreo de variables fisicoquímicas en bs-T



En la figura de la Tabla 8(a) se observó que a partir de la visita 2, las pacas se encontraron en una fase cercana a la termófila alcanzando el pico más alto de temperaturas (43°C, 43°C y 44°C), luego en la visita 3 la Paca 2 y 3 se mantuvieron en esta fase y Paca 1 pasó a una fase mesófila. A partir de la visita 5 la temperatura descendió hasta llegar a 26, 26 y 28°C en la visita 9, respectivamente. Posteriormente, se mantuvo constante hasta la visita 10. La temperatura de cada paca permaneció siempre por encima de la TA en cada visita

En la figura de la Tabla 8(b) se evidenció que la humedad se mantuvo constante durante las 10 visitas conservando siempre un estado de saturación, esto se debió a las precipitaciones



En la zona de vida bmh-PM se evidenció que la temperatura de las pacas en la visita 1 estuvo cercanas a la TA (25°C), luego durante los primeros 14 días, la temperatura empezó a incrementar alcanzando valores de 35°C, 37°C y 34°C para cada paca, lo que muestra un aumento considerable en Paca 1 y 2 de 12°C y en Paca 3 de 7°C. Según los rangos nombrados en la literatura, en los días de monitoreo llevados a cabo estas pacas no registraron temperaturas en la fase termófila. En la visita 3 la temperatura descendió nuevamente, en la visita 4 y 5, Paca 1 y 3 aumentaron su temperatura nuevamente y a partir de la visita 6, todas las pacas fueron disminuyendo su temperatura hasta estabilizarse en la visita 9 en 20°C, valor en el que se mantuvo hasta el final, con respecto a la TA, está a partir de la Visita 7 estuvo por debajo de la temperatura registrada por cada paca.

En la figura de la Tabla 9(b) se pudo observar que la humedad se mantuvo constante durante las 10 visitas conservando siempre un estado de saturación, esto ocurrió debido a las precipitaciones recurrentes en el municipio de Caldas ya que las pacas se encontraban a la intemperie.

Con respecto a la variación del pH, en las pacas se evidenció un pH ácido (5.0, 4.0 y 3.5), durante la trayectoria se observaron variaciones crecientes y decrecientes hasta la visita 6, en donde las tres pacas aumentaron su pH gradualmente hasta la visita 8, en esta visita las tres pacas alcanzaron un pH neutro, sin embargo, Paca 2, en la visita 9 volvió a bajar a 6.5.

En la visita 1, la altura de las pacas biodigestoras fue de 52, 50 y 50 cm respectivamente, se apreció que durante toda la trayectoria tuvieron una disminución paulatina empezando con

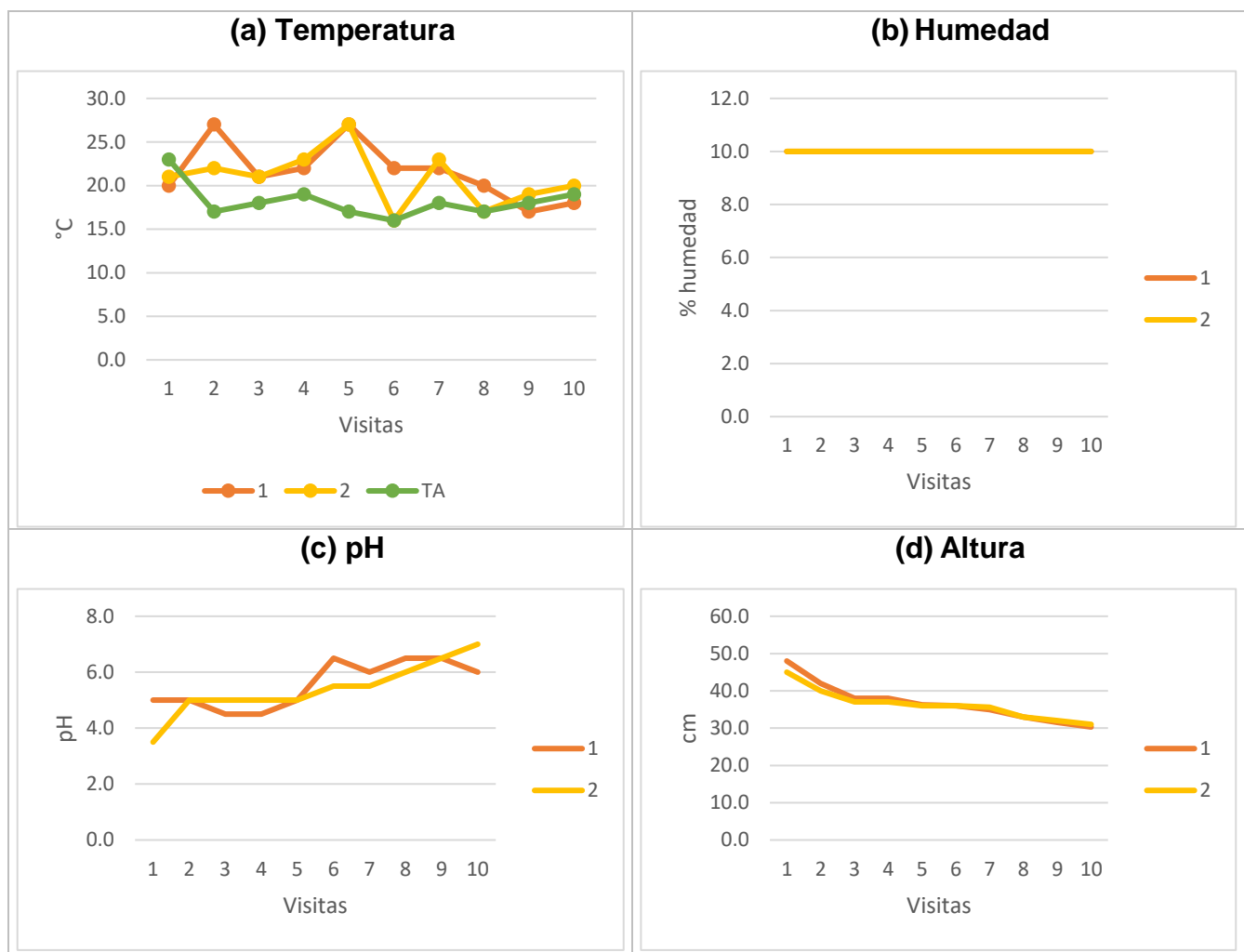
cambios entre 8 y 9 cm y terminando en cambios entre 5 y 2 cm. Cada paca disminuyó en total 37, 33 y 36 cm respectivamente.

Con el comportamiento de las cuatro variables, se observó momentos característicos por rango de visitas por ejemplo en la Visita 2 las pacas tuvieron su pico más alto de temperatura, el pH se mantuvo ácido y la altura decreció a una tasa de cambio mayor. Después de la visita 7, la temperatura estuvo por debajo de la TA y el pH se intentó neutralizar a partir de la visita 8.

8.2.4. *bmh-MB*

Tabla 10

Monitoreo de variables fisicoquímicas en bmh- MB



En la zona de vida *bmh-MB*, la variación de la temperatura en la visita 2 y en la 6 tuvieron una diferencia de 5°C y 6°C respectivamente entre sí. Paca 1 tuvo dos picos de temperatura (27°C) evidenciados en la visita 2 y en la visita 5, mientras que la paca 2 solo mostró un pico de igual

magnitud en la visita 5, durante la trayectoria en general se observó que las temperaturas estuvieron muy cercanas a la TA distando en pocos grados centígrados.

En la figura de la 10(b) se pudo observar que la humedad se mantuvo constante durante las 10 visitas conservando siempre un estado de saturación, esto ocurrió debido a las precipitaciones recurrentes características de la zona de vida además del aumento en las precipitaciones ocasionado por el fenómeno La Niña, ya que las pacas se encontraban a la intemperie.

Con respecto a la variación del pH, en las pacas se evidenció un pH ácido (5.0 y 3.5). Paca 1 no mostró ni un incremento ni una disminución definida a lo largo de la trayectoria, al final del monitoreo siguió estando en un pH ácido (6.5). La Paca 2 estuvo en un proceso de alcalinización a lo largo de toda la trayectoria, registrando en la visita 10 un pH neutro.

La altura inicial de las pacas correspondió a 48 y 45 cm respectivamente. Se evidenció una disminución importante en las visitas 2 y 3, luego el proceso fue decreciendo de una manera más lenta registrando cambios entre 0 y 2 cm después de la visita 3 hasta el final del monitoreo.

8.2.5. Validación de datos estadísticamente

Para la validación de los datos estadísticamente, se utilizó el coeficiente de variación (CV) el cual relaciona la desviación estándar con la media aritmética para establecer qué tan homogénea o dispersa esta la información (Posada Hernández, 2016). Para el análisis llevado a cabo se tuvo en cuenta el siguiente criterio:

- $CV \leq 7\%$: se consideran precisas
- $8\% \leq CV \leq 14\%$: tienen precisión aceptable
- $15\% \leq CV \leq 20\%$: datos con precisión regular
- $CV > 20\%$: estimación poco precisa

Tabla 11

Coefficiente de variación para cada variable

(a) Temperatura					(b) Humedad				
Visita	bmh-PM	bh-PM	bmh-MB	bs-T	Visita	bmh-PM	bh-PM	bmh-MB	bs-T
1	6,5%	1,8%	2,4%	1,8%	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	3,5%	1,3%	10,2%	1,1%	2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	2,0%	4,0%	0,0%	3,1%	3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	5,4%	2,9%	2,2%	2,5%	4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	8,1%	8,8%	0,0%	1,5%	5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	3,4%	2,0%	15,8%	2,7%	6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7	2,2%	0,0%	2,2%	4,3%	7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
8	2,6%	0,0%	8,1%	1,7%	8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9	0,0%	0,0%	5,6%	1,8%	9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10	0,0%	2,1%	5,3%	3,5%	10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

(c) pH					(d) Altura				
Visita	bmh-PM	bh-PM	bmh-MB	bs-T	Visita	bmh-PM	bh-PM	bmh-MB	bs-T
1	15,0%	5,3%	17,6%	15,7%	1	1,9%	5,1%	3,2%	3,4%
2	7,4%	0,0%	0,0%	0,0%	2	3,4%	4,8%	2,4%	5,5%
3	7,4%	0,0%	5,3%	15,7%	3	4,9%	3,1%	1,3%	7,5%
4	0,0%	0,0%	5,3%	8,8%	4	5,3%	2,4%	1,3%	9,1%
5	0,0%	4,3%	0,0%	3,7%	5	3,7%	1,3%	0,3%	8,8%
6	4,4%	4,0%	8,3%	0,0%	6	3,2%	0,0%	0,0%	6,7%
7	6,8%	0,0%	4,3%	3,5%	7	1,9%	3,7%	0,8%	6,0%
8	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	8	2,2%	3,7%	0,0%	14,5%
9	3,4%	0,0%	0,0%	3,4%	9	3,7%	3,7%	0,8%	13,5%
10	0,0%	0,0%	7,7%	0,0%	10	6,5%	3,7%	1,1%	9,7%

La información relacionada en la Tabla 11 (a) mostró que todos los datos de temperatura obtenidos en las diferentes zonas de vida fueron confiables puesto que ninguno excede el coeficiente de variación en un 20%. No obstante, se evidenció uno con precisión regular (15.8%) en la visita 6 de la zona de vida bmh-MB. También hubo cuatro en el rango de precisión aceptable, por consiguiente, se pudo observar que la mayoría de los valores reportados fueron precisos. El análisis de la variación de la humedad observada en la tabla 11 (b) presentaron una variabilidad de 0%, lo cual significa que los datos fueron precisos. La información de pH se considera confiable, sin embargo, en la visita 1 de las zonas de vida bmh-PM (15%), bmh-MB (17.6%) y bs-T (15.7%) se evidenciaron algunos con precisión regular. La zona de vida bmh-MB mostró dos con precisión regular y uno con precisión aceptable de los 10 coeficientes de variación. A pesar de lo anterior la mayoría se consideraron homogéneos y precisos. Finalmente, con respecto a la altura se mostró

que las zonas de vida bmh-PM, bmh-MB y bh-PM presentaron valores precisos con un CV inferior al 7%. La zona de vida bs-T tuvo dos con precisión regular (14.5 y 13.5%) y cuatro con precisión aceptable como se muestran en la tabla 11 (d), sin embargo, siguen siendo confiables al no exceder un CV superior al 20%.

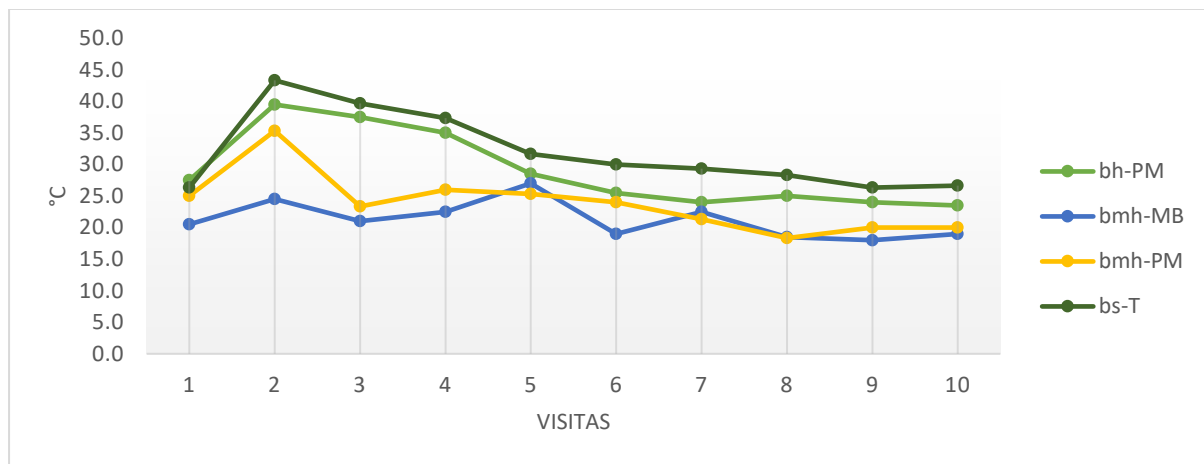
Este análisis estadístico mostró que los CV para cada variable en cada zona de vida se encontraron inferiores a un 20%, por lo cual fueron datos representativos y confiables haciendo que el uso de promedios para cada variable según la zona de vida fuera considerado válido.

8.2.6. Comparación de los parámetros entre zonas de vida

8.2.6.1. Temperatura

Figura 6

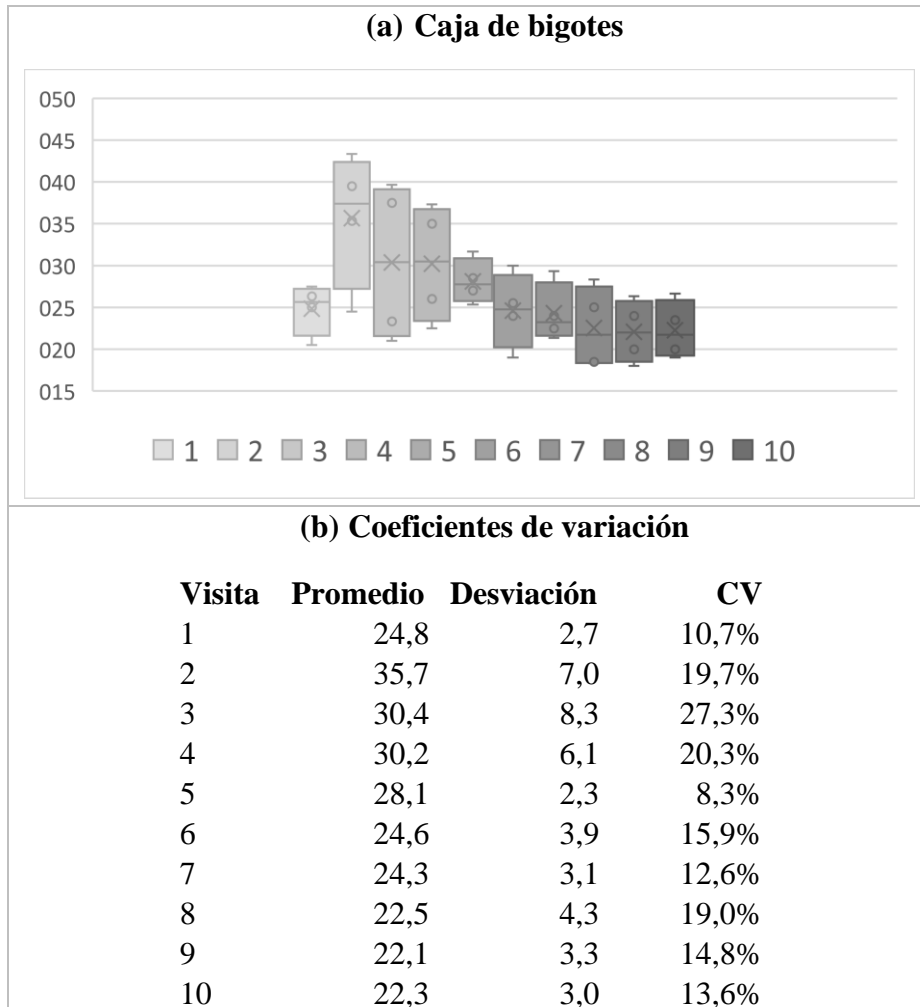
Variación de las temperaturas en las cuatro zonas de vidas



En la Figura 6, se evidenció que las mayores temperaturas en las pacas se obtuvieron en la zona de vida bs-T lo cual tiene sentido ya que fue la zona más cálida con temperaturas promedio mayores a 24°C (Tabla 4), las pacas del bh-PM mostraron un registro de temperaturas superiores a la temperatura promedio de su zona de vida ($18^{\circ}\text{C} < T < 24^{\circ}\text{C}$). Por otro lado, el bs-T, bh-PM y bmh-PM obtuvieron su pico de temperatura más alto en la visita 2 durante los primeros 14 días de descomposición, mientras que el bmh-MB lo mostró en la visita 5. Las temperaturas más bajas en la mayoría las visitas se presentaron en el bmh-MB.

Tabla 12

Validación de datos de temperatura estadísticamente



En la caja de bigotes mostrada en la Tabla 12 (a) se observó que durante las visitas 2, 3 y 4 hubo alta variabilidad y dispersión en los datos, no se mostró una tendencia definida, es decir, las cajas oscilaron con datos entre rangos amplios y rangos cortos. Con respecto a los coeficientes de variación, se apreció que en ninguna visita hay datos precisos por el contrario tres de los datos fueron poco precisos, tres regulares, y cuatro aceptables. Con ambos métodos se demostró que los datos se encontraron más dispersos que homogéneos lo que conlleva a pensar que la zona de vida si incidió sobre la temperatura a la cual se descompone la paca biodigestora.

8.2.6.2. Humedad

Figura 7

Variación de la humedad en las cuatro zonas de vida

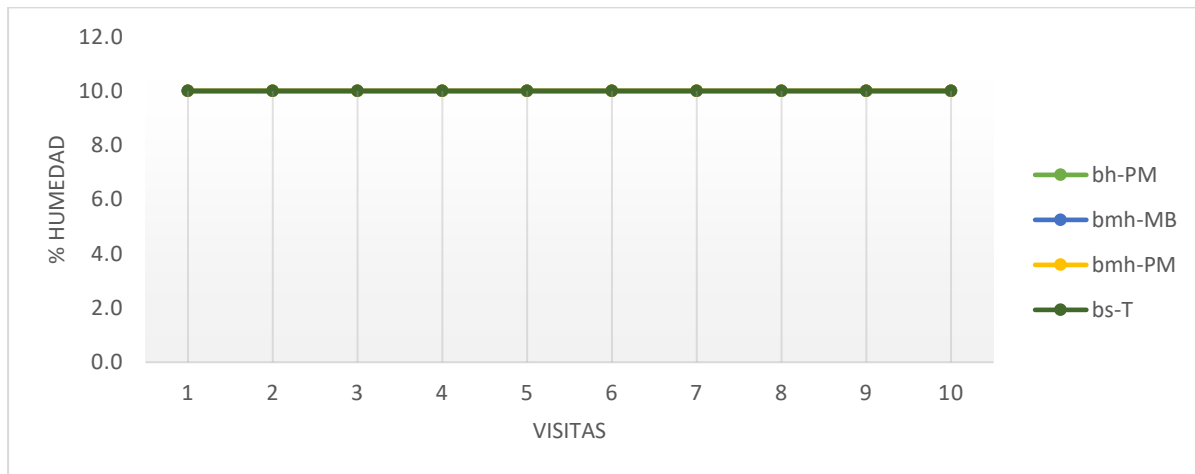
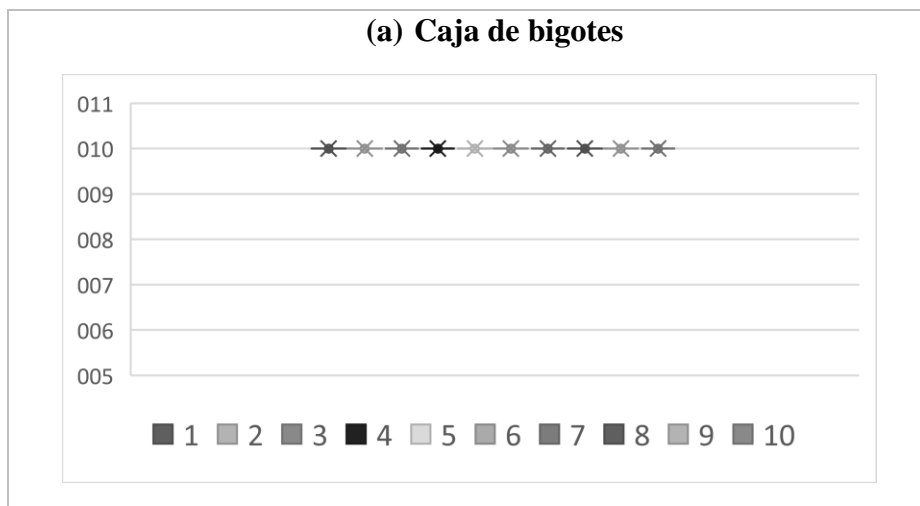


Tabla 13

Validación de datos de humedad estadísticamente



(b) Coeficientes de variación

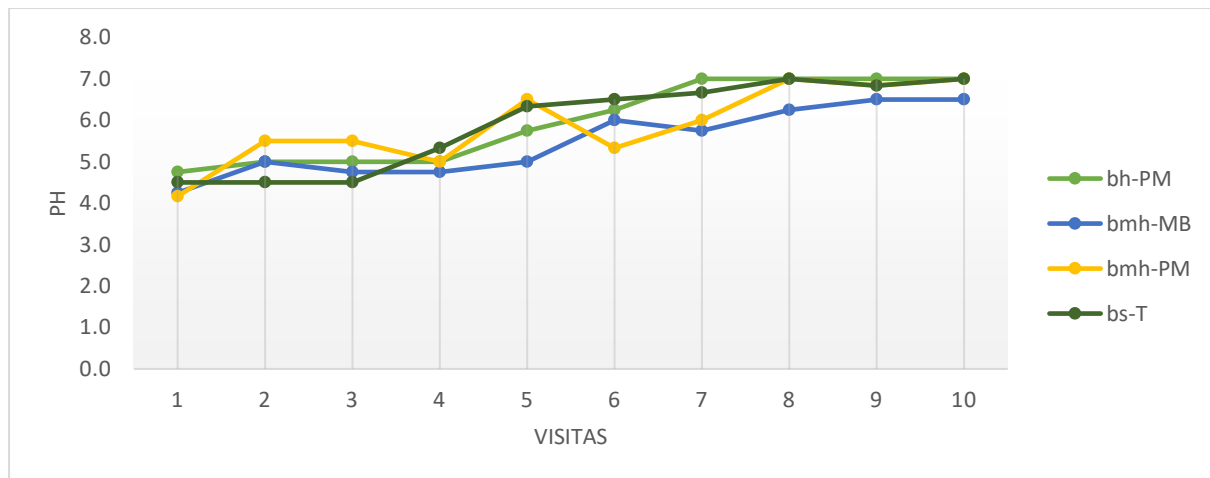
Visita	Promedio	Desviación	CV
1	10	0	0,0%
2	10	0	0,0%
3	10	0	0,0%
4	10	0	0,0%
5	10	0	0,0%
6	10	0	0,0%
7	10	0	0,0%
8	10	0	0,0%
9	10	0	0,0%
10	10	0	0,0%

En la Figura 7, en la caja de bigotes y el CV mostrados en la Tabla 13 se observó que el porcentaje de humedad promedio no varió en ninguna zona de vida, es importante recordar que durante el periodo de medición se presentaron altas precipitaciones en la región con lo que se puede inferir que la precipitación incidió sobre el parámetro de la humedad haciendo que este sea indiferente a la zona de vida en donde se esté dando la descomposición de los residuos en la paca biodigestora.

8.2.6.3. pH

Figura 8

Variaciones del pH en las cuatro zonas de vida

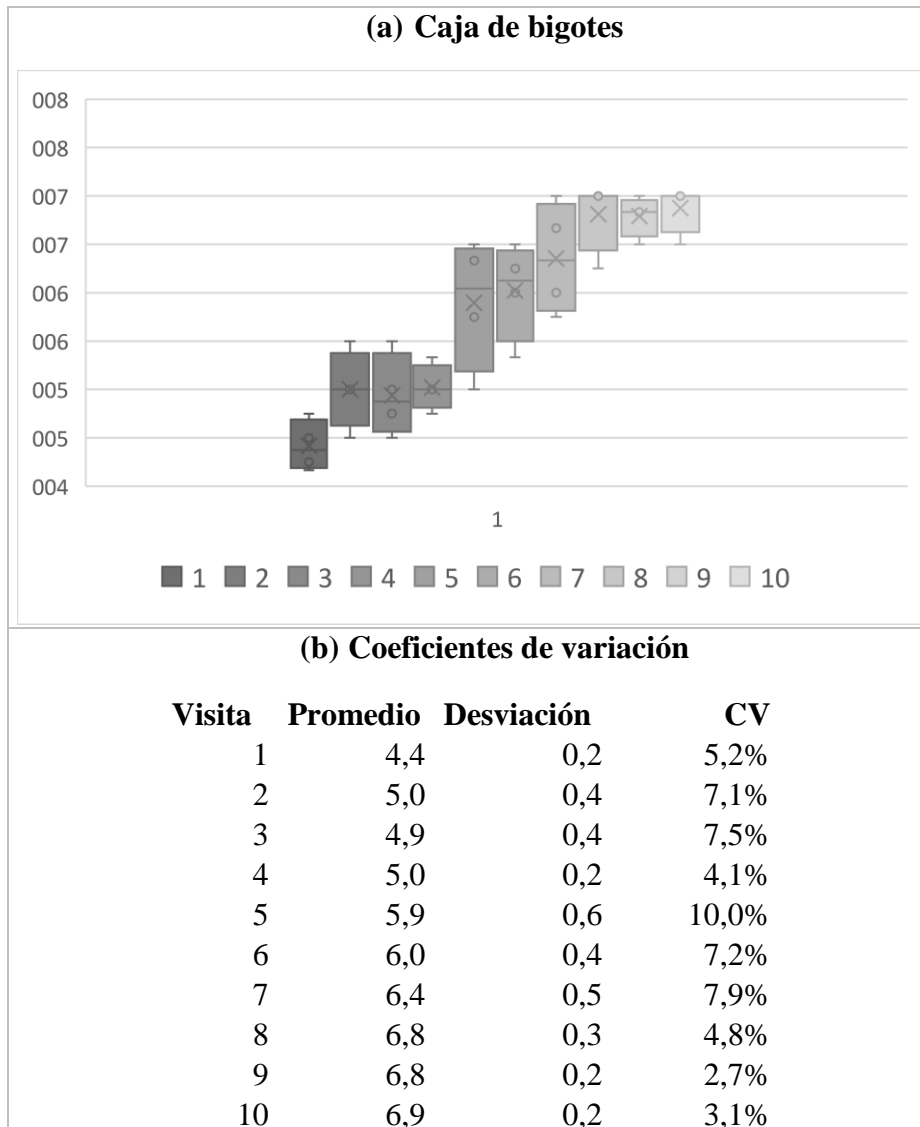


En la Figura 8 se apreció la variación del pH en cada zona de vida. En la visita 1 todos los valores promedio de pH por zona se encontraron próximos entre sí ($4.2 < \text{pH} < 4.8$), luego, aunque se evidenció trayectorias distintas para cada zona de vida, en la visita 7 el bh-PM se empezó a

estabilizar en un pH neutro, en la visita 8 el bmh- PM y bs-T, se estabilizaron igualmente. También se apreció que en el bmh-MB, aunque las pacas se estuvieron alcalinizando con el paso del tiempo, en el periodo evaluado no llegaron a un pH neutro, lo que dio indicio que el proceso se desarrolló de forma más lenta comparado a las otras zonas de vida.

Tabla 14

Validación de datos de pH estadísticamente



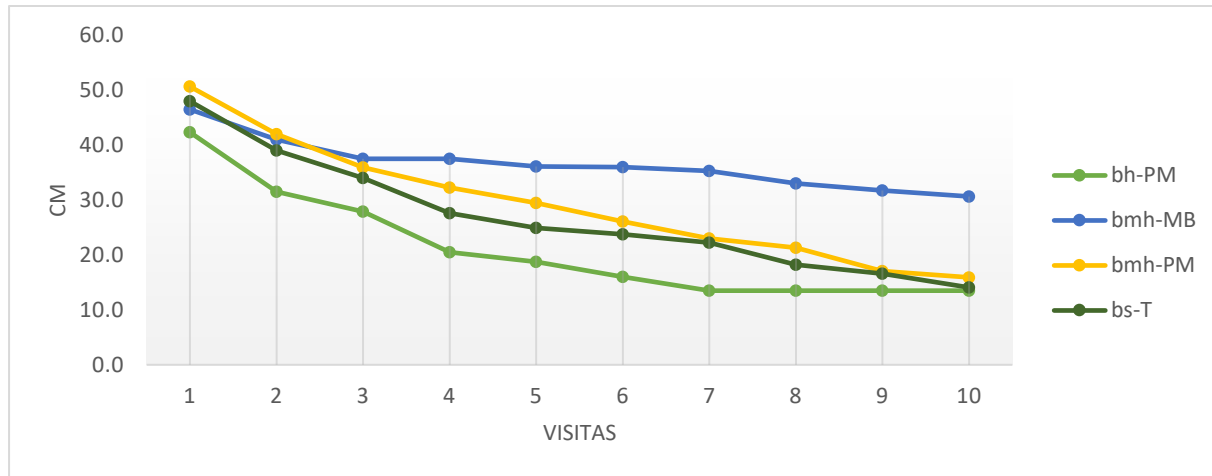
En la caja de bigotes mostrada en la Tabla 14 (a) se observó que durante las visitas 5, 6 y 7 se presentó una alta variabilidad y dispersión en los datos, las visitas 8, 9 y 10 mostraron cajas más angostas, con los datos más próximos entre sí. Con respecto a los coeficientes de variación, analizando los promedios de todas las zonas de vida por visita se apreció que tienen un crecimiento

gradual desde un medio ácido hacia un medio casi neutro. De los CV, tres se consideraron aceptables y siete estuvieron en el rango de los precisos por lo que fue válido pensar que los datos tuvieron homogeneidad a pesar de que las zonas de vida fueran diferentes.

8.2.6.4. Altura de las pacas

Figura 9

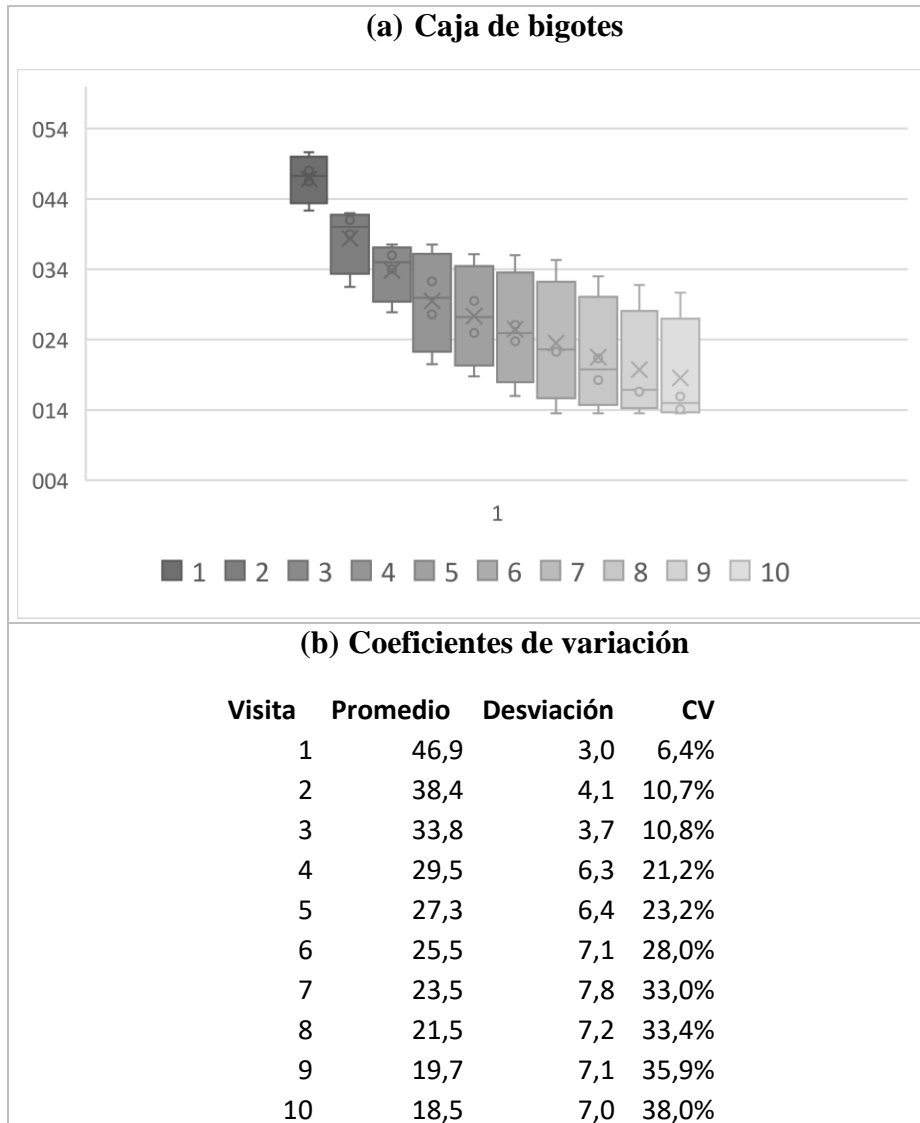
Variaciones de altura de las pacas en las cuatro zonas de vida



En todas las zonas de vida, la altura de la paca disminuyó con el paso del tiempo. Para el bh-PM la altura se estabilizó en la visita 7 y se mantuvo constante, las otras zonas de vida por el contrario durante todas las visitas se evidenció disminución en la altura. En la visita 10, bh-PM, bmh-PM y bs-T alcanzaron una altura cercana de 13.5, 15.9 y 14.1 cm, respectivamente. No obstante, el que obtuvo el mayor decrecimiento comparando la altura inicial con la altura final fue bs-T (-71%), seguido de bmh-PM con (-69%) y bh-PM (-61%).

Tabla 15

Validación de datos de altura de las pacas estadísticamente



Durante las primeras tres visitas la altura de las pacas varió poco respecto a las zonas de vida como se aprecia en la caja de bigotes de la Tabla 15 (a). Sin embargo, a partir de la visita 4, el rango de la caja de bigotes fue aumentando por visita, lo que quiere decir que los datos estuvieron muy dispersos. En el análisis de los CV, aunque los promedios fueron disminuyendo, la desviación estándar se observó alta, siete de los datos fueron poco precisos ($CV > 20\%$), es decir, los datos se encontraron poco homogéneos entre sí. Esto conlleva a pensar que, si bien es cierto que la altura fue disminuyendo independientemente de la zona de vida, la trayectoria y la velocidad con la que lo hace si pudo depender de esta.

8.3. Evaluación de la calidad y madurez del abono obtenido

En todos los municipios se obtuvo el abono, producto del proceso de descomposición, el cual se utilizó con fines agrícolas y/o jardinería dentro de las mismas instalaciones donde se realizaron los montajes. La UdeA produjo 28.8 Kg, IEAV obtuvo 40.5 Kg, CORPODIL cuantifico 50.4Kg y La Romera 36 Kg de abono, para un total de 155.7 Kg de abono obtenido en todos los sistemas. En cada municipio se preparó una muestra compuesta de 1 Kg que posteriormente se llevó al GIEM.

8.3.1. Parámetros fisicoquímicos

El análisis fisicoquímico y microbiológico se obtuvo mediante pruebas de laboratorio realizado por GIEM, dando como resultado valores de cada parámetro, como se observa en las Tablas 16, 17, 18 y 19, 20, 21 y 22 estos se compararon con la NTC 5167 (2022) y con los datos de la literatura, lo cual permitió determinar si la muestra analizada cumple con los niveles permisibles para su uso y aplicación en los suelos.

Tabla 16

Parámetros fisicoquímicos en bh-PM

Parámetro	Unidad	Resultados GIEM	Valor óptimo	Cumple
Cenizas	%	31.9	Máximo 60%	Cumple
CIC	meq/100g	55.0	Mínimo 30 meq/100g	Cumple
CIC/CO	meq/100g CO	184.6	No definido	-
Carbono orgánico oxidable total	%	29.8	Mínimo 15%	Cumple
Conductividad eléctrica (1/200)	dS/m	0.026	Menor a 3	Cumple
CRA	%	145.3	Mínimo 100%	Cumple
Densidad (20 C)	g/cm ³	0.41	Máximo 0,6 g/cm ³	Cumple
Fosforo total	%	0.95	No definido	-
Humedad	%	73.9	Máximo 25%	No cumple
Nitrógeno orgánico total	%	2.8	Mínimo 1%	Cumple
pH (10%)	-	7.24	Mínimo 4 - Máximo 9	Cumple
Relación (C/N)	-	10.6	Máximo 25	Cumple

Tabla 17

Parámetros fisicoquímicos en bs-T

Parámetro	Unidad	Resultados GIEM	Valor óptimo	Cumple
Cenizas	%	47.8	Máximo 60%	Cumple
CIC	meq/100g	58.8	Mínimo 30 meq/100g	Cumple
CIC/CO	meq/100g CO	244.8	No definido	-
Carbono orgánico oxidable total	%	24.0	Mínimo 15%	Cumple
Conductividad eléctrica (1/200)	dS/m	0.058	Menor a 3	Cumple
CRA	%	154.9	Mínimo 100%	Cumple
Densidad (20 C)	g/cm ³	0.43	Máximo 0,6 g/cm ³	Cumple
Fosforo total	%	N.D	No definido	-
Humedad	%	67.3	Máximo 25%	No cumple
Nitrógeno orgánico total	%	2.17	Mínimo 1%	Cumple
pH (10%)	-	7.8	Mínimo 4 - Máximo 9	Cumple
Relación (C/N)	-	11.1	Máximo 25	Cumple

Tabla 18

Parámetros fisicoquímicos en bmh-PM

Parámetro	Unidad	Resultados GIEM	Valor óptimo	Cumple
Cenizas	%	54.8	Máximo 60%	Cumple
CIC	meq/100g	101.1	Mínimo 30 meq/100g	Cumple
CIC/CO	meq/100g CO	483.5	No definido	-
Carbono orgánico oxidable total	%	20.9	Mínimo 15%	Cumple
Conductividad eléctrica (1/200)	dS/m	0.055	Menor a 3	Cumple
CRA	%	161.8	Mínimo 100%	Cumple
Densidad (20 C)	g/cm ³	0.52	Máximo 0,6 g/cm ³	Cumple
Fosforo total	%	N.D	No definido	-
Humedad	%	65.3	Máximo 25%	No cumple
nitrógeno orgánico total	%	1.49	Mínimo 1%	Cumple
pH (10%)	-	6.27	Mínimo 4 - Máximo 9	Cumple
Relación (C/N)	-	14.0	Máximo 25	Cumple

Tabla 19

Parámetros fisicoquímicos en bmh-MB

Parámetro	Unidad	Resultados GIEM	Valor óptimo	Cumple
Cenizas	%	52.2	Máximo 60%	Cumple
CIC	meq/100g	76.3	Mínimo 30 meq/100g	Cumple
CIC/CO	meq/100g CO	353.2	No definido	-
Carbono orgánico oxidable total	%	21.6	Mínimo 15%	Cumple
Conductividad eléctrica (1/200)	dS/m	0.015	Menor a 3	Cumple
CRA	%	141.7	Mínimo 100%	Cumple
Densidad (20 C)	g/cm ³	0.16	Máximo 0,6 g/cm ³	Cumple
Fosforo total	%	0.36	No definido	-
Humedad	%	71.1	Máximo 25%	No cumple
Nitrógeno orgánico total	%	1.65	Mínimo 1%	Cumple
PH (10%)	-	7.19	Mínimo 4 - Máximo 9	Cumple
Relación (C/N)	-	13.1	Máximo 25	Cumple

Los valores de cenizas reportados por el laboratorio para todas las muestras de abono orgánico se obtuvieron inferior al 60% que es el nivel máximo permisible por la NTC 5167 (2022).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es la capacidad para liberar cationes, como potasio, calcio y magnesio para ser utilizados por las plantas. Los resultados reportados cumplieron con los estándares NTC 5167 (2022) lo que indica que el abono podría aportar nutrientes en todas las zonas de vida.

El porcentaje de Carbono orgánico total en todas las muestras se encontró por encima de 15%, lo cual indica que la concentración a la que se encuentra este nutriente en la muestra de abono es apta para el uso en los suelos.

La conductividad eléctrica en todos los análisis se encontró por debajo 3 dS/m, cumpliendo con los valores óptimos establecidos para dicho parámetro. Una cantidad menor de 3 dS/m representa un abono de buena calidad, que posibilita la germinación y el desarrollo vegetal.

La capacidad de retención de agua reportada es de más del 100%, cantidad fijada por la NTC 5167 (2022), cumpliendo así con los estándares mínimos de este parámetro. El uso de este abono puede favorecer la humedad de los suelos.

La densidad en todas las muestras estuvo por debajo de 0,6 g/cm³, el cual es el máximo permisible para dicho parámetro, lo cual significa que los abonos analizados poseen una alta porosidad lo cual mejora la absorción, aireación y estructura.

El parámetro de humedad reportado para cada zona de vida superó el nivel máximo permisible, el cual corresponde a 25%, según la NTC 5167 (2022). El exceso de humedad encontrado puede deberse al fuerte periodo de lluvias que se vivió en el territorio antioqueño en los meses del montaje y monitoreo de las pacas, el cual se pudo haber intensificado por el fenómeno de La Niña.

Un buen porcentaje de nitrógeno en un sustrato debe ser superior al 1%, por tanto, según los datos reportados por el laboratorio, todas las muestras cumplen con la NTC 5167 (2022).

El pH registrado para todos los abonos está dentro de los rangos establecidos por la NTC 5167 (2022) y además dichos valores estuvieron cercanos a 7, lo que podría indicar que están en proceso de estabilización, y que dichos abonos podrían ser aptos para su uso.

La relación carbono/nitrógeno refleja el estado de madurez y la estabilidad de la materia orgánica, los valores reportados son menores a 25, por tanto, cumplieron con el nivel máximo permisible.

Tabla 20

Porcentaje de masa por zona de vida

Tamaño de partícula	Bh-PM	Bmh-PM	Bmh-MB	Bs-T
> 2 mm	92.3	78.8	98.2	79.8
< 2 mm	7.7	21.2	1.8	20.2

En la Tabla 20 se evidenció que, en todas las muestras, por lo menos un 78% del material tuvo un tamaño de partícula superior a 2 mm. Según Soliva & López (2004), un abono de buena calidad debe estar compuesto por partículas menores o iguales a 1,6 mm, por lo que se podría concluir que los abonos en el estado actual no cuentan con una buena retención de nutrientes ni de agua según este indicador.

Además, respecto al tamaño de la partícula, también se reportaron varias características organolépticas como estado, el color y la textura de la muestra; datos que para todas las muestras fueron iguales, siendo solidos secos, de color café y con textura gruesa heterogénea

También se reportaron datos relacionados al contenido de macro y micronutrientes, los cuales favorecen la germinación y el desarrollo de las plantas. Según NTC 5761 (2022) una

cantidad superior al 1% representa una buena disponibilidad del nutriente en el abono. Según los datos reportados solo el nitrógeno y el calcio superaron dicho valor, por el contrario, nutrientes como potasio, fosforo, magnesio y aluminio tienen valores muy por debajo del 1%.

8.3.2. Análisis microbiológico del abono

Tabla 21

Microorganismos presentes en las muestras de abono

(a)

Zona de vida	Mesófilos UFC/g	Termófilos UFC/g	Mohos UFC/g	Levaduras UFC/g	Entero bacterias UFC/g	Salmonella / 25 g
Bh-PM	7,30E+09	6,00E+05	4,90E+03	0,00E+00	3,00E+02	Negativo
Bmh-PM	8,30E+09	1,20E+06	3,00E+02	1,00E+01	0,00E+00	Negativo
Bmh-MB	9,10E+08	1,00E+02	2,70E+04	0,00E+00	0,00E+00	Negativo
Bs-T	2,70E+09	1,20E+05	1,30E+04	0,00E+00	1,80E+02	Negativo

(b)

Zona de vida	NMP Coliformes totales / 100 ml	NMP Coliformes fecales/ 100 ml	Huevos de Helminthos viables / 4g
Bh-PM	>2400	>2400	Ausentes
Bmh-PM	>2400	>2400	Ausentes
Bmh-MB	>2400	>2400	Ausentes
Bs-T	1100	1100	Ausentes

La presencia de organismos mesófilos, termófilos y mohos significa que hay presencia de actividad biológica, por ende, el proceso de descomposición no ha terminado. La ausencia de levaduras en las muestras de bh-PM, bmh-MB y bs-T puede estar asociada a los resultados de pH, los cuales al estar cerca a la neutralidad desfavorecen el crecimiento microbiano en medios ácidos. Mientras que en la muestra de bmh-PM reportó presencia de levaduras y un pH ácido (6.27) como se muestra en la Tabla 21.

La Salmonella es una bacteria proveniente principalmente de las heces de los animales aunque también es posible encontrarla en algunos alimentos como frutas, verduras y cárnicos que fueron contaminados (FAO, 2013), para algunos autores es considerada como la “enterobacteria de mayor riesgo en la salud” (Ardila et al., 2015), ninguna de las muestras llevadas al laboratorio mostraron presencia de esta bacteria lo cual es un aspecto positivo en la aplicación y uso del abono.

Los coliformes totales y fecales en las zonas de vida bh-PM, bmh-PM y bmh-MB se registraron superiores a 2400 NMP, lo que indica que estas muestras de abono podrían estar contaminadas de agentes patógenos, solo la zona bs-T (1100 NMP) estuvo cercana a lo estipulado por la NTC 5167 (2022).

En todas las muestras de abono se observa ausencia de huevos de helmintos, lo que al igual que la Salmonella, que la ausencia de estos microorganismos es un aspecto positivo para la aplicación a los suelos.

8.3.3. Análisis fitotóxico del abono

Las Tablas 22 corresponde a los resultados de la prueba de germinación, la cual indica el grado de maduración del abono orgánico y la Tabla 23 corresponde a la actividad respirométrica de las muestras de abono orgánico, en donde muestra el nivel de estabilidad del abono. Los valores se compararon según lo estipulado en la Tabla 3

Tabla 22

Prueba de Índice de Germinación

ZONA DE VIDA	MUESTRA	CONCENTRACIÓN (% P/V) MTA SÓLIDA	% DE GERMINACIÓN
BH-PM	Testigo	0	90
	Abono orgánico	10	90
BMH-PM	Testigo	0	95
	Abono orgánico	10	75
BMH-MB	Testigo	0	85
	Abono orgánico	10	75
BS-T	Testigo	0	95
	Abono orgánico	10	80

Tabla 23

Prueba de actividad respirométrica

Zona de vida	Parámetro	Resultado
Bh-PM	Respirometría 24 horas	0.84
Bmh-PM	Respirometría 24 horas	0.72
Bmh-MB	Respirometría 24 horas	0.84
Bs-T	Respirometría 24 horas	0.73

Los abonos analizados en bh-PM y bs-T presentaron ausencia de sustancias fitotóxicas mientras que las zonas de vida de bmh-PM y bmh-MB al estar en un rango entre 50% <IG<80% se

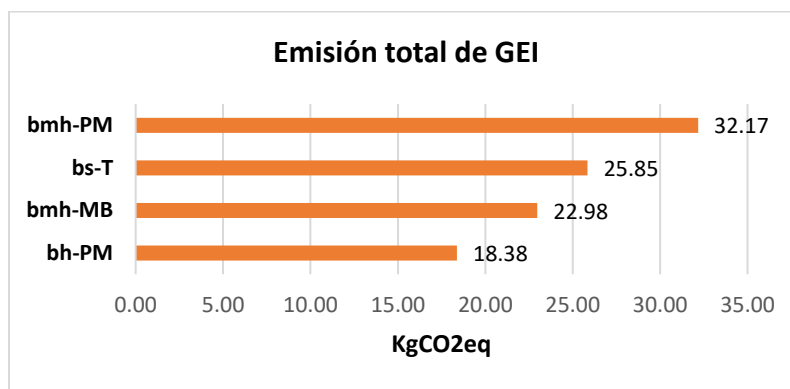
consideraron con presencia moderada de sustancias fitotóxicas. Por otro lado, la prueba de actividad respirométrica mostrada en la Tabla 23 indicó que los abonos se encontraron estables ya que registraron valores inferiores a 8 mgCO₂/g.

Con estos datos, es posible afirmar que los abonos de la zona de vida bh-PM y bs-T no representan un potencial fitotóxico para los suelos donde se incorporen, por el contrario, aportan en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

8.4. Estimación de la emisión de GEI

Figura 10

Emisión total de GEI por municipio



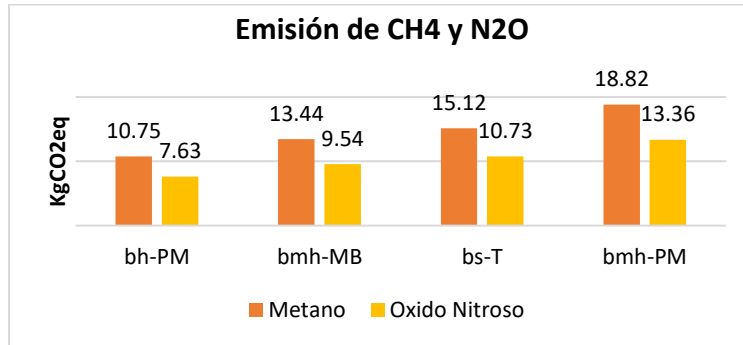
La emisión total de GEI para las cuatro zonas fue de 99,39 KgCO₂eq haciendo uso de la Ecuación 1, se encontró la mayor emisión de bmh-PM (32.17 KgCO₂eq) seguido de bs-T(25.85 KgCO₂eq), bmh-MB (22.98 KgCO₂eq) y bh-PM (18,38 KgCO₂eq) como se observa en la Figura 10. Estos resultados son proporcionales a la cantidad de residuos aprovechados, es decir a mayor residuos tratados mayor emisión.

Los sistemas instalados trataron cerca de media tonelada de residuos orgánicos, estos resultados se escalaron y se compararon con los datos obtenidos en diferentes investigaciones que implementaron el sistema de compostaje, obteniendo que las pacas biodigestoras emitieron 0.195 tCO₂eq/t_{RO}, correspondiente a un 65% más que los resultados obtenidos en la investigación de Yeo et al (2020) donde se reportó una emisión de 0.116 tCO₂eq/t_{RO}, y 82% menos que lo estimado en los estudios de Yedla & Sindhu (2016) donde se calculó una producción de 1.1 tCO₂eq/t_R. Así mismo, desde la perspectiva de ciclo de vida, el sistema emitió menos que los resultados de Otoma & Diaz (2017) y Qdais et al. (2019), en un 50% (0.39 tCO₂eq/t_R) y 60% (0.332 tCO₂eq/t_R), respectivamente. Esta disminución en las emisiones está asociada a la instalación de las pacas biodigestoras en los mismos lugares de generación de residuos, por lo cual no se produjo emisiones

en el proceso de recolección y transporte, y tampoco se generó emisión en la operación del sistema, puesto que no se requirió de maquinaria, ni de energía eléctrica.

Figura 11

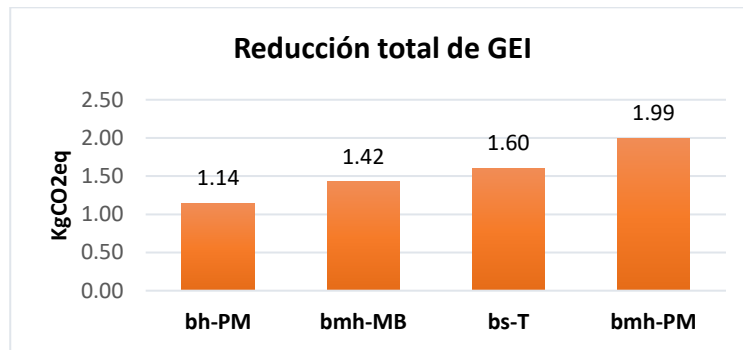
Emisión de metano y óxido nitroso evaluado en cada municipio



En la Figura 11 se evidencia que en todas las zonas de vida la mayor emisión fue de metano, lo cual se puede explicar debido a que su factor de emisión es aproximadamente 13 veces más grande que el del óxido nitroso. Esto quiere decir que, el gas que más se generó en la paca biodigestora fue el metano siguiendo la metodología del IPCC.

Figura 12

Reducción total de GEI por municipio



La reducción total de GEI fue de 6.16 KgCO₂eq utilizando la Ecuación 2, las zonas bmh-PM (1.99 KgCO₂eq) y bs-T (1.60 KgCO₂eq) tuvieron las mayores reducciones como se ilustra en la Figura 12. Como ya se había afirmado antes a mayores residuos tratados se obtuvo más producción de abono que al ser utilizado con fines agrícolas y/o jardinería ocasionó que se utilizarán menos fertilizantes químicos, lo que a su vez produjo mayores reducciones de GEI.

9. Conclusiones

La paca biodigestora representa una alternativa de tratamiento de los residuos orgánicos para los cuatro municipios en donde se instalaron los sistemas. Las personas involucradas en el proceso mostraron gran participación e interés y ayudaron a que el proceso culminara de manera satisfactoria. Así mismo, resaltaron bondades del sistema como la simplicidad en el montaje; la ocupación de pocos metros cuadrados para el tratamiento de grandes cantidades de residuos orgánicos y la facilidad en su construcción y operación. Con respecto a la cantidad de residuos tratados, estos variaron entre los sistemas debido al tamaño y humedad que presentaban. En todos los sistemas se obtuvo el abono, producto del proceso de descomposición, el cual se utilizó con fines agrícolas y/o jardinería dentro de las mismas instalaciones donde se realizaron los montajes.

Las condiciones ambientales propias de cada zona de vida mostraron tener incidencia en las variaciones de temperatura y altura. Por otro lado, en el pH no se mostró una influencia importante excepto para la zona bmh-MB en la cual no logró alcanzar un pH neutro; la humedad fue la misma en todas las zonas de vida de manera constante, lo cual se asoció a las fuertes precipitaciones que se evidenciaron en la región.

La descomposición de los residuos orgánicos fue más rápida en la zona de vida bs-T y bh-PM, estos resultados pueden estar relacionados primero con la mezcla inicial de ROD y RV, dado que los RDO estuvieron en mayor proporción que la hojarasca, la cual es un residuo vegetal más difícil de descomponer porque requiere mayor actividad microbiana y segundo con la temperatura, ya que estas zonas de vida presentan temperaturas promedio anuales más altas que las zonas bmh-PM y bmh-MB, lo que indica que a mayor temperatura se acelera la actividad biológica y por ende se obtienen altas tasas de descomposición.

También se obtuvo que durante el monitoreo realizado cada 14 días, en ninguna zona de vida, se registraron mediciones de temperatura mayores a los 45°C, característico de la fase termofílica, sin embargo, no se descarta la presencia de estas temperaturas dado que pudieron haber sucedido entre los días 2 y 14 lo cual no fue percibida en el monitoreo. La zona de vida que más se acercó fue el bs-T, así mismo esta fue la única zona más próxima a los niveles máximos permisibles de coliformes totales y fecales, por lo que se concluye que las altas temperaturas están relacionadas con la eliminación de agentes patógenos presentes en el abono. Por otra parte, el bs-T, bh-PM y bmh-PM obtienen su pico de temperatura más alto en la visita 2 durante los primeros 14 días de descomposición, mientras que el bmh-MB lo muestra en la visita 5.

Los parámetros fisicoquímicos del abono cumplen todos los límites dados en la NTC 5167 del 2022 excepto el contenido de humedad. Con respecto a los parámetros microbiológicos, a pesar de que la presencia de *Salmonella* y de Huevos de Helminto estuvieron ausentes se presentó coliformes totales y fecales en todas las muestras por encima del límite máximo permisible, excepto bs-T. Todas las zonas de vida obtuvieron un abono estable según la actividad respirométrica, y bs-T y bh-PM presentaron ausencia de sustancias fitotóxicas.

Se concluyó que, durante los 127 días de tratamiento de los residuos orgánicos, la zona de vida bs-T logró obtener un abono maduro y estable que aporta propiedades físicas, químicas y biológicas al suelo, libre de agentes patógenos y sustancias fitotóxicas. La zona de vida bh-PM, aunque también logró obtener un abono con buenas características físicas, químicas y fitotóxicas sus resultados no son concluyentes con respecto a la presencia de agentes patógenos. Las zonas de vida bmh-PM y bmh-MB requieren de más tiempo de descomposición puesto que aún se observa gran cantidad de organismos mesófilos, al abono le falta maduración según el índice de germinación.

La estimación de GEI da un primer acercamiento al proceso de cuantificación de las emisiones en la paca biodigestora, haciendo uso de la misma metodología utilizada para el sistema de compostaje, ya que se asumió que ambos sistemas tienen gran similitud en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos. Dicha suposición, permitió concluir que el gas con mayor índice de emisión, sin tener en cuenta el dióxido de carbono, es el metano. Sin embargo, al comparar los niveles de emisión de GEI de la paca biodigestora con investigaciones que implementaron el sistema de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos, no es posible llegar a una conclusión concreta, ya que las diferencias varían y los resultados no muestran una tendencia definitiva. Por otro lado, al realizar un análisis comparativo entre ambos sistemas, pero desde la perspectiva de ciclo de vida, se evidenció una disminución significativa en las emisiones de GEI que viabilizan y favorecen la implementación de la paca biodigestora. Así mismo, se demostró que es posible generar una reducción en la emisión GEI cuando el abono obtenido del proceso de descomposición se usa o incorpora al suelo. En este sentido, es posible afirmar que, la paca biodigestora es una alternativa de tratamiento viable para la mitigación de las emisiones de GEI asociadas al cambio climático y sus impactos.

10. Recomendaciones

Con respecto al análisis de las variables fisicoquímicas durante el proceso de descomposición en cada zona de vida, se recomienda realizar nuevamente el estudio en una temporada que no esté influenciada por el fenómeno ENOS, utilizar menos poda y/o hojarasca para los montajes en las zonas bmh-PM y bmh-MB y determinar el parámetro de E coli en los análisis microbiológicos del abono.

Se recomienda realizar mediciones de la emisión y reducción de GEI en sistemas de paca biodigestora *in situ*, que permitan a través de los datos reales comparar los resultados teóricos obtenidos a través de la metodología del IPCC y la Calculadora GEI del IGES y realizar una evaluación comparativa de la emisión de GEI entre la paca biodigestora y el sistema de compostaje. De igual manera, se sugiere aumentar las investigaciones sobre los factores de emisión propios para Colombia y para los diversos sistemas de tratamiento existentes en el país.

11. Referencias bibliográficas

- Álvarez Hernández, F. (2019). Identificación de impactos ambientales reportados durante la operación de rellenos sanitarios en Colombia. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 53(9), 1689–1699.
- Ardila Delgado, J. L., Cano Córdoba, J., Silva Pérez, G., & López Arango, Y. (2015). Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios. *Producción + Limpia*, 10(2), 38. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n2a4>
- Arenas Osorno, C. Y. (2017). Implementación De Un Sistema Integral De Compostaje Para El Tratamiento De Los Residuos Orgánicos. In *UPB*. <http://e-journal.usd.ac.id/index.php/LLT%0Ahttp://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpdpb/article/viewFile/11345/10753%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.758%0Awww.iosrjournals.org%0Ahttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25246403%0Ahttp://www.pubmedcent>
- Arguello Arias, H. (1991). La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. *Agronomía Colombiana*, 8(2), 384–388.
- Arteaga, C., & Castaño, S. (2015). Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos, para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2015 [Universidad de Antioquia]. In *UdeA*. <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1405084&rs=13253328&hitno=1>
- Ballardo Matos, C. V. (2016). *Valorización de residuos sólidos orgánicos como sustrato para el crecimiento de Bacillus Thuringiensis mediante fermentación en estado sólido: aplicación a la fracción orgánica de residuos municipales para la producción de compost con efecto biopesticida*. 223.
- Banco Mundial, Ministerio de Vivienda, C. y T. de C., & MAG Consultoría S.A.S. (2021). *Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo* (Issue Informe de ejecución parcial: Documento del Componente 1. Documento técnico que incluye el diagnóstico y evaluación del tratamiento de residuos sólidos en Colombia).
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitan, F. (2005). *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*.
- Cardona Sánchez, J. D. (2018). Caracterización fisicoquímica de las pacas biodigestoras en el proceso de tratamiento de la barra de café generada en la Universidad de Antioquia

- [Universidad de Antioquia]. In *UdeA*. <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1525438&rs=13252368&hitno=1>
- CORANTIOQUIA. (2005). *Compendio sobre el estado de conocimiento y conservación del recurso flora en la jurisdicción de CORANTIOQUIA con base en la información proveniente de herbarios y fuentes secundarias*.
- Corlay Chee, L., Hernandez Tapia, A., Robledo Santoyo, E., Gomez Tovar, L., Maldonado Torres, R., & Cruz Rodriguez, J. A. (2011). 12790 - Calidad microbiológica de abonos orgánicos. *Resumos Do VII Congresso Brasileiro de Agroecologia*, 6(2), 3.
- Cuadros, S. (2008). Compostaje y biometanización. *Master En Ingeniería y Gestión Medioambiental*, 62.
- Documento CONPES 3874, Republica de Colombia. Departamento Nacional de planeación. (2016). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf>
- Holdridge, L. R. (1978). Ecología basada en zonas de vida. *Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas*, 1–235.
- Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167, 1 (2022). https://www.mendeley.com/catalogue/322e8324-b233-307e-a569-2d692b231d8f/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Ba6cf6b4f-e5f0-3249-b6c3-b3ad74ef9e88%7D
- IDEAM. (n.d.). *Fenomeno Niño y Niña - IDEAM*. Siac. Retrieved October 4, 2022, from <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ninoynina>
- Marquez-Benavides, L. (2016). *Residuos Sólidos: Un enfoque multidisciplinario*. I, 505. <https://www.researchgate.net/publication/308057682>
- McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory* (Second Ed). Blackwell science.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor Experiencias en América Latina*. www.fao.org/publications
- Organización Meteorológica Mundial. (2022). *El Niño/La Niña Hoy | Organización Meteorológica Mundial*. <https://public.wmo.int/es/el-niñola-niña-hoy>
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2014). *El Niño/ Oscilación del Sur*.
- Ossa-Carrasquilla, L. C., Correa-Ochoa, M. A., & Múnera-Porras, L. M. (2020). La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica.

- In *Produccion + Limpia* (Vol. 15, Issue 2, pp. 71–91). <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>
- 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 Antioquía. In *UdeA*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13416>
- Otoma, S., & Diaz, R. (2017). Life-cycle greenhouse gas emissions and economic analysis of alternative treatments of solid waste from city markets in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 70–87. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0380-0>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2006). Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos. *Directrices Del IPPC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 5(4), 1–9.
- Paradelo, R., Prieto, B., Sandu, R. G., Barral, M. T., & Moldes, A. B. (2010). Can stability and maturity be evaluated in finished composts from different sources? *Compost Science and Utilization*, 18(1), 22–31. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2010.10736930>
- Pastrana, L. (1996). Fundamentos De La Fermentación En Estado Sólido Y Aplicación a La Industria Alimentaria. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 1(3), 4–12. <https://doi.org/10.1080/11358129609487556>
- Posada Marín, A. M. (2015). *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimientos de San Antonio de Prado*. UdeA. <http://opac.udea.edu.co/cgi-olub/?infile=details.glu&luid=1428422&rs=13253362&hitno=4>
- Pulgarín Muñoz, C. E., & Wills Betancur, B. A. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Produccion + Limpia*, 14(1), 33–45. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a3>
- Qdais, H. A., Wuensch, C., Dornack, C., & Nassour, A. (2019). The role of solid waste composting in mitigating climate change in Jordan. *Waste Management & Research*, 37(8), 833–842. <https://doi.org/10.1177/0734242X19855424>
- Quiceno Botero, L. C. (2021). Macroinvertebrados asociados al proceso de digestion de la borra de cafe con residuos de alimento en pacas biodegestoras. In *UdeA*. Universidad de Antioquia.
- Rivera Espinosa, R., & Ossa Carrasquilla, L. C. (2017). Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México [Universidad Autonoma Chapingo]. In *Textual* (Issue 69). <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.69.005>
- Salazar, T. A. (2014). Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos

- sólidos orgánicos. *Revista de Investigación Universitaria*, 3(2), 74–84.
- Sepúlveda Villada, L. A., & Alvarado Torres, J. A. (2013). *Manual de Compostaje: Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá* (Primera Ed). <https://docplayer.es/68763867-Manual-de-compostaje.html>
- Silva Pérez, G. (2018). ¿Qué es la paca digestora Silva? Un reciclaje orgánico limpio y saludable. *Tecsisotecatl*, 10(23), 1–6. <https://www.eumed.net/rev/tecsistecat/n23/paca-digestora-silva.html>
- Soliva, M., & López, M. (2004). *Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. En Formación de técnicos para el tratamiento y gestión de lodos de depuradora*. www.upc.cat
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD]. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2022/Ene/informe_df_2020.pdf
- Thanh, H. T., Yabar, H., & Higano, Y. (2015). Analysis of the Environmental Benefits of Introducing Municipal Organic Waste Recovery in Hanoi City, Vietnam. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.025>
- Urriola, L., Castillo, M. K., & Vergara, D. M. (2021). Evaluación de la fitotoxicidad de abonos orgánicos comerciales usando semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y pepino (*Cucumis sativus*). *Revista Científica Semilla Del Este*, 1(2), 1–11. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/343/3432066002/html/>
- Vallejo Ocampo, U. A. (2016). *Análisis del impacto social y ambiental de la gestión integral de residuos sólidos en el municipio de aguadas, caldas*. Universidad de Manizales.
- Varnero M, M. T., Rojas A., C., & Orellana R, R. (2007). Índices De Fitotoxicidad En Residuos Orgánicos Durante El Compostaje. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(1), 28–37. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912007000100003>
- Velázquez Cigarroa, E., Ossa Carrasquilla, L. C., Jarquín Sanchez, N., & Victorino Ramírez, L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal*, 2(3). <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703108C>

- Yedla, S., & Sindhu, N. (2016). Assessment of alternative disposal methods to reduce greenhouse gas emissions from municipal solid waste in India. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 34(6), 553–563. <https://doi.org/10.1177/0734242X16643176>
- Yeo, D., Dongo, K., Mertenat, A., Lüssenhop, P., Körner, I., & Zurbrügg, C. (2020). Material Flows and Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential of Decentralized Composting in Sub-Saharan Africa: A Case Study in Tiassalé, Côte d'Ivoire. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 7229. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197229>
- Yeo, J., Chopra, S. S., Zhang, L., & An, A. K. (2019). Life cycle assessment (LCA) of food waste treatment in Hong Kong: On-site fermentation methodology. *Journal of Environmental Management*, 240, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.119>