



**Evaluación del proceso de pacas biodigestoras para el aprovechamiento de los  
residuos sólidos orgánicos, en el municipio de Carepa- Antioquia**

Julieth Andrea Ocampo Piedrahita  
Wilmer Cabrales Quinto

Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Bioquímicos

Asesor  
Juan Esteban Vásquez Bustamante, PhD

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Bioquímica  
2023

Cita	Ocampo y Cabrales [1]
<b>Referencia</b>	[1] J.A. Ocampo Piedrahita y W. Cabrales Quinto, “Evaluación del proceso de pacas biodigestoras para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, en el municipio de Carepa-Antioquia”, Trabajo de grado, Ingeniería Bioquímica, Universidad de Antioquia, Carepa, 2023
Estilo IEEE (2020)	



Centro de documentación de Ingeniería (CENDOI)

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

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

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano:** Julio Cesar Saldarriaga

**Jefe departamento:** Lina María González Rodríguez

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

## **Agradecimientos**

Queremos dar gracias a Dios por todas bendiciones recibidas y por poner en nuestro camino tantas personas maravillosas que creyeron y apoyaron nuestros sueños, que, de mencionarlos a todos, tendríamos que sacar otro documento, pero en estos últimos 6 meses queremos resaltar en especial a estas personas e instituciones que nos brindaron conocimiento, orientación y apoyo: A la universidad de Antioquia por crear un ambiente estudiantil sano, donde podemos desarrollar nuestras habilidades y competencias explorando, participando e interactuando con los temas que nos gustan y apasiona. Por apoyarnos con materiales, equipos y un espacio en el cual pudimos llevar a cabo la investigación.

A Jhon Henry Rosso Montoya, coordinador de la Sede de Estudios Ecológicos y Agroambientales, de la Universidad de Antioquia, quien nos motivó y contagio de su pasión por la investigación y la agricultura, convirtiéndose en el padrino del proyecto. Siempre te estaremos agradecidos por creer en nuestro potencial y esperamos en un futuro trabajar juntos.

Al mejor asesor del mundo Juan Esteban Vásquez, quien además de orientarnos y aconsejarnos, siempre estuvo pendiente de nosotros y de nuestra evolución, sabemos que fue un reto para el profe, porque nunca antes había trabajado con pacas biodigestoras, pero hizo un trabajo impecable con sus recomendaciones y observaciones, realmente es una gran persona y profesional.

A nuestro amigo Juan Carlos Ramírez quien nos ayudó a procesar 3t de residuos sólidos orgánicos y armar las pacas, sin tu ayuda esto no sucedería, amigo te estamos eternamente agradecidos.

Al equipo de Laboratorios Sede Carepa de la Universidad de Antioquia, en especial a la auxiliar Carolina, por su diligencia, disposición y amabilidad para atender cada una de nuestras prácticas de laboratorio.

A la familia Piedrahita por acogernos y cuidar bien de nosotros. Nos consintieron mucho y su comida es deliciosa, deberían probarla. Gracias por preocuparse por nosotros.

A la Papelería motivos y detalles la que más barato vende en Chigorodó por su donación de una formaleta de 70x70x70 cm.

A la legumbrera frutas y legumbres J.H por donarnos el material solido orgánico para el montaje de las pacas biodigestoras.

Al sistema de biblioteca por el prestamos del equipo de cómputo, durante estos últimos meses.

### **Mensaje**

¡Hola, somos Julieth Andrea Ocampo Piedrahita y Wilmer Cabrales Quinto!

Estamos muy felices de llegar hasta este punto, ¡esto es increíble estamos muy emocionados!  
Gracias por apoyarnos y cuidar bien de nosotros. Seguiremos esforzándonos por mejorar cada día  
y esperamos poder verte en la socialización de nuestro trabajo de grado.

¡Hasta pronto!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	14
<b>ABSTRACT</b>	15
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	16
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	18
Hipótesis estadística	18
<b>3. OBJETIVOS</b>	19
<b>3.1. Objetivo general</b>	19
<b>3.2. Objetivos específicos</b>	19
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	20
<b>4.1. Residuos sólidos orgánicos (RSO)</b>	20
<b>4.2. Compostaje</b>	21
<b>4.3. Paca biodigestora</b>	22
<b>4.4. Biopreparados microbianos</b>	25
<b>4.5. Abono orgánico</b>	25
<b>4.6. Aplicación de las pacas biodigestoras</b>	27
<b>5. METODOLOGÍA</b>	31
<b>5.1. Ubicación de la zona experimental</b>	31
<b>5.2. Recolección y adecuación de los residuos sólidos orgánicos</b>	31
<b>5.3. Diseño experimental</b>	34
<b>5.4. Montaje de pacas biodigestoras</b>	35
<b>5.5. Medición y monitoreo de parámetros fisicoquímicos</b>	39
<b>5.6. Toma y análisis de muestras</b>	41

<b>5.7. Caracterización del abono orgánico a partir de la determinación de parámetros fisicoquímicos</b>	44
<b>5.7.1 Porcentaje de humedad</b>	45
<b>5.7.2 Porcentaje de cenizas</b>	45
<b>5.7.3 Densidad real</b>	46
<b>5.7.4 Porcentaje de saturación</b>	46
<b>5.7.5 Conductividad eléctrica</b>	47
<b>5.7.6 Potencial de Hidrogeno</b>	48
<b>5.8 Caracterización microbiológica del abono orgánico</b>	48
<b>5.9 Prueba capacidad de germinación</b>	50
<b>5.10 Análisis estadístico</b>	50
<b>5.11 Socialización de los resultados con la comunidad</b>	51
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	52
<b>6.1. Montaje de pacas biodigestoras</b>	52
<b>6.2. Desmontaje de pacas biodigestoras</b>	53
<b>6.3. Parámetros fisicoquímicos monitoreados durante el proceso de pacas biodigestoras</b>	54
<b>6.3.1 Temperatura</b>	54
<b>6.3.1.1 Variación de la temperatura en pacas biodigestoras con VPB 70 cm<sup>3</sup></b>	55
<b>6.3.1.2 Variación de la temperatura en pacas biodigestoras con un VPB = 50 cm<sup>3</sup></b>	58
<b>6.3.1.3 Comparación de la variación temperatura en todos los tratamientos</b>	61
<b>6.3.2 Potencial hidrogeno (pH)</b>	63
<b>6.3.2.1 Comparación de la variación del pH en todos los tratamientos</b>	63
<b>6.3.2.2 Comportamiento de la variación de pH para VPB= 50 cm<sup>3</sup></b>	64
<b>6.3.2.3 Comportamiento de la variación de pH para VPB= 70 cm<sup>3</sup></b>	65
<b>6.3.3 Humedad</b>	66
<b>6.3.4 Altura</b>	68

<b>6.4 Caracterización del abono orgánico mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos</b>	72
<b>6.4.1 Cuantificación del contenido de humedad</b>	72
<b>6.4.2 Cuantificación del porcentaje de cenizas</b>	73
<b>6.4.3 Medición de la conductividad eléctrica</b>	73
<b>6.4.4 Capacidad de retención de agua</b>	74
<b>6.4.5 Densidad real</b>	75
<b>6.4.6 Potencial de Hidrogeno</b>	75
<b>6.5 Análisis microbiológico del abono orgánico</b>	76
<b>6.6 Prueba porcentaje de germinación del abono en semillas <i>Solanum lycopersicum</i></b>	85
<b>6.7 Análisis estadísticos</b>	86
<b>6.6 Socialización de resultados con las comunidades del municipio de Carepa-Antioquia</b>	90
<b>7. CONCLUSIONES</b>	95
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	98
<b>REFERENCIAS</b>	100
<b>ANEXOS</b>	103

## LISTA DE TABLA

TABLA I. CONCENTRACIONES MICROBIANAS PRESENTE EN EL INÓCULO “CONFIABONOS”	32
TABLA II DISEÑO EXPERIMENTAL	34
TABLA III TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES	35
TABLA IV CANTIDAD DE MATERIA ORGÁNICA FRESCA PARA EL LLENADO DE UN MOLDE	52
TABLA V CANTIDADES DEL MATERIAL ORGANICO AL INICIO Y FINAL DEL PROCESO	53
TABLA VI PORCENTAJE DE HUMEDAD EN BASE SECA DEL ABONO ORGANICO	72
TABLA VII CUANTIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE CENIZAS EN EL ABONO	73
TABLA VIII CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL ABONO	73
TABLA IX CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DEL ABONO	74
TABLA X DENSIDAD REAL	75
TABLA XI POTENCIAL DE HIDRÓGENO	75
TABLA XII PORCENTAJES DE GERMINACIÓN	85
TABLA XIII NORMALIDAD VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN	89
TABLA XIV IGUALDAD DE VARIANZA	90
TABLA XV PRUEBA ESTADISTICA T STUDENT	90

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Tulenapa, Carepa Antioquia	31
Fig. 2 Material orgánico recolectado	33
Fig. 3 Frutas y verduras contenidas con basura	33
Fig. 4 Material orgánico separado por su tipo	33
Fig. 5 Pesaje del material orgánico fresco	33
Fig. 6 Trituración de frutas y verduras	33
Fig. 7 Mezcla de materiales orgánicos	33
Fig. 8 Capa de ramas secas y delgadas en la base de la formaleta	36
Fig. 9 Capa de hojarasca secas, uniformemente distribuidas	37
Fig. 10 Capa de chipper, uniformemente distribuidas	37
Fig. 11 Capa de residuos sólidos, en proceso de compactación	38
Fig. 12 VPB 70 cm <sup>3</sup> , una vez retirada la formaleta	38
Fig. 13 VPB de 70 cm <sup>3</sup> , con volumen lleno.	38
Fig. 14 Medición de temperatura	40
Fig. 15 Medición de temperatura y pH	40
Fig. 16 Medición de la altura	40
Fig. 17 Medición de humedad	40
Fig. 18 Desmontaje de pacas biodigestoras	42
Fig. 19 Zarandeo del producto final de la paca	42
Fig. 20 Abono orgánico obtenido	43
Fig. 21 Material no convertido	43
Fig. 22 Muestras selladas y rotuladas	43
Fig. 23 Tamizado de muestras	43
Fig. 24 Preparación y secado de muestras	44
Fig. 25 Proceso de calcinación	45
Fig. 26 Montaje para llevar a cabo la densidad real	46
Fig. 27 Analisis porcentaje de saturación	46
Fig. 28 Análisis porcentaje de saturación	47
Fig. 29 Obtención del extracto para prueba de conductividad	48

Fig. 30 Medios de cultivo PDA y Agar Nutritivo.	49
Fig. 31 Siembra de muestras del abono orgánico	49
Fig. 32 Comportamiento de la temperatura paca T2 a diferentes profundidades	55
Fig. 33 Comportamiento de la temperatura paca T4 a diferentes profundidades	56
Fig. 34 Comportamiento de la temperatura paca T6 a diferentes profundidades	56
Fig. 35 Comportamiento de la temperatura paca T8 a diferentes profundidades	57
Fig. 36 Comportamiento de la temperatura paca T1 a diferentes profundidades	59
Fig. 37 Comportamiento de la temperatura paca T3 a diferentes profundidades	59
Fig. 38 Comportamiento de la temperatura paca T5 a diferentes profundidades	60
Fig. 39 Comportamiento de la temperatura paca T7 a diferentes profundidades	60
Fig. 40 Comportamiento de la variación de temperaturas para todos los tratamientos	61
Fig. 41 Comportamiento de la variación de pH para todos los tratamientos	63
Fig. 42 .Comportamiento de la variación de pH para los tratamientos T1, T3, T5 y T7	65
Fig. 43 Comportamiento de la variación de pH para los tratamientos T2, T4, T6 y T8	66
Fig. 44 Variación de la humedad en las diferentes pacas biodigestoras	67
Fig. 45 Comportamiento del cambio de altura para todos los tratamientos	68
Fig. 46 Diferencia de altura entre tratamientos	70
Fig. 47 Hundimiento en paca biodigestora T3	71
Fig. 48 Hundimiento en paca biodigestora T5	71
Fig. 49 Cambio estructura paca biodigestora T1	71
Fig. 50 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio	76
Fig. 51 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio	76
Fig. 52 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio	77
Fig. 53 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio	77
Fig. 54 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio	77
Fig. 55 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio	77
Fig. 56 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 1.	78
Fig. 57 Características microscópicas de Saccharomyces spp (levadura) presente en el abono orgánico, tratamiento 1.	79
Fig. 58 Características macroscópicas de hongos presentes en el abono orgánico, tratamiento 2.	79

Fig. 59 Características microscópicas de <i>Aspergillus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 2.	80
Fig. 60 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 3.	80
Fig. 61 Características microscópicas de <i>Saccharomyces spp</i> (levadura) presente en el abono orgánico, tratamiento 3.	81
Fig. 62 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 4.	81
Fig. 63 Características microscópicas de <i>Rhizopus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 4.	82
Fig. 64 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 5.	82
Fig. 65 Características microscópicas de <i>Rhizopus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 5.	83
Fig. 66 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 6.	83
Fig. 67 Características microscópicas de hongo presente en el abono orgánico, tratamiento 6.	84
Fig. 68 <i>Trichoderma spp</i> presente en abono orgánico, tratamiento 5	84
Fig. 69 Siembra de semillas de tomate, para cada uno de los abonos orgánicos evaluados	85
Fig. 70 Plántulas de tomate a los 12 días de siembras, tratamiento T8	86
Fig. 71 Plántulas de tomate a los 12 días de siembras, tratamiento T5.	86
Fig. 72 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el la velocidad de degradación	87
Fig. 73 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el porcentaje de germinación	88
Fig. 74 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el porcentaje de cenizas	88
Fig. 75 Explicación y funcionamiento del proceso de pacas biodigestoras, en instalaciones de la Institución educativa la Colombia	91
Fig. 76 Socialización de resultados obtenidos, en las instalaciones de la Institución educativa la Colombia	91
Fig. 77 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en la granja de la institución educativa la Colombia	91
Fig. 78 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en la granja de la institución educativa la Colombia	91

Fig. 79 Paca biodigestora construida por los estudiantes de la Institución educativa la Colombia	92
Fig. 80 Paca biodigestora construida por los estudiantes de la Institución educativa la Colombia	92
Fig. 81 Explicación y funcionamiento del proceso de pacas biodigestoras, en la caseta comunal Vereda el Talego	92
Fig. 82 Evaluación a asistentes, sobre los temas aprendidos y refrigerio, en la caseta comunal Vereda el Talego	92
Fig. 83 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego	93
Fig. 84 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego	93
Fig. 85 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego	93
Fig. 86 Paca biodigestora construida por los asistentes del taller de socialización de resultados, en la vereda el Talego	93
Fig. 87 Paca biodigestora construida por los asistentes del taller de socialización de resultados, en la vereda el Talego	94
Fig. 88 Asistentes del taller de socialización de resultados, con la comunidad rural el Talego	94

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>RSO</b>	Residuos Sólidos Organicos
<b>RSOP</b>	Residuos Sólidos Organicos Putrescibles
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cubico
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cubico
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>T</b>	Tratamiento
<b>VPB</b>	Volumen de una paca biodigestora
<b>VPB = 70 cm<sup>3</sup></b>	VPB dado por una formaleta con medidas de 70x70x70 cm
<b>VPB = 50 cm<sup>3</sup></b>	VPB dado por una formaleta con medidas de 50x50x50 cm
<b>T1</b>	Tratamiento con VPB = 50 cm <sup>3</sup> , sin adicción de microorganismos y sin trituración de residuos
<b>T2</b>	Tratamiento con VPB = 70 cm <sup>3</sup> , sin adicción de microorganismos y sin trituración de residuos sólidos orgánicos
<b>T3</b>	Tratamiento con VPB = 50 cm <sup>3</sup> , con adicción de microorganismos y sin trituración de residuos sólidos orgánicos
<b>T4</b>	Tratamiento con VPB = 70 cm <sup>3</sup> , con adicción de microorganismos y sin trituración de los residuos sólidos orgánicos
<b>T5</b>	Tratamiento con VPB = 50 cm <sup>3</sup> , sin adicción de microorganismos y con trituración de residuos sólidos orgánicos
<b>T6</b>	Tratamiento con VPB = 70 cm <sup>3</sup> , sin adicción de microorganismos y con trituración de residuos sólidos orgánicos
<b>T7</b>	Tratamiento con VPB = 50 cm <sup>3</sup> , con adicción de microorganismos y con trituración de residuos sólidos orgánicos
<b>T8</b>	Tratamiento con VPB = 70 cm <sup>3</sup> , con adicción de microorganismos y con trituración de residuos sólidos orgánicos

---

## RESUMEN

La gestión de residuos sólidos orgánicos es un aspecto crucial que ha ganado interés en los últimos años, como consecuencia de su inadecuada disposición y los problemas ambientales y de salubridad que estos generan. En las últimas décadas se han propuesto soluciones biotecnológicas para su aprovechamiento a pequeña escala, siendo la paca biodigestora Silva, reconocida a nivel social y científico como alternativa.

La presente investigación evaluó el proceso de pacas biodigestoras para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, en el municipio de Carepa- Antioquia, como alternativa de solución a la gestión de los residuos sólidos orgánicos. Se realizó un montaje experimental de 8 pacas biodigestoras, con y sin adición de microorganismos, donde se procesaron 3 toneladas de residuos sólidos orgánicos frescos con y sin trituración, en pacas de diferentes volúmenes, donde se evaluó el comportamiento del % humedad, pH, temperatura y cambios de altura, respecto a un tiempo de evolución de 4 meses.

La paca del grupo de volumen denominado VPB= 70 cm<sup>3</sup>, sin trituración de material orgánico y sin adición de microorganismo (T2) presentó el mejor comportamiento para el aprovechamiento de residuos, con velocidad de degradación alta, temperatura máxima cercana a los 50°C y contenido de humedad bajos respecto a los demás tratamientos de este grupo. De igual forma el tratamiento T1 del grupo de volumen denominado VPB=50 cm<sup>3</sup> presentó el mejor comportamiento para el aprovechamiento de residuos, con velocidades de degradación altas, temperatura máxima cercana a los 50°C, pero con contenido de humedad alto respecto a los demás tratamientos de este grupo.

**Palabras claves:** abono orgánico, inóculo microbiano, tamaño de partícula, volumen, pacas biodigestoras.

---

## ABSTRACT

The management of organic solid waste is a crucial aspect that has gained interest in recent years, as a consequence of its inadequate disposal and the environmental and health problems it generates. In the last decades, biotechnological solutions have been proposed for its use on a small scale, being the Silva biodigester bale, recognized at a social and scientific level as an alternative.

This research evaluated the biodigester bale process for the use of organic solid waste in the municipality of Carepa-Antioquia, as an alternative solution to solid waste management. An experimental set up of 8 biodigester bales was carried out, with and without the addition of microorganisms, where 3 tons of fresh organic solid waste were processed with and without shredding, in bales of different volumes, where the behavior of the % humidity, pH, temperature and changes in height were evaluated, with respect to an evolution time of 4 months.

The bales of the volume group called VPB= 70 cm<sup>3</sup>, without shredding of organic material and without addition of microorganisms (T2) presented the best performance for the utilization of residues, with high degradation speed, maximum temperature close to 50°C and low moisture content compared to the other treatments of this group. Similarly, treatment T1 of the volume group called VPB=0.5 m<sup>3</sup> presented the best performance for waste utilization, with high degradation rates, maximum temperature close to 50°C, but with high moisture content compared to the other treatments.

**Keywords:** organic fertilizer, microbial inoculum, particle size, volume, biodigester bales.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos sólidos orgánicos en el país se ha enmarcado históricamente dentro del servicio público de aseo, convirtiéndose en la alternativa de disposición más empleada. Durante su operación, se han presentado aspectos ambientales que generan preocupación, algunos de ellos son la contaminación de cuerpos de agua, con metales pesados y carga microbiana altas, producto de los lixiviados generados en el manejo de los residuos orgánicos. Tan solo en Colombia, el 54% de los residuos sólidos que se generan y terminan en rellenos sanitarios pertenecen a material orgánico, de acuerdo con informes del Banco Mundial. Estos a su vez necesitan grandes extensiones de terreno, donde se generan malos olores, deterioro del paisajismo y proliferación de insectos y roedores, sumado al hecho que los rellenos sanitarios en el país cuentan con un tiempo de vida útil corto [1].

La gestión de residuos sólidos orgánicos es un aspecto crucial que ha ganado interés en los últimos años, tan solo en departamentos como Antioquia, se impulsa la solución de estas problemáticas a través de la implementación de tecnologías que fomenten la separación de residuos en la fuente, con lo anterior se busca que los residuos orgánicos se queden en el hogar y no terminen en su mayoría en los rellenos sanitarios, algunas de estas tecnologías fomentadas por la gobernación del departamento, son la obtención de abonos orgánicos a partir de residuos sólidos orgánicos, con esto se busca un aprovechamiento del 80% de los residuos generados y que solo el 20% se lleve a sitios de disposición final [2].

Antioquia es un departamento de Colombia, rico en diversidad agropecuaria, que posee todos pisos térmicos [3], lo cual le permite generar una gran variedad de cultivos y alimentos, generalmente estas producciones se ubican en las zonas rurales del departamento, y en ocasiones se generan residuos que no pueden ser dispuestos por la empresa pública de aseo, o bien son zonas de difícil acceso para su recolección, por lo que la gobernación ha optado en incentivar el aprovechamiento de estos residuos [2].

---

Durante las últimas dos décadas, las pacas biodigestoras han sido popularizadas tanto a nivel social como investigativo, al ser un método para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, que no genera olores, lixiviados ni atrae roedores. El proceso implica la digestión de los residuos sólidos para generar productos de alto valor, como el abono orgánico, los cuales puede ser llevados a pequeñas escalas tanto en zonas urbanas como rural. Al ser una tecnología tan reciente, las publicaciones documentadas son en su mayoría estudios exploratorios y descriptivos y poco se ha explorado como influyen los factores, tamaño de partícula, adición de microorganismos y condiciones agroclimáticas, en la velocidad de degradación del abono. Por lo anterior este trabajo propone evaluar el proceso de pacas biodigestoras para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, a través de montajes experimentales y trabajo con la comunidad, en el municipio de Carepa- Antioquia.

---

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En América latina y el Caribe, la generación de residuos sólidos urbanos ha alcanzado un volumen considerable de 540.000 toneladas diarias, el cual se espera que siga en aumento en los próximos años, según estadísticas de la ONU. En países como Colombia, el 54% de los residuos sólidos que se generan y terminan en rellenos sanitarios pertenecen a material orgánico, de acuerdo a informes del Banco Mundial; la presencia de este material en los botaderos tiene impactos negativos en el medio ambiente y en la salud, por lo que se debería evitar su llegada a estos sitios y aprovecharlos de alguna manera, ya que su vida útil aún continúa [4].

El municipio de Carepa, no es ajeno a la problemática alrededor de la mala disposición de los residuos sólidos orgánicos, dado que los residuos que se generan llegan al relleno sanitario el tejar sin ningún tipo de aprovechamiento, son vertidos a ríos y quebradas, acumulados en sitios poblados o quemados a cielo abierto [5], lo que se relaciona principalmente a la falta de educación ambiental en la comunidad y programas continuos de aprovechamiento de residuos orgánicos.

Se ha evidenciado que la inadecuada disposición de los residuos sólidos orgánicos, genera problemas ambientales y de salubridad, que pueden tardar cientos de años para su recuperación, lo que nos impulsa a proponer soluciones biotecnológicas para el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos como su transformación en abono natural, a partir de un proceso de descomposición por fermentación que no genera olores ni vectores, y además que generen beneficios económicos y ambientales en las comunidades.

### *Hipótesis estadística*

La reducción del tamaño de partícula de los residuos sólidos orgánicos, la adicción de microorganismos al proceso y el volumen de las pacas biodigestoras, son factores que influyen tanto en el proceso de digestión del material orgánico (velocidad de degradación), como en la calidad del producto final que se obtiene.

---

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

Evaluar el proceso de pacas digestoras para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, en el municipio de Carepa- Antioquia.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Determinar los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que intervienen en el proceso de digestión de los residuos orgánicos, en pacas biodigestoras.
- Caracterizar el producto obtenido en las pacas biodigestoras, después de cuatro meses de descomposición de los residuos orgánicos.
- Evaluar la viabilidad del producto final de las pacas biodigestoras como abono orgánico, mediante la capacidad de germinación.
- Comparar la efectividad del uso de microorganismos facultativos anaerobios en pacas digestoras, para la reducción de tiempo de digestión.
- Socializar los resultados obtenidos en comunidades del municipio de Carepa.

---

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Residuos sólidos orgánicos (RSO)

Los residuos sólidos son todos aquellos materiales desechados, que resultan de un proceso de fabricación, transformación, utilización o consumo; se clasifican de acuerdo a su estructura química, origen y posible destino final. En la clasificación de los residuos sólidos, se tienen los residuos sólidos orgánicos putrescibles (RSOP), que son materiales naturales que no han sufrido una transformación natural significativa y aun sirven como fuente de energía para algunos microorganismos (bacterias, hongos y otros agentes biológicos), además cuentan con un grado de humedad que impulsa a su biodegradación y por ende a su transformación en abono [6].

Hacen parte del grupo de los RSOP, los residuos forestales, tales como residuos de poda, césped, chamizas, hojarasca y tallos; materiales naturales caracterizados por tener un alto contenido de carbono, debido a su naturaleza lignocelulósica, y bajos contenidos de humedad y nutrientes, que hacen que su degradación sea un poco más lenta. También, pertenecen al grupo de los RSOP, los residuos de animales, estiércoles, lodos biológicos, restos de comida, legumbres y frutas enteras o parte de estas, que, a diferencia de los residuos forestales, cuentan con un alto contenido de humedad y nutrientes [7]. Sin embargo, todo material orgánico está comprendido por moléculas de carbono, nitrógeno, fósforo, oxígeno, entre otros macro y micronutrientes esenciales para las plantas [8].

A diario se generan altas cantidades de material orgánico, debido al aumento en la demanda, procesamiento y consumo de recursos necesarios (agrícolas, ganaderos, forestales, etc.), para el ser humano; consecuencia del acelerado crecimiento poblacional y desarrollo social. En vista de que, de la cantidad de RSO que se generan, solo el 2% recibe un tratamiento adecuado para su aprovechamiento, un 15% es destinado para alimentación animal y el resto es dispuesto en vertederos o rellenos sanitario, se proyecta que para el año 2050 la cantidad de residuos sólidos orgánicos, se incrementaría en un 70% a nivel mundial, sino se hace algo al respecto [9].

---

La mala gestión de los RSO, consiste en la disposición de estos, mediante la técnica de relleno sanitario, acumulación en espacios abiertos o inapropiados sin ningún tipo de control, quemas a cielo abierto, enterramientos, vertimientos en ríos y arroyos, etc., y hace parte de las causas que conducen a la degradación ambiental y a los efectos adversos a la salud humana, principalmente por la propagación de vectores y enfermedades [6].

La técnica de relleno sanitario, suele ser la técnica más usada para la disposición final de los RSO, a causa de la falta de educación ambiental, en cuanto a tratamientos para la separación de residuos aprovechables y no aprovechables, desde la fuente. En este proceso, todos los residuos son enviados directamente al relleno sanitario, allí se descomponen, generando lixiviados, gases tóxicos y un material que no se puede reincorporar al ciclo biológico, dado que, este contiene compuestos tóxicos y metales pesados que pueden afectar el suelo, otros microorganismos y la calidad de vida de las personas [6].

Por tanto, han surgido algunas tecnologías ecológicas como el compostaje y las pacas biodigestoras, que permiten el aprovechamiento y reincorporación de los RSO en el ciclo biológico, como abono natural. Técnicas que poco a poco se han ido desarrollando, permitiendo la construcción de una cultura ambiental, en cuanto al manejo adecuado de los RSO y a la recuperación del volumen de material orgánico que es dispuesto de forma inadecuada.

#### **4.2. Compostaje**

El compostaje es una técnica que permite tratar los RSO mediante un proceso de digestión aerobia, para la obtención de un producto particulado sólido de gran utilidad en suelos, conocido como compost [10]. En esta técnica, el material orgánico es apilado por capas y sometido a un proceso de degradación en condiciones controladas de humedad, pH, temperatura y oxigenación, para favorecer la reproducción y el metabolismo de los microorganismos descomponedores aeróbicos [11]. Proceso que requiere de mayor monitoreo y control, por estar expuesto a bruscos cambios climáticos como la lluvia, frío, calor, y otros agentes externos, por requerir de un sistema de aireación ya sea mecánico o manual (volteo de material orgánico), y por ser un proceso donde

se pueden producir malos olores debido al contacto directo del oxígeno con el material orgánico [12].

### 4.3. Paca biodigestora

La paca biodigestora fue inventada por el colombiano Guillermo Silva Pérez, como una alternativa biotecnológica y ecológica para la gestión integral de los RSO; en la cual se transforma la materia orgánica en abono, bajo la acción de microorganismos facultativos fermentadores, que disponen los nutrientes de los residuos orgánicos, para ser aprovechados por las plantas [13]. Una alternativa con la que es posible empaquetar hasta 500 kg de material orgánico en cubos, los cuales se compacta a presión para disminuir los niveles de oxígeno, lixiviados, emisión de olores, liberación de gases de efecto invernadero y reducir la cantidad de espacio en donde se disponen los residuos.

Guillermo Silva, recomienda que, durante la construcción de las pacas, se incorporen los materiales vegetales como residuos de comida, frutas y legumbres, en el centro de la paca, y alrededor de estos los residuos forestales, con el fin de evitar el contacto directo de los residuos de fácil biodegradación con el oxígeno y, así, reducir los riesgos de pudrición, además para crear un biofiltro que evite el riego de lixiviados, alrededor de la paca [13]. La mezcla de material orgánico a transformar debe proporcionar una buena relación entre los principales nutrientes, para que haya una buena proliferación microbiana, dado que los microorganismos generalmente utilizan 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno; por tanto se considera que una relación carbono/nitrógeno entre los 25 y 35, es adecuada, para un buen proceso de transformación de la materia orgánica, dado que, durante el proceso fermentativo algunas fuentes de carbono se convierten en dióxido de carbono y el nitrógeno se mineraliza en nitratos [14].

En el interior de las pacas ocurre un proceso de digestión de moléculas complejas a sustancias simples, las cuales son aprovechadas por otros organismos para obtener su propia energía, y convertir la materia orgánica sencilla en materia inorgánica o mineral, la cual termina incorporándose al ambiente para ser aprovechada por algunos organismos que se encargan de sintetizar de nuevo la materia orgánica.

---

Se induce que el proceso que se da al interior de las pacas biodigestoras es una digestión anaerobia; un proceso bioquímico mediante el cual se degrada la materia orgánica en ausencia completa de oxígeno y bajo la acción de un grupo de bacterias específicas (bacterias hidrolíticas, acetogénicas, metanogénicas), favoreciendo metabolismos anaerobios como la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, que a su vez promueven la formación de productos como biogás (mezcla de gases), cuyo principal constituyente es el metano, y digestato que es una mezcla de minerales (N,P, K, Ca, etc.) [15].

Sin embargo, el proceso de transformación de la materia orgánica en pacas biodigestoras, no se da bajo condiciones totalmente anaerobias, dado a que las pacas son ensambladas y mantenidas durante este proceso a la intemperie, es decir, que el proceso se da en un sistema abierto y variable, que posibilita un intercambio de materia y energía entre las caras externas de la paca y el entorno [9]. Además, que la disponibilidad de oxígeno en el interior de la paca, es mínima, más no inexistente ; no es posible asegurar un ambiente interno totalmente libre de oxígeno, así se realicen esfuerzos por retirar el oxígeno presente, mediante la compactación a presión del material orgánico incorporado, pues alguna cantidad de oxígeno queda atrapado en el interior de la paca, ya sea por falta de una buena distribución espacial, gran tamaño de partícula de los materiales o por un mal prensado de estos.

Por tanto, se ha concluido que el proceso de digestión de la materia orgánica en pacas biodigestoras, difiere de los mecanismos aeróbicos y anaeróbicos, por llevarse a cabo bajo condiciones anaeróbicas no estrictas, y se asemeja más a un proceso de fermentación de sustrato en estado sólido, que favorece la reproducción de microorganismos facultativos y aerotolerantes [9].

La fermentación de sustrato en estado solido, se refiere a aquel proceso en que los microorganismos aprovechan el material solido organico, insoluble en agua y con cierto grado de humedad, como fuente de nutrientes para su crecimiento y desarrollo; proceso metabolico que se da bajo un ambiente con poca disponibilidad de oxigeno, posibilitando la conversion de azucares en acidos, gases o alcoholes [16].

---

En el proceso de fermentación sólida en pacas digestoras, se degradan los compuestos predominantes de los tejidos vegetales (carbohidratos), se producen ácidos orgánicos y alcoholes, como el ácido acético y el etanol, antisépticos que sanean la materia orgánica presente e inhiben la presencia de vectores y moscas, se generan bajos niveles de hidrógeno y dióxido de carbono, que se dispersan a la atmósfera y se obtiene como producto final un abono maduro y aprovechable [17]. La rapidez con la que se dé este proceso depende del tipo de sustrato y su composición, naturaleza de los microorganismos descomponedores, disponibilidad de oxígeno y las condiciones ambientales, causantes de la variación de los parámetros como pH, humedad, temperatura, [9].

En el proceso de fermentación de sustrato en estado sólido, la humedad es un parámetro fundamental que debe ser monitoreado y controlado, ya que sirve como indicador de la producción metabólica de los microorganismos. En procesos como estos, la humedad puede variar entre el 30% y 80% dependiendo del material orgánico utilizado y de las condiciones externas a las que se enfrenta (lluvia); un contenido bajo de humedad, menor al 30% puede producir un descenso en la actividad microbiana y por ende frenar el proceso de degradación del material orgánico, y un contenido de humedad mayor al 80% puede provocar descensos en la porosidad, y a su vez la contaminación bacteriana y malos olores, por el esparcimiento de oxígeno [18].

La variación de la temperatura en procesos fermentativos, es un indicador de la actividad y naturaleza microbiana y de la estabilidad del sustrato. En estos procesos, se pueden experimentar tres rangos óptimos de temperatura; temperaturas menores a 25°C, temperaturas entre 25°C a 45°C, temperaturas entre 45°C y 65°C, los cuales indican que la degradación de la materia orgánica es realizada por organismos psicrófilos, mesófilos y termófilos, respectivamente [18]. La variación de la temperatura es similar a la que se da en procesos aeróbicos, al inicio del proceso todo el material orgánico se encuentra a temperatura ambiente, luego hay un incremento de la temperatura debido al desprendimiento de calor ocasionado por la actividad metabólica de los microorganismos, las altas temperaturas ayudan a detener la actividad de microorganismos patógenos, después de que la materia orgánica se haya transformado en su totalidad, el proceso entra en una fase de enfriamiento, donde la temperatura empieza a descender para favorecer la actividad de microorganismos mesófilos, que ayudan a degradar la lignina y celulosa faltantes, hasta que el proceso se estabilice y se obtenga un producto maduro [10].

---

El pH es otro de los factores que inciden en el proceso de fermentación, su variación indica la naturaleza del sustrato, la presencia de productos generados por la degradación de la materia orgánica y la fase de estabilización del proceso; durante las primeras semanas de fermentación, el pH presenta una disminución debido a la generación de ácidos, como el acético y el láctico, y una vez avanza el proceso el pH, va aumentando hasta situarse en torno a un pH entre 7 y 8, indicando la fase de maduración del material o la inhibición de la actividad biológica a causa de las altas temperaturas. Un pH entre 3 y 6 siempre favorecerá el crecimiento de los microorganismos y la actividad fermentativa [18].

Los cambios de altura de las pacas digestoras, indican el avance del proceso de degradación de la materia orgánica, por ejemplo, un proceso lento se evidencia en la poca disminución de altura de la paca, o, por el contrario, un proceso ligero, es observado en la rápida disminución de altura de la paca.

#### **4.4. Biopreparados microbianos**

En el proceso microbiológico de degradación de la materia orgánica, actúan grupos de microorganismos presentes con funciones específicas. Con el fin de acelerar los procesos ecológicos como el compostaje y pacas biodigestoras, se han desarrollado inóculos microbiales, que son sustancias compuestas por un número significativo de microorganismos benéficos, como, bacterias, hongos y levaduras, principalmente de los géneros: *Lactobacillus*, *Saccharomyces*, *Lactococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptococcus*, *Aspergillus*, *Trichoderma* y hongos con capacidad lignocelulolítica. Estas sustancias son añadidas en el inicio de la fase más activa de los procesos microbiológicos, para producir una bioaumentación, ayudar a la rápida transformación de la materia orgánica, y asegurar el buen aprovechamiento de los residuos orgánicos [19].

#### **4.5. Abono orgánico**

El abono orgánico, es un sustrato transformado que contiene porcentajes mínimos de carbono orgánico oxidable total y una diversa composición de nutrientes biodisponibles para las plantas y organismos que benefician la calidad del suelo, lo que lo diferencia de los fertilizantes químicos o

sintéticos, que son sustancias elaboradas principalmente a partir de altas cantidades de compuestos artificiales como el potasio, nitrógeno y fosforo [20].

El abono orgánico derivado de la transformación de material vegetal, animal o mixto, debe ser sometido a diferentes ensayos, que permitan su aprobación para ser usado como fertilizante en los suelos. La norma técnica colombiana NTC 5167 (2011), establece los requisitos que debe cumplir el material orgánico obtenido a partir de residuos vegetales: un contenido de humedad máximo 35%, un contenido de cenizas máximo de 60%, un contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15%, un contenido de nitrógeno total entre el 2% a 3%, pH mayor de 4 y menor de 9, una densidad máxima de 0,6 g/cm<sup>3</sup>, relación carbono/nitrógeno en fase solida menor de 20 y lo más cercano a 15, tamaño de partícula menor o igual a 1,6 mm. Entre los ensayos que establece la norma, se encuentran las pruebas microbiológicas que demuestren que el material se encuentre libre o exento de fitopatógenos de los géneros *Fusarium spp.*, *Botrytis sp.*, *Rhizoctonia sp.*, *Phytophthora sp.*, y las medidas de cenizas, que permiten determinar la cantidad de minerales presentes en el abono orgánico [21].

Tales indicadores son importantes ya que determinan la calidad y madurez del abono orgánico obtenido durante el proceso de fermentación en pacas biodigestoras; la densidad representa la capacidad de adsorción, aireación y estructura del suelo, el tamaño de partícula indica el aspecto y la facilidad de manejo del producto, el color (negro o café) y el pH indica la estabilidad del producto, los bajos niveles de carbono indican el grado de avance de la degradación de la materia orgánica, el contenido de nitrógeno indica la cantidad de fracciones orgánicas (proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos) presentes en el abono, el porcentaje de humedad indica si el abono orgánico obtenido se encuentra entre el rango máximo de humedad para abonos orgánicos estables (45% al 60%), o dentro un valor optimo (35% al 45%), o si el producto obtenido es inestable por presentar contenidos de humedad menores al 35%, o es un producto de difícil manejo como puede ser los que presentan un contenido de humedad menor al 30% [21].

Por tanto, un buen abono orgánico, se caracteriza por la presencia de macro y micronutrientes como fosforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, sodio, en al menos 1%, por contenidos mayores de

carbono y nitrógeno en relación con los micronutrientes y un alto contenido de cenizas, que reflejan un buen proceso de mineralización de la materia orgánica.

#### **4.6. Aplicación de las pacas biodigestoras**

Desde que se dio a conocer el proceso ecológico de pacas biodigestoras, se han realizado esfuerzos para desarrollar y mejorar la técnica, esto a través de actividades prácticas, estudios y trabajos de grado.

Las pacas biodigestoras, han tenido gran acogida por parte instituciones educativas y universidades, entre ellas, la Universidad de Antioquia (ciudadela Universitaria), quien se ha centrado en realizar un estudio para la aplicación de una tecnología, que permita el aprovechamiento de residuos vegetales y de alimentos que se generan en la misma universidad; para efectos de este estudio, se realizaron seguimientos a parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, humedad, cambio en la altura, en pacas con un volumen de  $1\text{m}^3$ , ensambladas con residuos de poda verde y seca, hojarasca, chamizas, residuos de alimentos, cascara de frutas y verduras. El proceso de degradación de la materia orgánica para este estudio fue de seis meses, encontrándose mediante el análisis de parámetros microbiológicos, que, a este tiempo, todavía el abono se encuentra inmaduro, debido a la presencia de microorganismos mesófilos y termófilos. Los resultados de este proceso, permitieron determinar variaciones de temperatura entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , pH entre 3,5 y 7,5, y la obtención de un abono orgánico con un contenido de carbono orgánico oxidable total 21,8 %, un contenido de cenizas de 43,8 %, una densidad de  $0,42\text{ g/cm}^3$ , un contenido de humedad de 55.6%, nitrógeno orgánico total de 1,60%; resultados que afirman la viabilidad para el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante el proceso de pacas biodigestoras [18]. Dado que, casi todos los parámetros cumplieron con los estándares para utilizar el producto obtenido como abono, excepto el nitrógeno, este estudio sugiere utilizar sustratos vegetales verdes para favorecer la presencia de nitrógeno en el abono.

Un estudio realizado en un centro educativo del corregimiento AltaVista de Medellín, evaluó los aspectos fisicoquímicos, microbiológicos, ambientales y sanitarios de la descomposición residuos sólidos orgánicos mediante pacas biodigestoras, con el fin de reducir y controlar los

impactos negativos de los procesos de descomposición. Los residuos usados en este estudio pertenecieron a estiércoles y residuos de poda, depositados en pacas biodigestoras de 1m<sup>3</sup>. Ya que, entre las finalidades de este estudio, estaba el analizar la generación de gases de efecto, invernadero, las pacas contaron con un tubo de PVC con perforaciones en su base y en la zona central, el cual permitió la realización de muestreo de gases como el metano y el amoníaco y drenaje de lixiviados. El monitoreo de gases posibilitó determinar que se obtiene valores por debajo de los permisibles para generación de gases, tanto para metano como para amoníaco, confirmando que al interior de la paca se lleva a cabo un proceso de degradación aerobio que no genera estos gases como productos finales o los generan en niveles no detectables por los equipos, comparando el proceso con otras técnicas usadas, que generan estos gases en cantidades considerables mediante procesos de degradación anaerobia [22].

La Universidad Pedagógica Nacional, Sede Amatepec-México, también ha implementado el proceso de pacas biodigestoras, como una alternativa de manejo ecológico de los residuos orgánicos, a través de experiencias didácticas y desarrollo de talleres teórico prácticos en la institución, que parten desde la visualización de los problemas ambientales causados por la mala gestión de los residuos orgánicos, funcionamiento del proceso, microorganismos que participan en la transformación del material, cantidad y tipo de materia orgánica que se puede incorporar, parámetros fisicoquímicos que intervienen en el proceso, hasta la construcción, ensamble y desmontaje de las pacas digestoras [23].

En el municipio de Facatativá, Cundinamarca, se realizó una evaluación de aceleradores para el tratamiento de residuos orgánicos, a través de pacas digestoras; para fines del estudio se hizo una identificación de posibles aceleradores, de acuerdo a tres factores importantes, facilidad, preparación y eficiencia, por ende, fueron seleccionados el extracto de ortiga y humus de lombriz líquido. Aceleradores aplicados en pacas biodigestoras construidas a partir de residuos orgánicos como cascaras, residuos de frutas y verduras, cascaras de huevo, y residuos de jardín como hojarasca, ramas y hierbas. Los resultados de este estudio, determinan que el uso de este tipo de aceleradores en las pacas digestoras, no parece influir de manera significativa, en el proceso de degradación de la materia orgánica, los aceleradores líquidos como el extracto de ortiga genera un exceso de ácidos en combinación con la degradación de los residuos orgánicos, ralentizando el

proceso de digestión, ya que se crea una condición no favorable para la flora microbiana que interviene en este tipo de procesos [24].

En la región de Urabá, la tecnología de pacas biodigestoras ha sido aplicada principalmente en espacios educativos; entre estos, instituciones pertenecientes al municipio de San Pedro de Urabá, en donde se ha implementado esta técnica solo con el fin de promover el reciclaje de nutrientes orgánicos (hojarasca, residuos de poda y postcosecha, residuos de alimentos etc.), que se generan en las instituciones y que algunos terminan siendo incinerados. Entre las dos principales instituciones del municipio de San Pedro, se realizaron 10 pacas digestoras, cinco pacas con un volumen de 40 cm<sup>3</sup>, una paca con un volumen de 60 cm<sup>3</sup> y cuatro pacas con un volumen de 80 cm<sup>3</sup>, que permitieron el reciclaje de más o menos 2900 kg de residuos orgánicos, cálculos que los hicieron según lo expuesto por Carrasquilla; durante este proceso de reciclaje, no fueron evaluados los principales parámetros fisicoquímicos en las pacas digestoras realizadas, por lo que se desconoce el comportamiento del proceso y la calidad del abono orgánico obtenido [25].

Las pacas biodigestoras, también se han desarrollado en instituciones educativas rurales del municipio de Dabeiba, a través de un estudio comparativo con el proceso de compostaje, dirigido por un estudiante de la Universidad Pontificia Bolivariana; en este estudio se determinó estadísticamente la cantidad de residuos generados por día en la institución, mediante la recolección diaria de los residuos por 20 días, se realizó el montaje de las pilas de compostaje y las pacas biodigestoras, se hizo seguimiento al proceso de degradación del material orgánico durante 60 días, mediante la cuantificación de parámetros como el pH, humedad y temperatura, cada 5 días y en la parte central de cada paca. Las pacas evaluadas fueron de un metro cubico de capacidad, mientras que las pilas de compostaje se realizaron de un metro altura por un metro de diámetro; ambas técnicas contaron con la misma cantidad y tipo de residuos orgánicos triturados (cascaras frutas y verduras, cascara de huevo, restos de frutas, cascara de café, estiércol bovino, hojarasca, restos de poda) [13]. Los resultados de este estudio, muestran que durante los dos meses de evaluación para pacas digestoras, la temperatura oscilo entre 25°C y 60°C, se obtuvo pH entre el rango 5 a 8, y un contenido de humedad entre el 40% y 74%, mientras que en el compostaje la temperatura varía entre el 25°C y 43°C, el pH vario entre 5 y 8, y la humedad estuvo entre el 33% y 76%, siendo necesario adicionar mayor cantidad de agua durante el proceso de compostaje [13]. Este proceso

---

en pacas biodigestoras fue tomado como un proceso de digestión aerobia, que varía del proceso de compostaje por encontrarse comprimido y no apilado, por ocupar menos espacio, no generar mal olor, ni vectores, y no estar expuesto a diferentes cambios ambientales (calor, frío, lluvia) y a ataques por organismo externos, y ser más eficiente en la obtención de abono orgánico en cuanto a la conversión de residuos. Estudio que evidencia que materiales que tienen alto grado de biodegradabilidad, como lo son los residuos de alimentos, junto con residuos forestales triturados, requieren de poco tiempo (2 meses) para su conversión en abono orgánico.

Los estudios mencionados anteriormente, demuestran que la evaluación del proceso de pacas biodigestoras, se ha centrado principalmente, en el análisis de la variación de los parámetros físico químicos (pH, temperatura, humedad, peso, volumen), generación de lixiviados, malos olores y liberación de gases, evaluación del producto obtenido durante el proceso en cuanto a calidad, características fisicoquímicas, microbiológicas y nutricionales.

En el municipio de Carepa-Antioquia, las alternativas para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, como las pacas biodigestoras son poco conocidas y no utilizadas. Esto, impulsó este estudio para evaluar el proceso de digestión de residuos orgánicos en pacas biodigestoras, bajo las condiciones ambientales del municipio y con material orgánico generado por la misma comunidad, que permita la identificación de las mejores condiciones para llevar a cabo el proceso en esta zona.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Ubicación de la zona experimental

La investigación se realizó en Tulenapa-Carepa, en la sede de estudios Ecológicos y Agroambientales de la Universidad de Antioquia, seccional Urabá. Con coordenadas 7°46'29'N 76° 34'57' W y altitud 30 m. La zona reporta porcentajes de humedad entre el 85% y 90% con temperaturas promedio comprendidas entre 23°C y 32°C.



Fig. 1 Tulenapa, Carepa Antioquia

Nota.fuente <https://es.weatherspark.com/y/21554/Clima-promedio-en-Carepa-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

### 5.2. Recolección y adecuación de los residuos sólidos orgánicos

El material orgánico usado en la presente investigación, pertenece a los residuos sólidos orgánicos putrescibles, como cascara y pulpa de mango, hojas de repollo, hojas de lechuga, hojas y tallos de apio, ramas de cebolla larga, papayas enteras, cascara de maracuyá, cascara y naranjas enteras, cascara de frijol, cascara de choclo, yuca, papa, pepinos, entre otros, los cuales se pueden apreciar en las Fig 2, Fig 3 y Fig 4, residuos obtenidos de las principales legumbres del sector

urbano del municipio de Carepa-Antioquia, y residuos forestales, como la hojarasca y material orgánico particulado derivado de residuos de poda y postcosecha del coco (chipper), adquiridos de las zonas verdes de la Universidad de Antioquia, sede de estudios ecológicos y agroambientales Tulenapa, en Carepa.

Los residuos orgánicos putrescibles, se recolectaron en costales un poco después de que estos fueran escogidos para su rechazo en cada una de las legumbrerías, y se transportaron en un motocarro hasta las instalaciones de la universidad, sede Tulenapa, para su adecuación y disposición en las pacas digestoras. Con el fin de obtener la cantidad de material orgánico necesaria para realizar cada uno de los tratamientos el diseño experimental, los residuos fueron recolectados dos veces por semana durante un mes.

El material orgánico descargado en las instalaciones de la universidad, fue separado de la basura con la que estaba contenido en los costales (ver Fig 3), apilado por tipo de legumbre y fruta (ver Fig 4), con el fin de caracterizar los residuos orgánicos obtenidos. Una vez los residuos se encontraban libres de basura y separados, estos se dispusieron en un costal, para su pesaje en una báscula colgante tipo reloj (Fig 5).

El material orgánico a procesar, que requería de trituración o inoculación, se pasó por un triturador de residuos orgánicos TRAPP, JTR200G, a motor de gasolina (Fig 6), y se adiciono a algunos tratamientos que requerían el uso de inóculo microbiano (Fig 7), un inóculo microbiano de la marca “Confiábonos”, sin modificación genética, a los residuos sólidos orgánicos. Producto, que fue adicionado a la mezcla de residuos con una regadera, mientras estos se iban mezclando con ayuda de una pala. Las diluciones del producto dependieron de la cantidad de residuos a degradar.

TABLA I  
CONCENTRACIONES MICROBIANAS PRESENTE EN EL INÓCULO “CONFIABONOS”

Microorganismo	UFC/ml
<i>Lactobacillus Cassei</i>	1.0 x10 <sup>9</sup>
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2.0 x10 <sup>9</sup>
<i>Rhodopseudomona palustris</i>	2.5 x10 <sup>9</sup>



Fig. 2. Material orgánico recolectado



Fig. 3. Frutas y verduras contenidas con basura



Fig. 4 Material orgánico separado por su tipo



Fig. 5 Pesaje del material orgánico fresco



Fig. 6 Trituración de frutas y verduras



Fig. 7 Mezcla de materiales orgánicos

### 5.3 Diseño experimental

Con el objetivo de realizar la evaluación del proceso de pacas biodigestoras para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, en el municipio de Carepa- Antioquia, inicialmente, se planteó un diseño experimental factorial  $2^3$ , compuesto por ocho corridas experimentales (TABLA III); en el diseño experimental se establecieron tres factores principales: volumen de la paca digestora, tamaño de partícula de los residuos orgánicos y adición de microorganismos al proceso de digestión de la materia orgánica, con dos niveles cada uno, alto y bajo, como se muestra en la TABLA II. Además, se definieron como variables de respuesta, la velocidad de crecimiento, el porcentaje de germinación, porcentaje de cenizas, debido a su importancia en la definición de la calidad del abono orgánico, según lo establece la NTC 5167 (2011).

Los tratamientos experimentales, contaron con un contenido de material orgánico como legumbres y frutas del 50% y material vegetal como chiper y hojarasca del 50 %.

TABLA II  
DISEÑO EXPERIMENTAL

Factores	Niveles del factor
Tamaño de partícula de los residuos orgánicos	Nivel bajo: tamaño de partícula menor o igual a 3 cm
	Nivel alto: sin reducción de tamaño de partícula
Volumen de la paca biodigestora (VPB)	Nivel bajo: 50 cm <sup>3</sup>
	Nivel alto: 70 cm <sup>3</sup>
Adicción de microorganismos al proceso	Nivel bajo: Sin adición de microorganismos
	Nivel alto: Con adición de microorganismos

TABLA III  
TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

Tratamiento	Descripción
T1	SRTP, 50 cm <sup>3</sup> VPB, SAM.
T2	SRTP, 70 cm <sup>3</sup> VPB, SAM.
T3	SRTP, 50 cm <sup>3</sup> VPB, AM.
T4	SRTP, 70 cm <sup>3</sup> VPB, AM.
T5	≤ 3 cm TP, 50 cm <sup>3</sup> VPB, SAM.
T6	≤ 3 cm TP, 70 cm <sup>3</sup> VPB, SAM.
T7	≤ 3 cm TP, 50 cm <sup>3</sup> VPB, AM.
T8	≤ 3 cm TP, 70 cm <sup>3</sup> VPB, AM.

Donde TP es el tamaño de partícula, SRTP sin reducción del tamaño de partícula, VPB volumen paca biodigestora, SAM sin adición de microorganismos y AM adición de microorganismo.

Cabe señalar, que el volumen de la paca biodigestora descrito como VPB= 50 cm<sup>3</sup> y VPB= 70 cm<sup>3</sup>, indican que la evaluación fue a realizada con un volumen mayor y un volumen menor, con la ayuda de moldes de diferentes tamaños, es decir, que VPB= 50 cm<sup>3</sup> representa el volumen del material orgánico fresco, depositado en una formaleta con medidas de 50 cm en cada uno de sus lados, mientras que VPB= 70 cm<sup>3</sup>, representa el volumen del material orgánico fresco, depositado en una formaleta con medidas de 70 cm en cada uno de sus lados.

#### 5.4 Montaje de pacas biodigestoras

El montaje experimental de las pacas biodigestoras se realizó utilizando dos moldes de maderas uno 50x50x50 cm<sup>3</sup> y otro de 70x70x70 cm<sup>3</sup>, los cuales se llenaron capa a capa hasta ocupar la totalidad de su volumen. Se utilizaron 4 tipos de capas las cuales se describen a continuación:

- Capa 1: ramas secas y delgadas
- Capa 2: hojarasca (hojas secas)

- Capa 3: chipper (residuo de poda de la postcosecha del coco)
- Capa 4: residuos como frutas y verduras (con o sin adición de microorganismos y/o con trituración o sin trituración).

### METODOLOGIA USADA PARA ARMAR LAS PACAS BIODIGESTORAS

#### Instalación de la formaleta y adición de la capa 1

Se ubico la formaleta en el lugar estipulado para el aprovechamiento de residuos orgánicos, siendo este plano, estable y bajo techo. Dentro de la formaleta se colocó la capa 1, cubriendo toda el área que demarca el molde (ver Fig 8), lo anterior se realizó para disminuir el riesgo de generación de lixiviados y evitar el contacto directo dentro del material orgánico y las baldosas.



Fig. 8 Capa de ramas secas y delgadas en la base de la formaleta

#### Adición de la capa 2

Se agrego la capa 2 en la cual se garantizó que el material cubriera toda el área disponible (Fig 9), para luego ser compactado con la ayuda de los pies. Las hojas actúan como biofiltro, y minimizan el contacto de los residuos con el aire. De esta forma se evita que se genere un proceso de pudrición y emisión de malos olores.



Fig. 9 Capa de hojarasca secas, uniformemente distribuidas

### Adición de la capa 3

Se añadió la capa 3, garantizando que el material cubriera toda el área disponible (Fig 10), para luego ser compactado con la ayuda de los pies. Este material tiene diversas funciones en la paca biodigestoras, pero se resalta su fuente rica en carbono y su diversidad microbiana.



Fig. 10 Capa de chipper, uniformemente distribuidas

### Adición de la capa 4

Se incorpora la capa 4 en el centro de la formaleta en forma de campana (ver Fig 11), de tal manera que no toque los bordes, para esto se debe bordear los límites de formaleta con más hojarasca y así proceder a compactar el material.



Fig. 11 Capa de residuos sólidos, en proceso de compactación

La adición de las capas 2, 3 y 4, se repitieron sucesivamente hasta ocupar el volumen total deseado (ver Fig 12) y finalmente se retiró el molde (Fig 13).



Fig. 13 VPB de 70 cm<sup>3</sup>, con volumen lleno.



Fig. 12 VPB 70 cm<sup>3</sup>, una vez retirada la formaleta

---

### 5.5. Medición y monitoreo de parámetros fisicoquímicos

Los parámetros físicos químicos monitoreados, fueron la temperatura, pH, humedad y cambio en la altura de las pacas biodigestoras, por ser los parámetros que más influyen en el proceso de digestión de la materia orgánica. El monitoreo de estos parámetros, en las ocho pacas biodigestoras construidas, se realizó durante 4 meses, tres veces a la semana, día de por medio (martes, jueves, sábados), en un horario entre las 12 pm a 3pm.

Las mediciones inicialmente se realizaron en la cara superior, frontal, lateral izquierdo y derecho, de cada paca, pero debido a la similitud de los datos y a los riesgos de desarme de las pacas por la introducción de equipos, se optó por realizar las mediciones de pH, temperatura y humedad, solo en la cara superior de la paca y a tres profundidades diferentes (40 cm, 20 cm, 10 cm), y en la zona central de cada paca, por ser la zona donde se empaqueta el material orgánico de fácil degradación y por ende el lugar donde se evidencia la mayor actividad metabólica.

La temperatura a 40 cm de profundidad, se midió por medio de un termómetro tipo punzón de 40 cm (ver Fig 14), que reporta la temperatura en grados Celsius, mientras que la temperatura a los 10 cm y 20 cm de profundidad, se midió con un medidor de pH para suelo 4 en 1, al igual que el pH (Fig 15), la humedad se cuantificó mediante un termohigrómetro digital (Fig 17), y la altura se determinó con ayuda de un flexómetro (Fig 16).



Fig. 14 Medición de temperatura



Fig. 15 Medición de temperatura y pH



Fig. 16 Medición de la altura



Fig. 17 Medición de humedad

---

## 5.6. Toma y análisis de muestras

Las muestras del producto final de cada tratamiento, se obtuvieron a partir del desensamblé de cada una de las pacas biodigestoras. Cumplidos los 4 meses de degradación del proceso, se procedió a desmontar cada paca con ayuda de una pala (Fig 18), luego el material obtenido se pasó por una zaranda (Fig 19) con el fin de separar el material convertido (partículas de menor tamaño Fig 20) del material no convertido (Ver Fig 21).

Durante este proceso se realizó un paso adicional, se pesó tanto el material no convertido (hojarasca) como el material convertido, con el fin de obtener datos que permitieran conocer el rendimiento del proceso en cuanto la obtención de abono orgánico.

Las muestras obtenidas del producto final (abono orgánico), en cada uno de los tratamientos, fueron analizadas en las instalaciones del laboratorio de la universidad de Antioquia, Sede Tulenapa, en Carepa- Antioquia, análisis que involucro la determinación de algunos de los parámetros que influyen en la calidad del abono orgánico, y la identificación de algunos microorganismos presentes en el abono.



Fig. 18 Desmontaje de pacas biodigestoras



Fig. 19 Zarandeo del producto final de la paca

En la obtención de las muestras, se tomó una cantidad significativa del material convertido, y se hizo pasar a través de un colador, con el fin de obtener una muestra tamizada (Fig 23). De cada tratamiento, se tomó un aproximado de 150g de muestras, las cuales se dispusieron en bolsas plásticas herméticas para evitar perturbaciones contaminantes en la misma, cada muestra fue sellada, rotulada y refrigerada, hasta su análisis (Fig 22).



Fig. 20 Abono orgánico obtenido



Fig. 21 Material no convertido



Fig. 23 Tamizado de muestras



Fig. 22 Muestras selladas y rotuladas

### 5.7. Caracterización del abono orgánico a partir de la determinación de parámetros fisicoquímicos

El producto final obtenido en cada paca biodigestora, se caracterizó a partir del porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, densidad real, porcentaje de saturación, conductividad eléctrica y el potencial de hidrogeno, parámetros que influyen en la calidad del abono orgánico, según lo registra la NTC 5167 (2011).

Para la obtención de valores de cada parámetro, se realizaron pruebas fisicoquímicas a muestras del producto final de cada tratamiento, siguiendo las metodologías de análisis de suelos y material vegetal, descritas en la misma norma NTC5167 [21].

Inicialmente, se realizó la preparación de las muestras, por lo que se hizo pasar una cantidad considerable de material a través de colador y se sometió a un proceso de secado (Fig 24), durante 24 h a una temperatura de 80°C, esto aplicado a cada una de las muestras (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8).



Fig. 24 Preparación y secado de muestras

### 5.7.1 Porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad se determinó, a partir de 20g de muestra, la cual se depositó en un crisol, para someterla a un proceso de secado durante 24 horas a una temperatura de 70°C. El porcentaje de humedad se calculó a partir de la Ecuación (1).

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

### 5.7.2 Porcentaje de cenizas

El porcentaje de cenizas, se determinó por el método de pérdidas de volatilización, para ello se tomó el material obtenido en el proceso de secado del paso anterior, y se llevó a la mufla (Fig 25) en un crisol, durante 2 horas a 600 °C. Se registro el peso del material antes y después de ingresar a la mufla, y se determinó el porcentaje de cenizas a partir de la Ecuación (2).

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



Fig. 25 Proceso de calcinación

### 5.7.3 Densidad real

La densidad real se cuantifico, con base a la masa de producto que se deposita libremente por unidad de volumen. En este paso, se tomó una probeta de vidrio de 50 cm<sup>3</sup> de capacidad (Fig 26), previamente pesada, y se dejó caer sobre esta una cantidad suficiente de muestra, que permitiera obtener un volumen alrededor de 30 cm<sup>3</sup> en la probeta. Este paso se realizó por triplicado para cada muestra. Se registraron los valores del peso en gramos de la probeta vacía (W1), el peso en gramos de la probeta con material (W2) y el volumen alcanzado por el material en la probeta (V), y se calculó la densidad real a partir de la Ecuación (3).

$$Densidad\ real = \left[ \frac{W2-W1}{V} \right] \quad \text{Ecuación (2)}$$



Fig. 26 Montaje para llevar a cabo la densidad real

### 5.7.4 Porcentaje de saturación

En la determinación de porcentaje de saturación, se tomaron alrededor de 50g de muestra y se depositaron en un recipiente plástico de boca ancha, luego se le añadió pequeños volúmenes de

agua destilada utilizando una probeta. A la mezcla obtenida, se añadió agua, se agito y se consolido hasta llegar al punto de saturación, el cual se evidencio por un brillo metálico sobre la superficie como se muestra en la Fig 27 y Fig 28.

Se registro el volumen en ml de agua utilizados para alcanzar el punto de saturación (A) y el peso en gramos de la muestra (Wm), y se calculó el porcentaje de saturación a partir de la Ecuación (4).

$$\%saturación = \left[ \frac{Ax100}{Wm} \right] \left[ \frac{100-\%humedad}{100} \right] \quad \text{Ecuación (4)}$$



Fig. 27 Análisis porcentaje de saturación



Fig. 28 Análisis porcentaje de saturación

### 5.7.5 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, se cuantifico a partir de la mezcla obtenida en la determinación del punto de saturación, sometiendo la mezcla a centrifugación durante 10 min (Fig 29), previamente traspasada en tubo falcón, con el fin de obtener el extracto. Una vez obtenido el extracto, se procedió a medir su conductividad eléctrica.

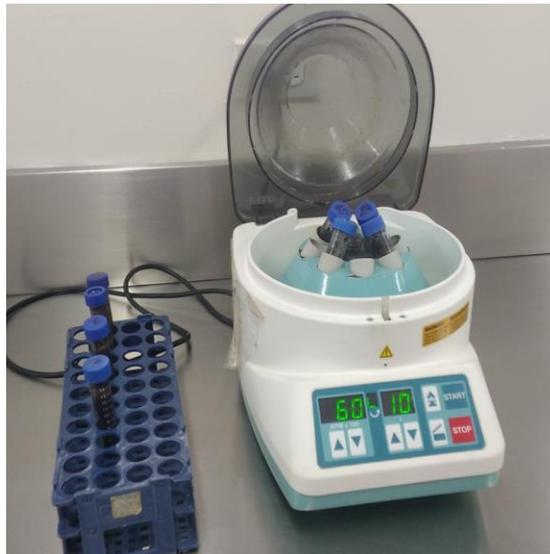


Fig. 29 Obtención del extracto para prueba de conductividad

### 5.7.6 Potencial de Hidrogeno

La medición de pH en cada una de las muestras, se hizo con un medidor de pH para suelos, y se comprobó de forma cualitativa con la cinta indicadora pH, en el laboratorio.

### 5.8 Caracterización microbiológica del abono orgánico

Se realizó un análisis microbiológico, a muestras del producto final del proceso de pacas biodigestoras, a partir de la preparación de dos medios de cultivo sólido (Fig 30).

Se tomó un gramo de suelo en cada abono orgánico evaluado, y se diluyeron en 10 ml de agua destilada, que luego se sometió a agitación en un vortex por 30 segundos. Pasado este tiempo se tomó 1 ml de muestra por cada abono orgánico analizado y se depositó en una caja Petri con medio de cultivo Agar Nutritivo para favorecer el crecimiento de bacterias, mientras que en otra caja de Petri se depositó otro 1ml de muestra con medio de cultivo Potato Dextrosa Agar (PDA) (Fig 31), para favorecer la proliferación de hongos. Este proceso se repitió para cada abono orgánico analizado, siendo 16 el número total de cajas de Petri sembradas.

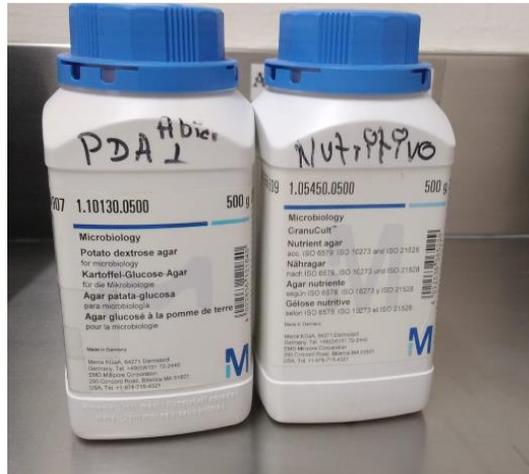


Fig. 30 Medios de cultivo PDA y Agar Nutritivo.

Las bacterias se sometieron a incubación a 37°C en periodo de 24 horas, mientras que los hongos se dejaron a temperatura ambiente en condiciones de poca luz por 5 días.



Fig. 31 Siembra de muestras del abono orgánico

- Identificaciones morfológicas de las bacterias: se realizó una tinción de Gram para determinar las bacterias Gram positivas y Gram negativas presentes en la muestra. Se comparo su morfología con ayuda de un microscopio óptico compuesto, y se observaron las muestras en el objetivo x100 con ayuda del aceite de inmersión.

- Identificaciones morfológicas de los hongos: se realizó una tinción con azul de metileno para resaltar la morfología de los hongos presentes en las muestras de abono orgánico. Las muestras se observaron con un microscopio óptico compuesto, en el objetivo 40x sin ayuda del aceite de inmersión.

### **5.9 Prueba capacidad de germinación**

El producto obtenido después de los cuatro meses de digestión a través de las pacas biodigestoras, se usó para evaluar su efectividad en procesos de germinación, para ello se utilizó semillas de rápido crecimiento y de mayor uso en los hogares, como *Solanum lycopersicum* (tomate).

La prueba se llevó a cabo con 216 semillas de tomate adquiridas en una casa comercial, las cuales se dividieron en 27 semillas para ser evaluadas junto con los abonos orgánicos o tratamientos. Para la siembra se utilizaron bandejas de germinación que posteriormente se llenaron con los diferentes abonos. La profundidad de siembra fue el doble del tamaño de semilla y cada tratamiento tuvo tres replicas, donde se sembraron 9 semillas por hileras para un total de 27, lo anterior se estableció para un periodo de 12 días de evaluación.

### **5.10 Análisis estadístico**

Se realizó un análisis estadístico, del efecto de los factores propuestos en diseño experimental, disminución del tamaño de partícula, adición de microorganismos y volumen de la paca biodigestora, sobre las variables de respuesta, velocidad de degradación, % de germinación, % de cenizas, % de conversión, mediante el software estadístico Statgraphics®. También, se comparó el efecto que tiene el adicionar microorganismos al proceso, sobre la velocidad de degradación, a través del programa estadísticos Tstudent.

---

### **5.11 Socialización de los resultados con la comunidad**

Para la socialización de resultados parciales de la evaluación del proceso de pacas biodigestoras, inicialmente se escogieron dos comunidades del municipio de Carepa-Antioquia, una comunidad rural, al ser la población con menor cobertura del servicio de recolección de residuos sólidos, y una comunidad educativa urbana, por ser un entorno donde permite el aprendizaje y generación de nuevos conocimientos, desde edades tempranas.

Por tanto, fue necesario la preparación de dos talleres teórico prácticos, que fuesen didácticos acorde a las edades de los posibles asistentes. Talleres en los que se involucraron temas de gran importancia; partiendo desde la observación de problemas ambientales generados por la mala gestión de los residuos sólidos orgánicos, explicación y funcionamiento del proceso de pacas biodigestoras, como por ejemplo cantidades y tipo de material orgánico que se puede procesar, microorganismos, fases y variables que intervienen en el proceso, características del producto final que se obtiene, hasta el proceso de construcción de las pacas.

Talleres que permitieron brindar estrategias para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos y enseñar por medio de actividades lúdicas y prácticas, cómo construir una paca biodigestora, a partir de los resultados obtenidos en esta evaluación.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1. Montaje de pacas biodigestoras

La TABLA IV, muestra la cantidad de material orgánico que es necesario para armar pacas biodigestoras con medidas de 70 cm en cada una sus caras, y 50 cm, esto para un contenido de residuos de hojarasca y chipper del 50% y frutas y legumbres del 50%.

Se encontró, que la cantidad del material necesario para el llenado de cada paca, depende de si la materia orgánica fresca es triturada o no. Lo anterior se demuestra a partir de los valores de la cantidad material orgánico registrados en la TABLA IV, en este caso los tratamientos T5 y T7, T6 y T8, tratamientos en el que la materia orgánica fresca fue sometida a un proceso de trituración, fueron los registraron una mayor cantidad de material para el llenado de cada formaleta.

Para llevar a cabo el diseño experimental propuesto, fue necesaria la recolección de alrededor 1,5 toneladas de residuos como frutas y legumbres, misma cantidad requerida para residuos como hojarasca y chipper, ya que cada uno de los tratamientos estuvieron contenidos por el 50% de cada tipo de residuo.

TABLA IV  
CANTIDAD DE MATERIA ORGÁNICA FRESCA PARA EL LLENADO DE UN MOLDE

VPB	Tratamiento	Cantidad de material orgánico (kg)	Promedio Cantidad de material orgánico (kg)
50 cm <sup>3</sup>	T1	101	108
	T3	106	
	T5	112	
	T7	115	
70 cm <sup>3</sup>	T2	275	280
	T4	267	
	T6	282	
	T8	285	

## 6.2. Desmontaje de pacas biodigestoras

Mediante el desmontaje de cada una de las pacas biodigestoras, zarandeo, tamizado, separación y pesado de los productos obtenidos, durante los 4 meses de degradación del material, se conoció la cantidad total de material obtenido al final del proceso, la cantidad de material orgánico tanto convertido como no convertido. Datos que permitieron determinar el porcentaje de conversión de la materia orgánica y el porcentaje de rendimiento del abono orgánico.

La TABLA V, muestra los valores obtenidos para la cantidad de material orgánico no degradado (hojarasca y palos), material convertido (abono orgánico), el total del producto final de la degradación en cada una de las pacas biodigestoras. Esta tabla, también registra los valores del porcentaje de conversión de la materia orgánica fresca y el porcentaje de rendimiento del abono orgánico.

El rendimiento del abono orgánico, fue calculado respecto a la cantidad total del producto obtenido durante el proceso.

TABLA V  
CANTIDADES DEL MATERIAL ORGANICO AL INICIO Y FINAL DEL PROCESO

Tratamiento	Material no convertido (kg)	Material convertido (kg)	Total, material final (kg)	Conversión (%)	Rendimiento (%)
T2	42	42	84	30,5	50,0
T8	40	45	85	29,8	52,9
T7	16	14	30	26,1	46,7
T4	47	46	93	34,8	49,5
T3	14	14	28	26,4	50,0
T5	15	15	30	26,8	50,0
T1	14	16	30	29,7	53,3
T6	41	45	83	29,4	54,2

Se observan tasas de conversión menores al 50%, en cada uno de los tratamientos realizados, lo que se atribuye a la pérdida de humedad de los residuos durante el proceso de degradación y la pérdida

de masa en forma considerables en CO<sub>2</sub>, si se comparan las cantidades de materia orgánica fresca registradas en la TABLA IV, con las cantidades finales del producto obtenido de la TABLA V, se observa una diferencia notable en la pérdida de peso. Lo anterior, se explica, por el gran contenido de humedad presente en la materia fresca (frutas y legumbres), ya que se usaron principalmente, frutas y legumbres enteras, portaras de grandes cantidades de zumo y agua.

En cambio, los valores de rendimiento, indican que, del producto final obtenido, la mitad o un poco más, pertenece a abono orgánico, y el resto a material no biodegradado (hojarasca), lo que se debe a que la hojarasca es un material muy difícil de degradar, que requiere tal vez de un proceso de trituración o cambio de hojarasca seca por materiales verdes.

### **6.3. Parámetros fisicoquímicos monitoreados durante el proceso de pacas biodigestoras**

Los parámetros fisicoquímicos monitoreados durante el proceso de digestión de los residuos sólidos orgánicos, en pacas biodigestoras, fueron, temperatura, pH, humedad y cambios en la altura. El seguimiento se realizó durante cuatro meses, en un periodo comprendido entre el 8 de noviembre del 2022 al 4 de abril del 2023. Los datos se recopilaban inicialmente tres veces por semanas, después del mediodía, y se disminuyó su frecuencia de monitoreo conforme se estabilizaba el proceso.

#### **6.3.1 Temperatura**

El comportamiento de la temperatura ambiental durante el monitoreo, estuvo entre el rango de 28 °C a 32°C, con una temperatura promedio de 30°C. La temperatura interna de cada tratamiento (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8), a una profundidad no mayor a 5 cm, tuvo un comportamiento similar a la temperatura ambiental, demostrando que la temperatura interna de las pacas, es poco percibida por la parte externa de las mismas, y no afecta la temperatura del ambiente, durante el proceso de pacas biodigestoras. Las bajas temperaturas registradas en las capas externas de cada paca, están dadas por la poca actividad microbiana, dado que los alrededores de cada paca estuvieron compuestos principalmente por residuos de hojarasca y chipper, material orgánico con mayor dificultad para ser degradado por los microorganismos.

Las mediciones de temperatura en cada uno de los tratamientos, muestra que las temperaturas más altas se obtienen a mayores profundidades, y las temperaturas más bajas a menores profundidades; comportamiento, determinado por el lugar de disposición del material orgánico con mayor biodegradabilidad (frutas y legumbres), dado a que el lugar en que estos se encuentren, será la zona donde se registre la mayor actividad microbiana, es este caso en la zona central de la cara superior de cada paca y a profundidades mayores. Lo anterior indica, que los microorganismos termófilos, se encuentran presentes a mayores profundidades y los microorganismos mesófilos en profundidades menores.

### 6.3.1.1 Variación de la temperatura en pacas biodigestoras con VPB 70 cm<sup>3</sup>

Las Fig 32, 33, 34 y 35, refleja el comportamiento de la temperatura a diferentes profundidades (10 cm, 20 cm y 40 cm), en la zona central de la cara superior de los tratamientos T2, T4, T6 y T8, respectivamente.

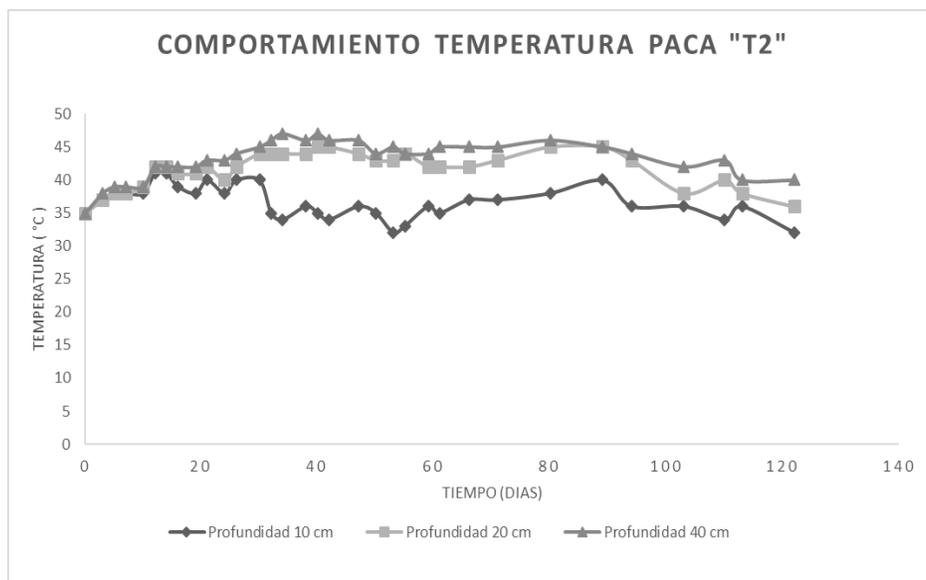


Fig. 32 Comportamiento de la temperatura paca T2 a diferentes profundidades

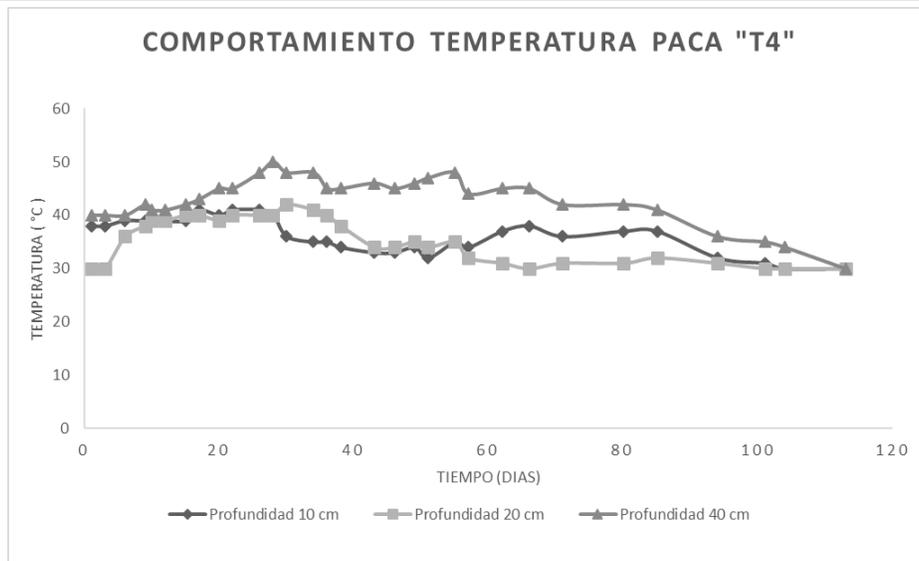


Fig. 33 Comportamiento de la temperatura paca T4 a diferentes profundidades

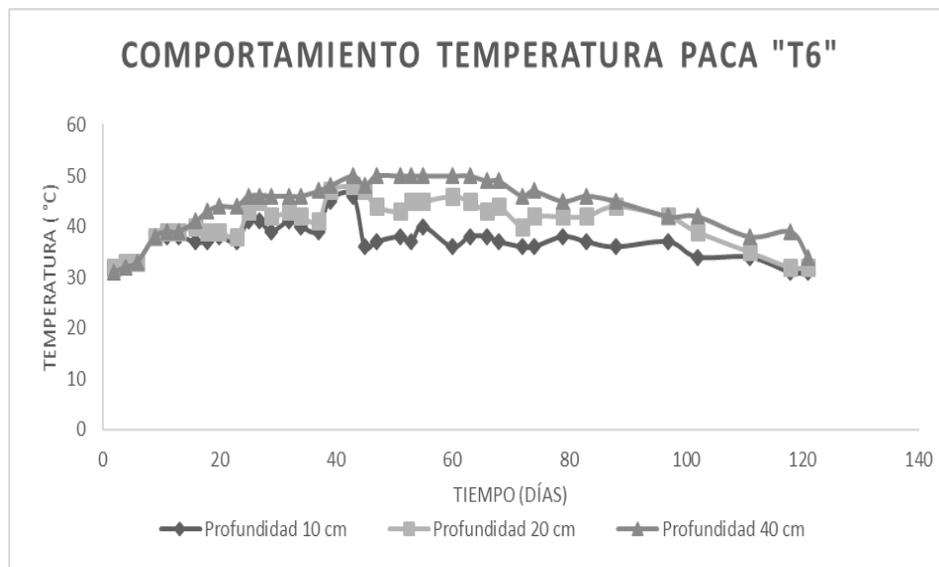


Fig. 34 Comportamiento de la temperatura paca T6 a diferentes profundidades

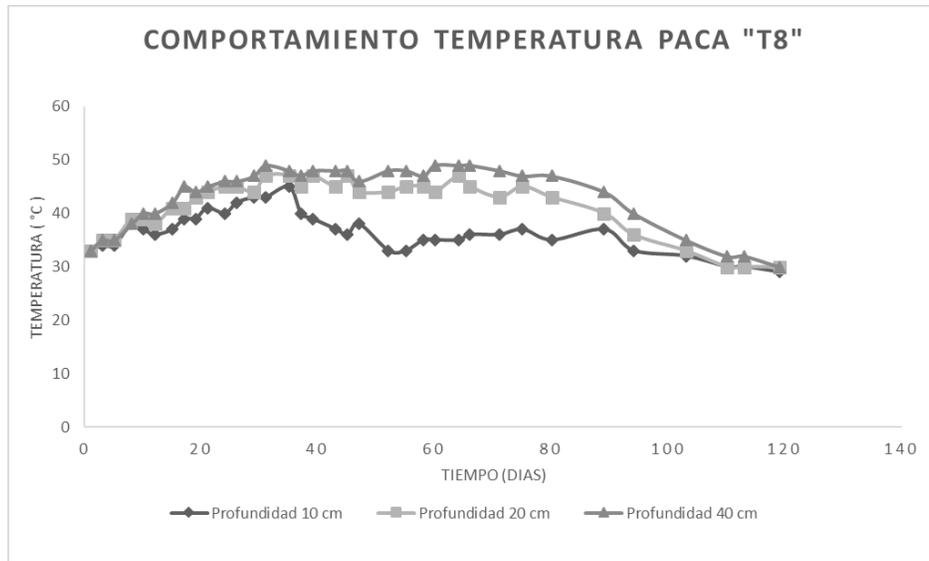


Fig. 35 Comportamiento de la temperatura paca T8 a diferentes profundidades

El seguimiento a la variación de la temperatura a una profundidad de 40 cm, en las pacas biodigestoras con VPB = 70 cm<sup>3</sup> (T2, T4, T6 y T8), permitió identificar las fases del proceso de digestión; encontrándose que la fase mesófila para los tratamientos T8 y T2, tuvo una duración de 4 semanas, mientras que los tratamientos T6 y T4 perduraron 3 semanas, donde los rangos de temperatura oscilaron entre los 29°C a 45°C. A partir de la tercera semana se observó que los tratamientos T6 y T4 alcanzaron la fase termófila con una duración de 45 y 40 días respectivamente, en tanto los tratamientos T8 y T2, alcanzaron esta fase a la 4 semana con una duración de 59 días, finalizada la fase termófila de los diferentes tratamientos entraron a un periodo de enfriamiento, donde la temperatura disminuyó alrededor de los 30°C, temperatura similar a la temperatura ambiental. Cabe mencionar que durante el proceso de digestión las temperaturas máximas registradas fueron; T8 (49°C), T6 (50°C), T2 (47°C) y T4 (50°C).

En el tratamiento T4, se observó una reducción en el tiempo, que transcurren las fases mesófilas y termófilas con respecto a la literatura, reducción que se da en 4 semanas menos que las reportadas (13 semanas) [19]. Mientras que los tratamientos T6, T8 y T2, pasaron estas fases en un periodo similar a lo previsto en otros estudios (3 meses).

La presencia de las fases mesófila, termófila, enfriamiento o maduración, durante el proceso de digestión, indica que tanto microorganismos mesófilos como termófilos, se vieron favorecidos a

temperaturas concretas. La fase mesófila se caracterizó por temperaturas que oscilan entre los 30°C a 45°C, proceso en el que hongos, bacterias y actinomicetos, rompen los compuestos solubles degradables (almidón y proteínas) en moléculas sencillas, generando alimento y aumento de la temperatura para los microorganismos termófilos. Terminada esta fase, los organismos existentes son reemplazados por organismos como hongos, actinomicetos y bacterias termófilas, gracias a que las altas temperaturas (45°C a 50°C) les son propicias para desarrollarse y multiplicarse rápidamente, tales microorganismos son los encargados de llevar a cabo la etapa termófila, ya que son capaces de degradar moléculas complejas, como polisacáridos (hemicelulosa y celulosa), ácidos grasos y proteínas [14], [18] y [22]. Después de esta fase, las temperaturas comienzan a disminuir y se reanuda otro grupo de microorganismos mesófilos, que se encargan de la etapa de maduración del material orgánico restante, etapa que puede demorar mucho o poco tiempo, respecto a las etapas anteriores.

En las Fig 32, 33, 34 y 35, se observa que la variación de la temperatura a una profundidad de 20 cm, en las pacas biodigestoras con VPB= 70 cm<sup>3</sup> (T2, T4, T6 y T8), se mantienen a temperatura intermedias entre las temperaturas registradas a 40 cm y 10 cm, en tanto las temperaturas tomadas a 10 cm de profundidad, muestran un aumento durante los primeros días del proceso, y disminuyen rápidamente, hasta alcanzar temperaturas cercanas a la temperatura del ambiente.

#### **6.3.1.2 Variación de la temperatura en pacas biodigestoras con un VPB = 50 cm<sup>3</sup>**

Las fig 36, 37, 38 y 39, refleja el comportamiento de la temperatura a diferentes profundidades (10 cm, 20 cm y 40 cm), en la cara superior de la zona central de los tratamientos T1, T3, T5 y T7.

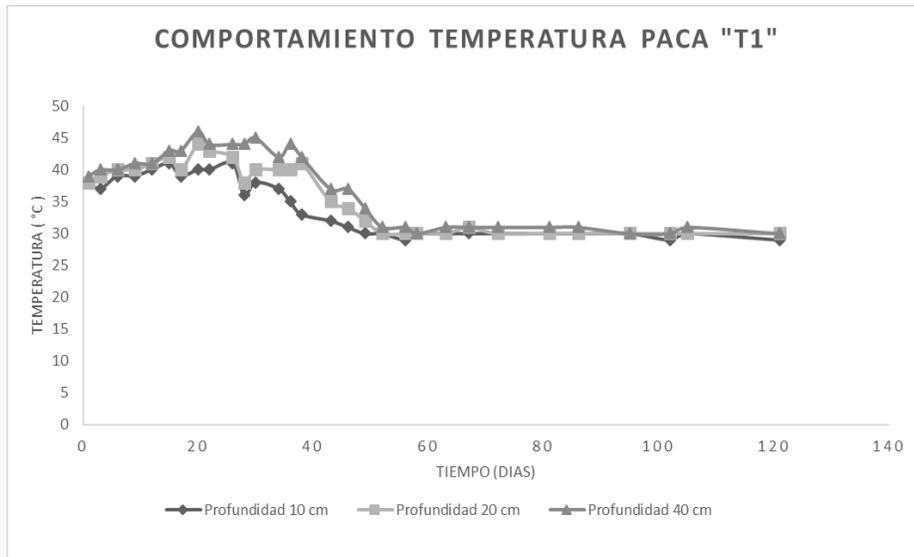


Fig. 36 Comportamiento de la temperatura paca T1 a diferentes profundidades

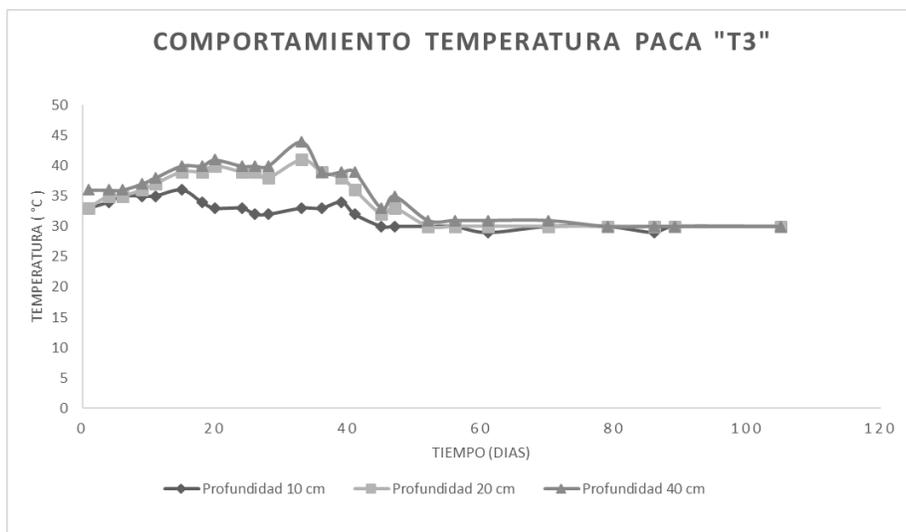


Fig. 37 Comportamiento de la temperatura paca T3 a diferentes profundidades

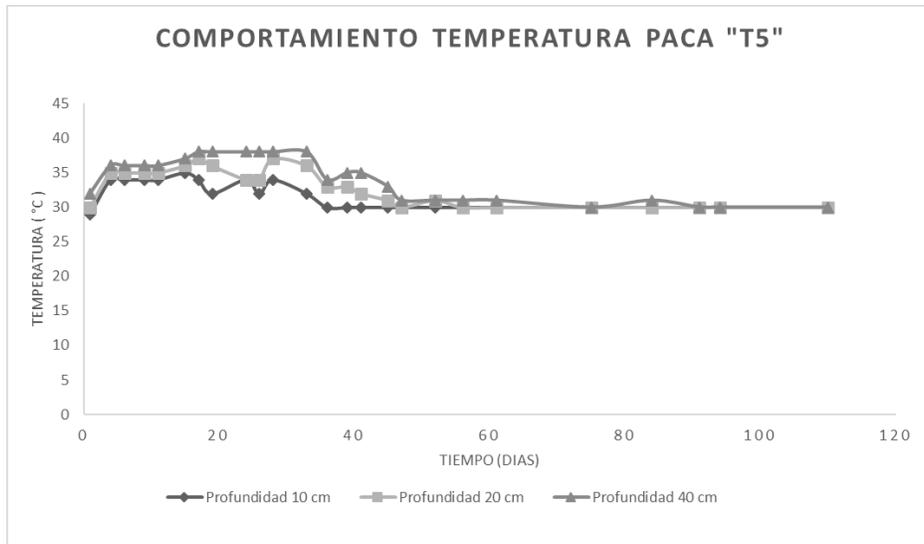


Fig. 38 Comportamiento de la temperatura paca T5 a diferentes profundidades

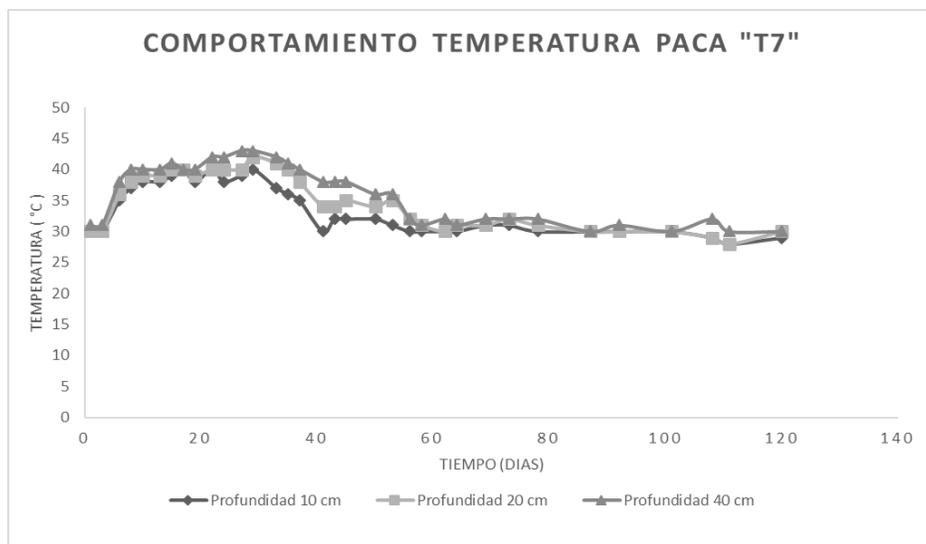


Fig. 39 Comportamiento de la temperatura paca T7 a diferentes profundidades

El seguimiento a la variación de la temperatura a una profundidad de 40 cm, en las pacas biodigestoras con un VPB= 50 cm<sup>3</sup> (T1, T3, T5 y T7), permitió identificar sólo las fases mesófilas y de enfriamiento del proceso de digestión; encontrándose que la fase mesófila para los tratamientos T3, T5 y T7, tuvo una duración de 4 semanas, mientras que el tratamiento T1 perduró 3 semanas. Las temperaturas máximas registradas en los tratamientos fueron para T1 (46°C), T7 (43°C), T3 (41°C) y T5 (38°C), lo que indica que durante el monitoreo no se registraron temperaturas características de la fase termófila.

En las fig 36, 37, 38 y 39, se observa que la variación de la temperatura a las tres profundidades, tuvo un comportamiento similar, durante las primeras semanas del proceso la temperatura incremento hasta alcanzar temperaturas similares, y luego tuvo una disminución acelerada, hasta alcanzar valores de temperatura menores a la temperatura ambiental registrada en ese momento.

Relacionando el comportamiento de temperaturas entre pacas de diferentes volúmenes, se obtiene que las pacas con mayor volumen son las que alcanzan las temperaturas más altas, esto indica que, para lograr temperaturas más altas, es mejor procesar volúmenes más grandes (menos perdidas de calor), ya que es deseable en la producción de abonos tener temperaturas altas por largos periodos de tiempo, que favorezcan la eliminación o inhibición de patógenos y fitotóxicos, tal como lo han sugerido otros autores [18] y [22].

### 6.3.1.3 Comparación de la variación temperatura en todos los tratamientos

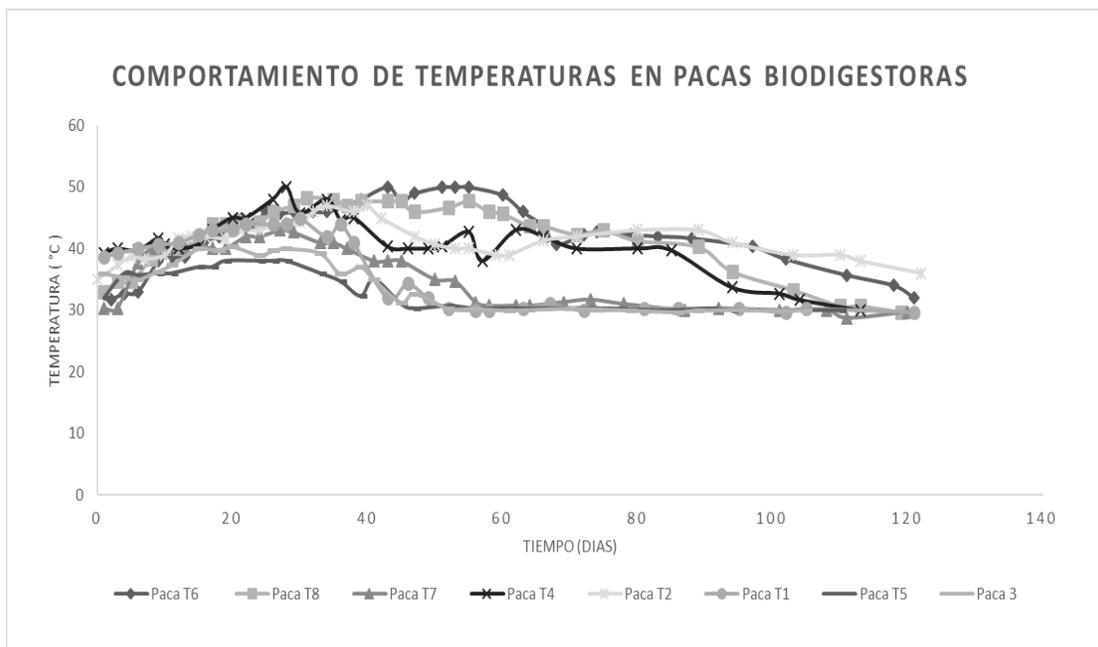


Fig. 40 Comportamiento de la variación de temperaturas para todos los tratamientos

El comportamiento de la variación de temperatura para todos los tratamientos, se realizó teniendo en cuenta el promedio de temperaturas registradas a las diferentes profundidades (40 cm, 20 cm y 10 cm) en la zona central de la cara superior de cada paca.

La mayoría de los tratamientos pasaron por las diferentes fases de la digestión, esto analizado a una profundidad de 40 cm, sin embargo, al momento de analizar las temperaturas promedio tomadas a diferentes profundidades en cada tratamiento, se encuentra que solo dos pacas lograron alcanzar las fases de digestión completas, esto se entiende debido a que la temperaturas a los 10 cm de profundidad eran bajas, cercanas a las del ambiente, lo que produjo una reducción de la temperatura promedio en cada paca.

En la fig 40, se identifica que los tratamientos T4, T6 y T8, efectivamente alcanzan la fase termófila, en un rango de temperaturas entre los 45° a los 48°C; mientras que en los tratamientos T1, T3, T5 y T7 se obtuvieron temperaturas entre los 30°C a los 41°C, temperaturas pertenecientes a la fase mesófila del proceso, no se registraron temperaturas características de la fase termófila, lo que indica que esta etapa se llevó a cabo en tiempos, donde no se estableció monitoreo.

Los tratamientos T6 y T8, alcanzaron los picos máximos de temperatura a los 43 y 31 días, respectivamente, en tanto los tratamientos T1 y T7, alcanzaron los picos máximos de temperatura a los 30 días del proceso.

La fig 40, evidencia que los tratamientos T2, T4, T6 y T8, presentaron el mayor periodo de enfriamiento, alcanzando la temperatura ambiental a los 4 meses de degradación del material orgánico, por lo que estos tratamientos no pasaron por la etapa de maduración del proceso. Caso contrario, a los tratamientos T1, T3, T5 y T7 que, a partir de los 60 días, estuvieron sometidos a un proceso de maduración durante 2 meses, lo cual refleja un periodo de enfriamiento rápido.

## 6.3.2 Potencial hidrogeno (pH)

### 6.3.2.1 Comparación de la variación del pH en todos los tratamientos

La medición de pH, se realizó en tres puntos diferentes de la zona central de la cara superior de cada paca, a una profundidad de 20 cm, por tanto, los valores registrados de pH para cada tratamiento corresponden al valor promedio de las tres mediciones realizadas.

En los tratamientos T6 y T8, la medición de pH se efectuó a partir de los 23 días después de iniciado el proceso de digestión del material orgánico, en los tratamientos T7 y T2 entre los 10 y 13 días de ensamblada las pacas, mientras que en los tratamientos T4 y T1, la medición se realizó a partir del 6 día, y en los tratamientos T3 y T5, las mediciones fueron ejecutadas a partir del día 1. Las mediciones de pH, no se iniciaron en la misma fecha de mediciones de los otros parámetros fisicoquímicos (temperatura, humedad, cambio en la altura), debido a que al momento de realizar el montaje de las primeras pacas biodigestoras, no se contó con el medidor de pH para suelos.

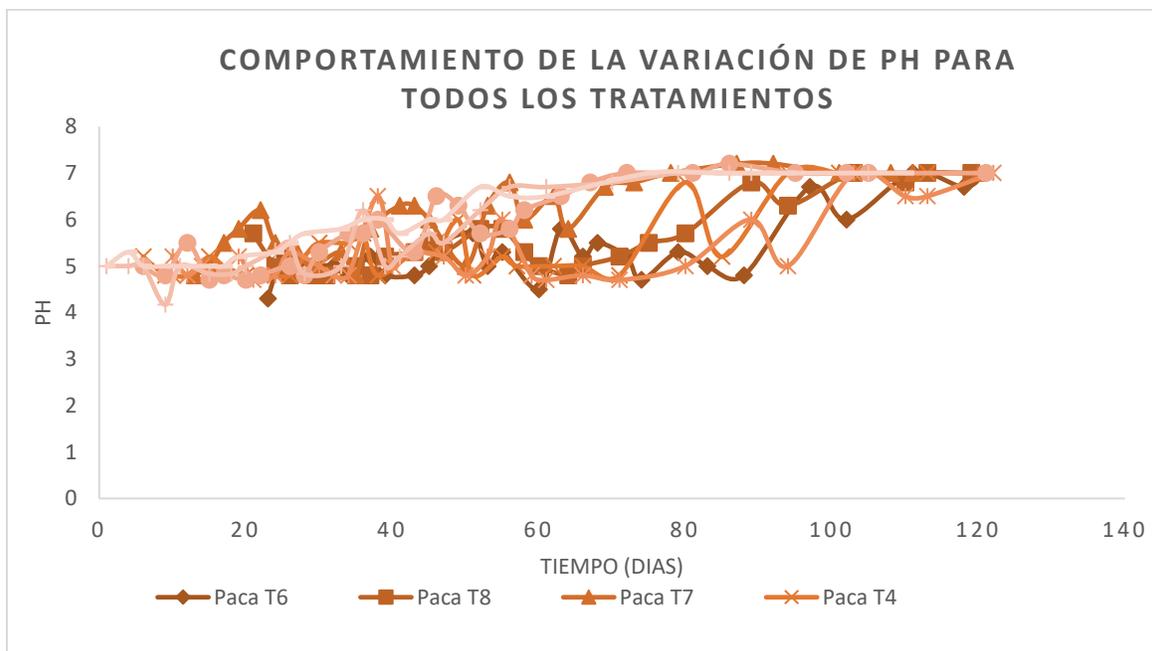


Fig. 41 Comportamiento de la variación de pH para todos los tratamientos

La fig 41, muestra la variación del pH en cada una de los tratamientos realizados, se observa que la variación del pH se mantuvo entre el rango de 4 a 7. La oscilación de pH entre el rango de 4,5 a 5,5, indica que durante los primeros meses del proceso de degradación del material orgánico en cada una de las pacas biodigestoras, hubo presencia de ácidos orgánicos, generados gracias a la actividad fermentadora de los microorganismos, beneficiados en este ambiente ácido, lo cual pudo permitir una la desinfección y saneamiento del material en degradación. Comportamiento que se debe también, a la naturaleza del sustrato usado en algunas pacas biodigestoras, puesto que en la mayoría de mezclas de residuos sólidos orgánicos (legumbres y verduras), estaban contenidas por naranjas enteras (zumo, pulpa, cáscara), maracuyá, tomates entre otros materiales orgánicos que se caracterizan por tener pH ácidos entre el rango de 3 y 4,5.

Además, se logra identificar que cada uno de los tratamientos, pasó por una etapa de estabilización de pH; a medida que iba avanzando el proceso, el pH iba aumentando hasta situarse en torno a un pH neutro (7), dando a entender que el proceso se estaba acercando o entrando a la fase de maduración del material.

### **6.3.2.2 Comportamiento de la variación de pH para VPB= 50 cm<sup>3</sup>**

En los tratamientos con un VPB=50 cm<sup>3</sup> (T1, T3, T5, T7), los primeros valores de pH registrados fueron de 5, tal como se observa en la fig 42. La oscilación de pH entre el rango ácido (4,5 a 5,5) en estos tratamientos fue corto, un periodo de más o menos 1 mes. Por tanto, la etapa de estabilización de pH, fue alcanzada más rápido, observándose un periodo de estabilización prolongado entre los 2 meses y medio y 3 meses, entre el rango de 6 a 7. Cabe señalar que estos tratamientos alcanzaron un pH neutro (7) a semana 10 del proceso de digestión de la materia orgánica.

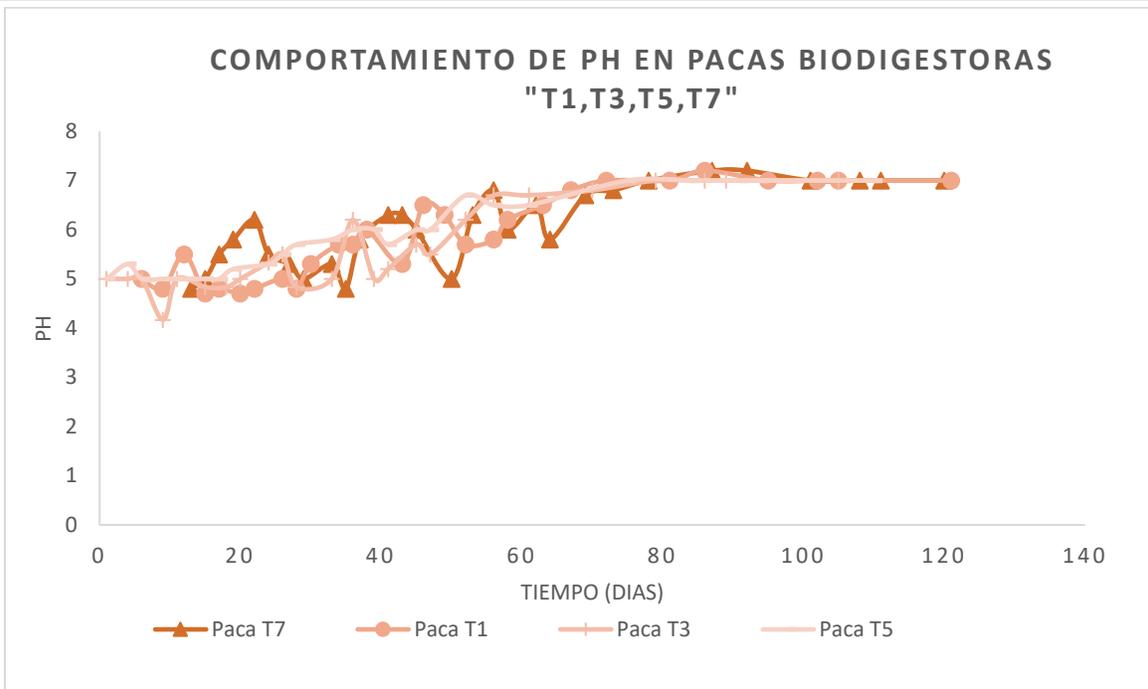


Fig. 42 . Comportamiento de la variación de pH para los tratamientos T1, T3, T5 y T7

### 6.3.2.3 Comportamiento de la variación de pH para VPB= 70 cm<sup>3</sup>

En la fig 43, se evidencia que primeros valores obtenidos de pH para los tratamientos con un VPB=70 cm<sup>3</sup> (T6, T8, T4 y T2), fueron de 4, 3; 5, 7; 5, 2; 5, 2, respectivamente. Estos tratamientos, presentaron un comportamiento similar, oscilaciones de pH entre el rango 4,5 a 5,8, en un periodo de tiempo entre los dos meses y medio y tres meses.

El tiempo de estabilización de pH para los tratamientos T6, T2 y T4, duró alrededor de 3 semanas, mientras que en el tratamiento T8 duró 4 semanas, con una oscilación de pH entre el rango de 6 a 7.

Los tratamientos T1, T3, T5, y T7, alcanzaron las fases de maduración entre las 9 y 10 semanas, según se evidencia con los datos registrados tanto de temperatura como pH; un pH de 7 se registró a la semana 10, mientras que la temperatura de 30°C a partir de la 9 semana del proceso. Lo que refleja que estos tratamientos, pasaron por la etapa de maduración por varios días.

Caso contrario para los tratamientos T6, T8, T4 y T2, los cuales alcanzaron la etapa de maduración, mas no pasaron por esta, debido que el proceso se estabilizo (pH 7 y temperatura de 30°C) justo a los 4 meses, tiempo en el que se procedió a desarmar las pacas, ya que fue el tiempo destinado para la evaluación del proceso en pacas biodigestoras.

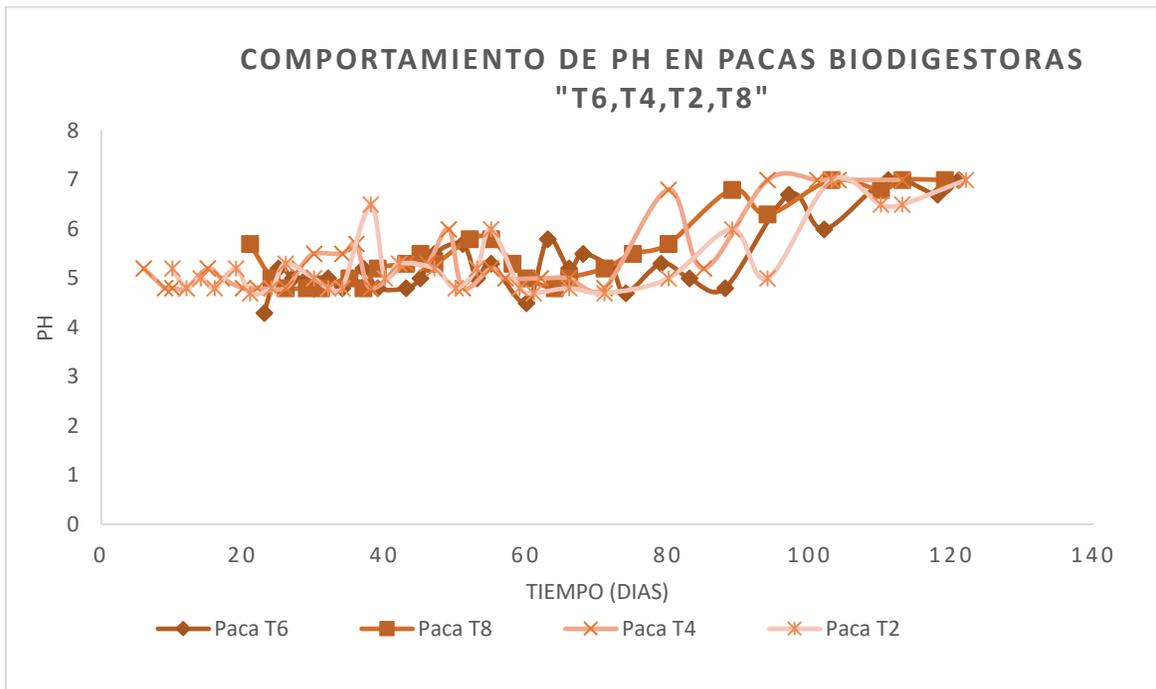


Fig. 43 Comportamiento de la variación de pH para los tratamientos T2, T4, T6 y T8

Relacionando el pH de las pacas biodigestoras de menor y mayor volumen, se encontró que las pacas de menor volumen demoraron más en estabilizar su pH, es posible que las temperaturas más altas alcanzadas en las pacas de mayor volumen, hayan propiciado una degradación más rápida de los compuestos (ácidos orgánicos) que mantiene el pH bajo en estos sistemas, propiciando una estabilización más rápida o similar.

### 6.3.3 Humedad

El registro de la variación de la humedad se midió en paralelo con la temperatura, en la zona central de la cara superior de la paca biodigestora; al ser esta la zona con mayor actividad microbiana y donde se concentran su mayor fuente de alimento, representa para el estudio un sitio

de interés para evaluar la evolución de su contenido humedad. Los datos arrojados, representaron una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el contenido de humedad, además de una poca influencia del contenido de humedad inicial, en las mezclas de residuos orgánicos utilizadas.

La fig 44, representa las variaciones de humedad en las diferentes pacas biodigestoras, para un periodo comprendido de 4 meses.

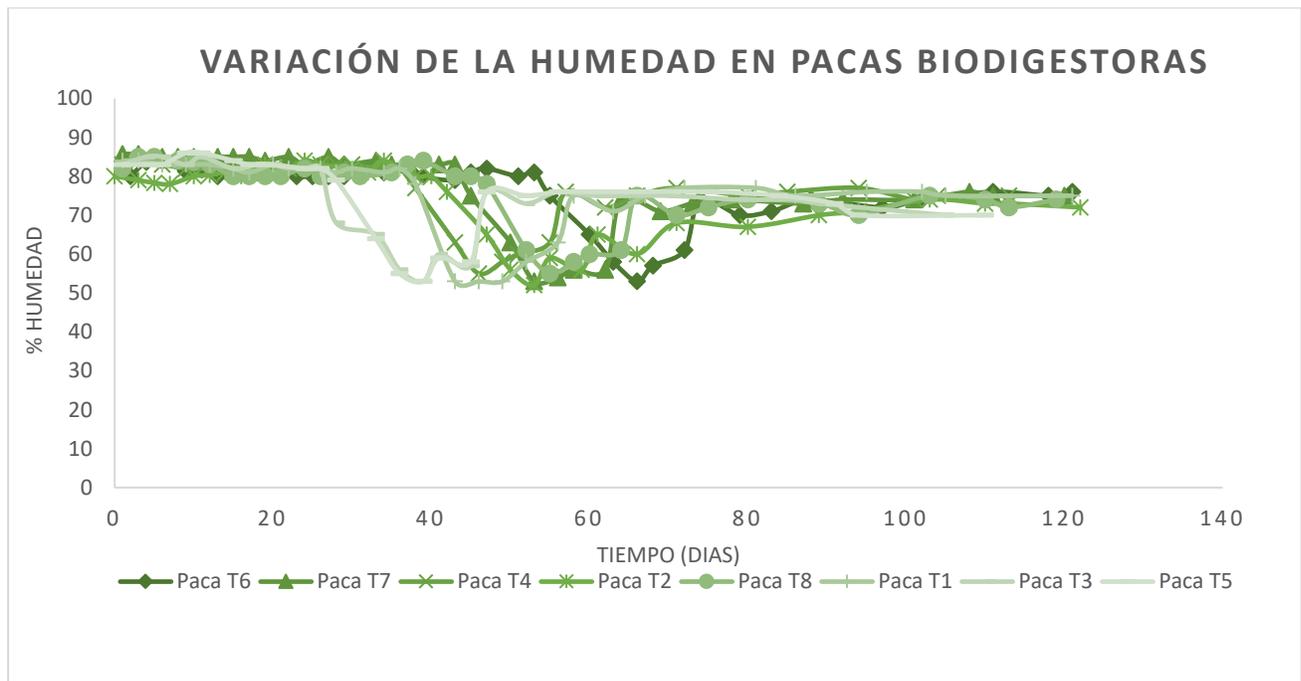


Fig. 44 Variación de la humedad en las diferentes pacas biodigestoras

Inicialmente los tratamientos T6 y T2 presentaron los menores contenidos de humedad con 80 %, sin embargo, al finalizar el proceso de digestión, estos no arrojaron el menor porcentaje de humedad entre las pacas, siendo los tratamientos T3 y T5 con 70 % de humedad los de menor contenido. Lo anterior se debe a que T3 y T5 llegaron a un punto de equilibrio térmico con el ambiente en menor tiempo que T6 y T2, los cuales se encontraban en fase de enfriamiento para dicho periodo.

Entre el periodo de los 26 días a los 66 días se presentan los picos de humedad más bajos en las pacas biodigestoras, debido a que en este periodo transcurre la etapa termófila para la mayoría de los tratamientos. Dicha etapa se caracteriza por tener los valores más altos de temperatura durante el proceso de digestión y al ser la humedad una variable sensible a los cambios de temperatura, por su relación inversamente proporcional, esta disminuye considerablemente a causa de las elevadas temperaturas, situación que posteriormente se revierte en la etapa de enfriamiento y maduración de los pacas biodigestoras, donde la temperatura desciende a valores cercanos al ambiente y la humedad aumenta hasta alcanzar un punto de equilibrio con la humedad del ambiente.

#### 6.3.4 Altura

La altura inicial registrada para cada tratamiento, se realizó durante el día 1 y 2, después del armado y ensamble de cada paca biodigestora, el valor de altura para las pacas T1, T3, T5 y T7 fueron 49 y 50 cm, en cada una de sus caras, por lo que cumplieron con volumen inicial de  $VPB= 50 \text{ cm}^3$ , mientras que de las pacas que debían quedar con un volumen de  $VPB=70 \text{ cm}^3$ , solo el tratamiento T2 cumplió, en tanto los tratamiento T4, T6 y T8 quedaron con un altura inicial de 67 cm de largo, 3 cm menos al ideal y 70 cm de ancho (fig 46).

Los cambios de altura, se registraron con base a la medida en cm, desde el nivel del piso (base de la paca) hasta la parte superior de cada paca, a través del tiempo.

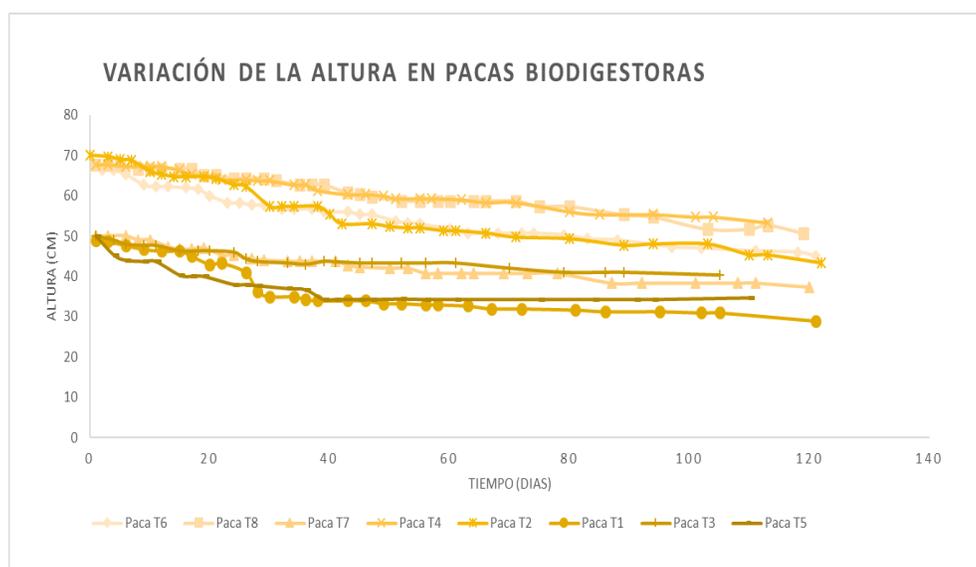


Fig. 45 Comportamiento del cambio de altura para todos los tratamientos

La fig 45, muestra el comportamiento en la variación de la altura, tanto para los tratamientos con un VPB=50 cm<sup>3</sup>, como para los tratamientos con un VPB= 70 cm<sup>3</sup>, se observa que durante las primeras semanas del proceso todos los tratamientos presentan la mayor disminución en su altura. Sin embargo, se identifica que los tratamientos T1 y T5, al igual que los tratamientos T2 y T6, tuvieron un comportamiento similar a lo largo del proceso, reflejando la mayor reducción en su altura, por ejemplo los tratamientos T1 y T5 durante los primeros 40 días tuvieron una reducción de alrededor de 16 cm , y luego una poca y lenta disminución en su altura, hasta finalizar el proceso, obteniéndose una altura final de 34 cm, mientras que los tratamientos T2 y T6, durante los primeros 40 días tuvieron una reducción entre 12 y 14 cm, y después un disminución de altura más lenta de 10 cm , hasta finalizar el proceso.

El cambio en la altura durante los 4 meses de digestión del material orgánico para cada tratamiento fue, T1 (20 cm), T2 (26 cm), T3 (15 cm), T4 (14 cm), T5 (17 cm), T6 (21 cm), T7 (12 cm) y T8 (17). Las mayores reducciones de altura se registran para los tratamientos con volúmenes superiores, lo que se relaciona a que en estos tratamientos hubo una mayor degradación de la materia orgánica, ya que pasaron un mayor tiempo en las etapas mesófilas y termófilas del proceso (alrededor de 3 meses).

Cabe señalar que el tratamiento T1, presentó un cambio en su estructura (fig 49), durante la primera semana del proceso, debido a la mala compresión del material en la paca biodigestora, que el tratamiento T3 y T5 presentaron hundimiento del material dispuesto en la zona central de la paca (fig 47 y fig 48) , a los dos meses del proceso, debido a la rápida degradación del material orgánico, por el uso de material con alto grado de biodegradación como cáscara y pulpa de mango, hojas de repollo y lechuga, hojas de apio, cebolla larga, papaya , etc.

Lo anterior, explica el comportamiento del cambio de altura, para estos tratamientos, por ejemplo, T1 y T5, que presentaron la mayor reducción en el cambio de altura, en ambos casos, puede ser debido al cambio de estructura de la paca.



Tratamiento VPB= 50 cm<sup>3</sup>



Tratamiento VPB= 70 cm<sup>3</sup>



Fig. 46 Diferencia de altura entre tratamientos

CAMBIOS DE ESTRUCTURA EN LAS PACAS BIODIGESTORAS



Fig. 47 Hundimiento en paca biodigestora T3



Fig. 48 Hundimiento en paca biodigestora T5



Fig. 49 Cambio estructura paca biodigestora T1

## 6.4 Caracterización del abono orgánico mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos

La caracterización del producto final obtenido en el proceso de pacas biodigestoras, realizada a partir de ejecución de métodos fisicoquímicos propuestos por la NTC 5167 (2011), permitió conocer el valor de algunos parámetros que influyen en la calidad del abono orgánico, que comparados con la misma norma permiten identificar si las muestras analizadas cumplen o no con los estándares de calidad.

### 6.4.1 Cuantificación del contenido de humedad

TABLA VI  
PORCENTAJE DE HUMEDAD EN BASE SECA DEL ABONO ORGANICO

Tratamiento	%Humedad
T1	44
T2	40
T3	48
T4	53
T5	56
T6	53
T7	53
T8	52

La TABLA VI muestra los porcentajes de humedad obtenidos en el análisis de cada tratamiento, porcentajes de humedad que oscilan entre el 40% y 56%, en este caso el T2 fue el tratamiento que arrojó menor porcentaje de humedad (40%), mientras que el T5 fue el tratamiento que mayor contenido de humedad presentó (56%).

Los niveles de humedad en los abonos orgánicos pueden variar según la normativa de cada país o entidad. En el caso de Colombia, la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (2011), establece un rango máximo de humedad del 35% para los abonos orgánicos, mientras que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) sugiere un rango de humedad entre el 40% y el 60%. Ahora bien, la humedad del ambiente puede influir en los niveles de humedad en los abonos orgánicos y en su calidad. Por esta razón, en zonas húmedas como el

Urabá Antioqueño, se puede implementar un proceso de secado para reducir la humedad a niveles aceptables. Este proceso de secado puede llevarse a cabo bajo sombra y durar alrededor de una semana, dependiendo del tipo de abono y de la humedad ambiental.

#### 6.4.2 Cuantificación del porcentaje de cenizas

TABLA VII  
CUANTIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE CENIZAS EN EL ABONO

Tratamiento	% Cenizas
T1	20
T2	23
T3	34
T4	18
T5	25
T6	21
T7	20
T8	29

Los niveles de cenizas reportados en la TABLA VII, indican que las muestras analizadas tienen un contenido de cenizas inferior al nivel máximo permisible establecido por la NTC 5167 (2011), que es del 60%. Esto sugiere que la muestra analizada tiene un grado de mineralización adecuado y que contiene una cantidad razonable de sustancias inorgánicas no volátiles.

#### 6.4.3 Medición de la conductividad eléctrica

TABLA VIII  
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL ABONO

Tratamiento	Conductividad eléctrica (dS/m)
T1	0,060
T2	0,057
T3	0,058
T4	0,062
T5	0,062
T6	0,064
T7	0,064
T8	0,067

El valor de conductividad eléctrica que presenta un abono orgánico, condiciona en gran medida el esfuerzo que debe realizar las plantas para absorber los nutrientes presentes, lo cual influye en su desarrollo y en la capacidad de germinación de las mismas. Por tanto, si el abono se encuentra por encima del valor máximo permisible, puede afectar en gran medida al cultivo y su productividad. Una cantidad inferior de 3 ds/m representa un abono de buena calidad, si esto se compara con los valores de conductividad eléctrica reportados en la TABLA VIII para los diferentes abonos orgánicos evaluados, se observa que todos tiene conductividades menores a la máxima permitida, lo cual refleja que el abono obtenido se puede usar sin el riesgo de salinización de los suelos.

#### 6.4.4 Capacidad de retención de agua

TABLA IX  
CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DEL ABONO

Tratamiento	% saturación
T1	123
T2	105
T3	110
T4	114
T5	101
T6	118
T7	104
T8	117

La capacidad de retención de humedad es un parámetro importante en la evaluación de la calidad de los abonos orgánicos, ya que puede influir en la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas. La norma NTC 5167 (2011) establece que la capacidad de retención de humedad debe ser igual o mayor al peso de la muestra del abono orgánico.

La capacidad de retención de humedad está relacionada con varios procesos en los suelos agrícolas, como el movimiento de solutos, la retención de nutrientes, la infiltración y el contenido de agua disponible. Por lo tanto, es esencial garantizar los niveles óptimos.

Al analizar los abonos orgánicos y compararlos con la norma NTC 5167 (2011), se evidencia que los abonos evaluados cumplen con el criterio de calidad establecido (obsérvese en la TABLA

IX). Esto significa que tienen una capacidad de retención de humedad igual o mayor al peso de la muestra del abono orgánico y los nutrientes no se perderán por lixiviación.

#### 6.4.5 Densidad real

TABLA X  
DENSIDAD REAL

Tratamiento	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )
T1	0,345
T2	0,310
T3	0,323
T4	0,332
T5	0,307
T6	0,325
T7	0,335
T8	0,320

La densidad en los abonos orgánicos condiciona la circulación de aire y agua, elementos vitales para el desarrollo de microorganismo benéficos [19]. Un valor adecuado de densidad para abonos orgánicos es el que propone la norma NTC 5167 (2011), donde densidades iguales o menores a 0,6 g/cm<sup>3</sup> son aptas para su uso agrícola y garantizar un buen grado de compactación, porosidad y aireación. En este caso todas las muestras de abonos cumplen con el rango establecido y son aptos para su uso agrícola, tal como se registra en la TABLA X.

#### 6.4.6 Potencial de Hidrogeno

TABLA XI  
POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Tratamiento	pH
T1	7
T2	7
T3	7
T4	7
T5	7
T6	7
T7	7
T8	7

Los valores de pH obtenidos en las muestras de abonos orgánicos (TABLA XI) mostraron un que el producto es estable y cumple con la norma NTC 5167 (2011), la cual establece un rango mayor

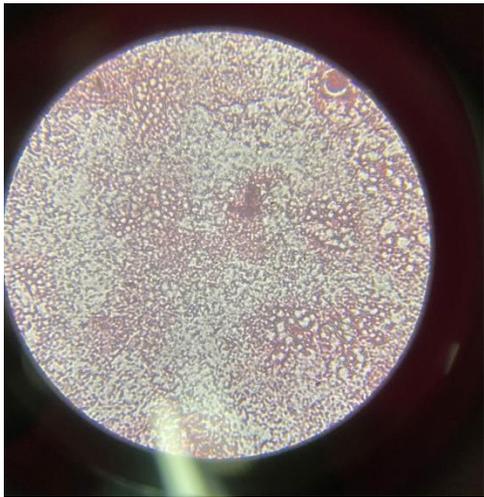
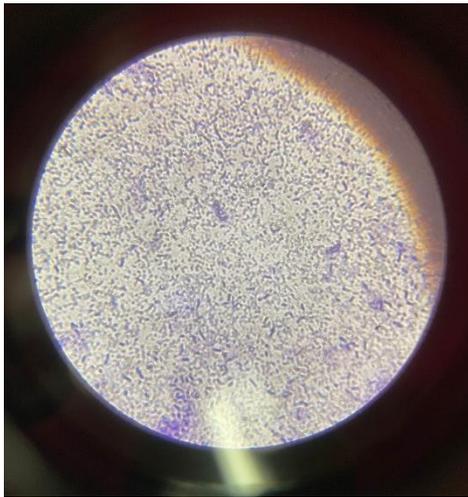
4 y menor a 9 de pH para abonos orgánicos. Es importante que los abonos orgánicos sean estables y con valores de pH neutros de esta forma no alteran el pH de los suelos y de los agroquímicos usados en las plantaciones agrícolas.

El valor de pH (7), no significa que el pH haya sido exactamente 7, este valor puede ser ligeramente menor o mayor, se registra ese valor por el equipo utilizado y por análisis cualitativo de pH.

### 6.5 Análisis microbiológico del abono orgánico

La prueba microbiológica, permitió la identificación principalmente de dos grandes grupos de microorganismos, bacterias y hongos (mohos y levaduras), poblaciones que se encuentran en mayor cantidad en los productos orgánicos, por la descomposición del material vegetal, aunque no se descarta la presencia de otros microorganismos como protozoos, enterobacterias, etc.

- Análisis microbiológico para bacterias

Microorganismo	Características
Bacterias	
	
Fig. 50 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio	Fig. 51 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio

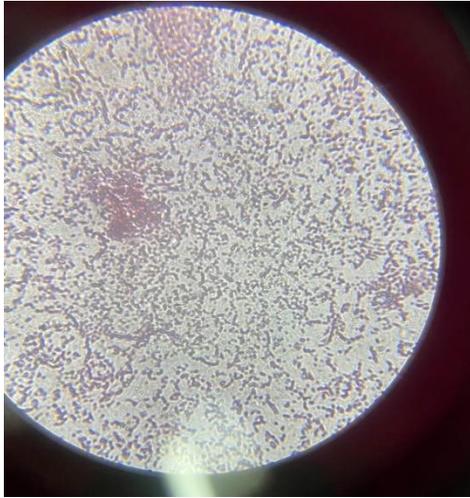


Fig. 52 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio

Formas: Cocoides y estreptobacilos  
Bacterias Gramnegativas

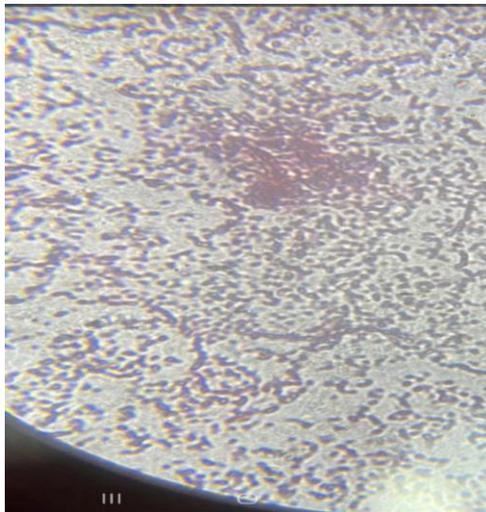


Fig. 53 Bacterias Gramnegativas vistas en el microscopio

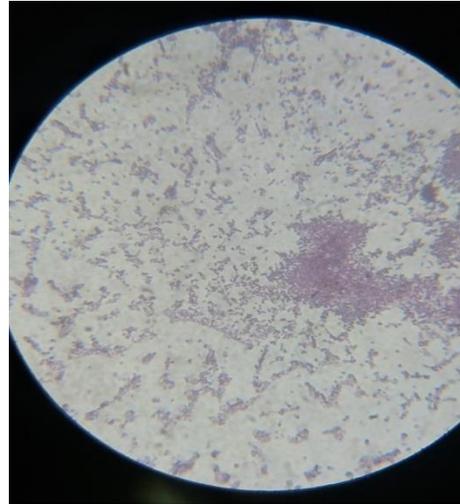


Fig. 54 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio

Bacterias Grampositivas

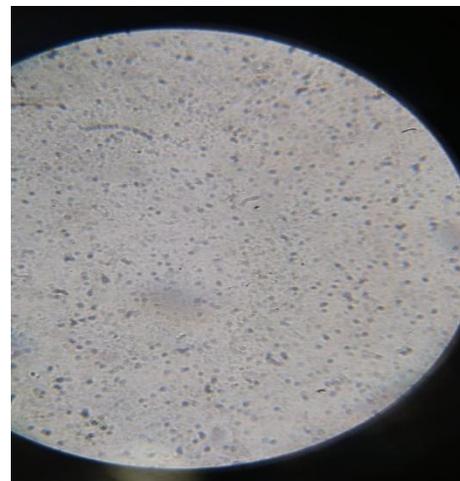


Fig. 55 Bacterias Grampositivas vistas en el microscopio

Formas: Coccoides, diplococos, estafilococos  
Bacterias Grampositivas

El tipo de bacterias identificado pertenece al grupo de bacterias mesófilas, bacterias capaces de crecer en Agar Nutritivo y a temperaturas comprendidas entre los 25°C a 40°C. Entre este grupo posiblemente se pueden relacionar con bacterias del género *Staphylococcus*, *Streptococcus* y *Bacillus*, pertenecientes a la clase *Bacilli* y al grupo de las bacterias ácido lácticas, las cuales se

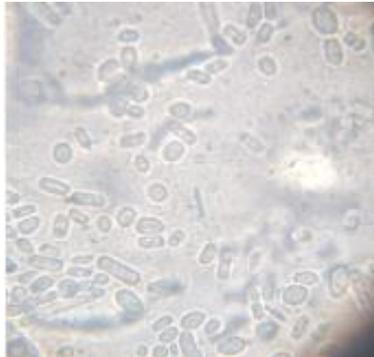
caracterizan por ser bacterias Gram positivas (fig 51, fig 54 y fig 55), aerobias, anaerobias facultativas, y benéficas, ya que tienen una serie de efectos positivos sobre la calidad de las plantas.

También, se identifica la presencia de bacterias Gram negativas (ver fig 50, fig 52 y fig 53) que benefician la calidad de los cultivos, conversión de nutrientes, fijación del nitrógeno atmosférico, crecimiento vegetal, etc. Las cuales se pueden ser asociadas a bacterias del tipo *Azotobacter spp* o *Azospirillum spp*, por su morfología microscópica cocobacilar o cocoides, y agrupaciones en estreptobacilos, pertenecientes al tipo de bacterias aerobias y anaerobias facultativas. Un amplio rango de pH, entre 4,5 a 9, y una temperatura entre el rango de 25°C a 30°C, son favorables para el desarrollo y crecimiento del *Azotobacter*, sin embargo, estas bacterias son tolerantes a altas temperaturas entre los 45°C y 48°C. En tanto, la bacteria *Azotobacter* crece en un rango de pH entre 6 y 8, y un rango de temperatura entre 32°C a 36°C.

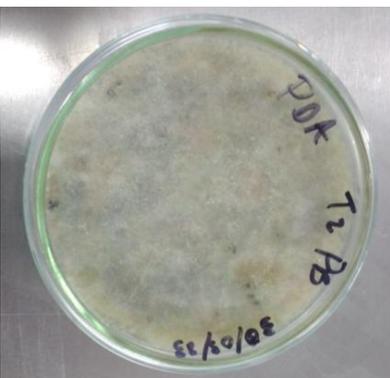
- Análisis microbiológico para mohos y levaduras

Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 1

Microorganismo	Características
 <p data-bbox="237 1640 756 1696">Fig. 56 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 1.</p>	<p data-bbox="818 1255 992 1283"><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="867 1318 1019 1346">- <b>Anverso:</b></li> </ul> <p data-bbox="818 1377 1344 1404">Colonias correosas de color crema, textura plana.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="867 1472 1008 1499">- <b>Reverso</b></li> </ul> <p data-bbox="818 1530 1053 1558">Color amarillo crema.</p>

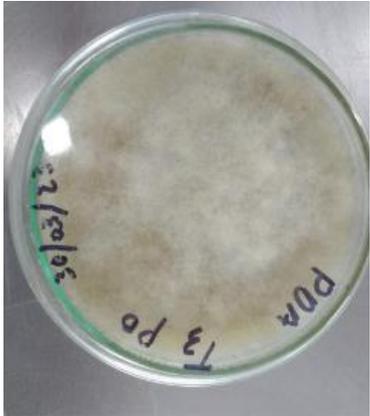
 <p>Fig. 57 características microscópicas de Saccharomyces spp (levadura) presente en el abono orgánico, tratamiento 1.</p>	<p><b>Microscópicas</b>                  Levadura con células ovaladas que se agrupan en pequeños grupos, tomando la apariencia de filamentos, pseudo-hifas o pseudo – micelio.</p>
--	---

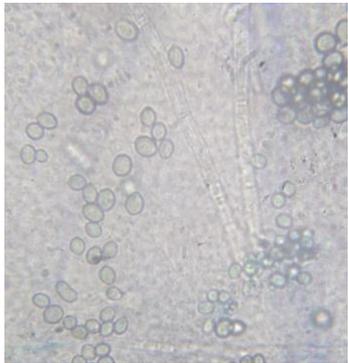
Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 2.

Microrganismo	Características
 <p>Fig. 58 Características macroscópicas de hongos presentes en el abono orgánico, tratamiento 2.</p>	<p><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Anverso:</b>                      Colonias de color verde y de textura granulosa.</li> <li>- <b>Reverso</b>                      Color amarillo crema.</li> </ul>

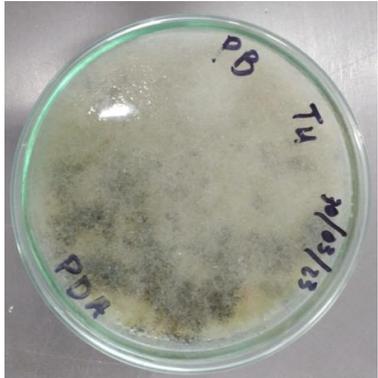
<p style="text-align: center;"><i>Aspergillus spp</i></p>  <p>Fig. 59 Características microscópicas de <i>Aspergillus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 2.</p>	<p><b>Microscópicas</b></p> <p>Hifas: septadas                  Esporocarpio: conidióforo de pared delgada                  Esporas: conioesporas</p>
---	---

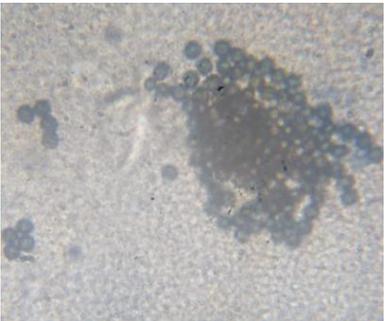
Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 3.

Microorganismo	Características
 <p>Fig. 60 características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 3.</p>	<p><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Anverso:</b></li> </ul> <p>Colonias color crema con textura algodonosa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Reverso</b></li> </ul> <p>Amarillo crema</p>

 <p>Fig. 61 características microscópicas de Saccharomyces spp (levadura) presente en el abono orgánico, tratamiento 3.</p>	<p><b>Microscópicas</b></p> <p>Levadura con células ovaladas que se agrupan en pequeños grupos, las células hijas no se desprenden bien de la célula madre.</p>
--	---

Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 4.

Microrganismo	Características
 <p>Fig. 62 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 4.</p>	<p><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Anverso:</b></li> </ul> <p>Colonias de masa miceliar blanca y esporangios maduros de color negros. Presenta texturas algodonosas laxas, que cubre parcialmente la caja de Petri.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Reverso</b></li> </ul> <p>Color café crema</p>

 <p>Fig. 63 Características microscópicas de <i>Rhizopus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 4.</p>	<p><b>Microscópicas</b></p> <p>Hifas: sinfonizadas de color café                  Esporocarpo: esporangio - Esporas: esporangioesporas</p>
--	--

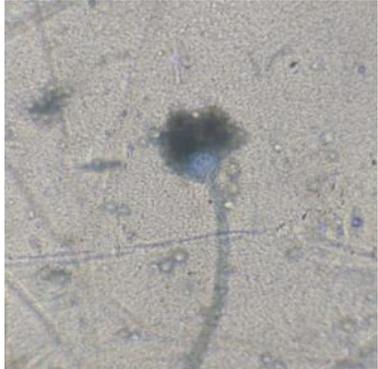
Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 5.

Microrganismo	Características
 <p>Fig. 64 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 5.</p>	<p><b>Macroscópicas</b></p> <p><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Anverso:</b></li> </ul> <p>Colonias de masa miceliar blanca y esporangios maduros de color café. Presenta texturas algodonosas laxas, que cubre parcialmente la caja de Petri.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Reverso</b></li> </ul> <p>Color café crema</p>

 <p>Fig. 65 Características microscópicas de <i>Rhizopus spp</i> (moho) presente en el abono orgánico, tratamiento 5.</p>	<p><b>Microscópicas</b></p> <p>Hifas: sinfonizadas de color café                  Esporocarpio: esporangio - Esporas: esporangioesporas</p>
--	---

Características macroscópicas y microscópicas de hongos presentes en el abono orgánico obtenido del tratamiento 6.

Microorganismo	Características
 <p>Fig. 66 Características macroscópicas de hongos presente en el abono orgánico, tratamiento 6.</p>	<p><b>Macroscópicas</b></p> <p><b>Macroscópicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Anverso:</b></li> </ul> <p>Colonias de color crema y textura alfelpada, no cubre a totalidad la caja de petri</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Reverso</b></li> </ul> <p>Color crema</p>

 <p>Fig. 67 Características microscópicas de hongo presente en el abono orgánico, tratamiento 6.</p>	<p><b>Microscópicas</b></p> <p>Hifas: sinfonizadas                  Esporocarpio: esporangio - Esporas: esporangioesporas</p>
---	---

Dentro de la diversidad hongos encontrados en los abonos orgánicos se resalta la presencia de *Trichoderma spp* (Fig.71) en los tratamientos T2, T3 y T5 un microorganismo de alto interés agrícola por su efecto amortiguador en plantas en situaciones de estrés y su acción biocontroladora con patógenos en cultivos agrícolas [26].

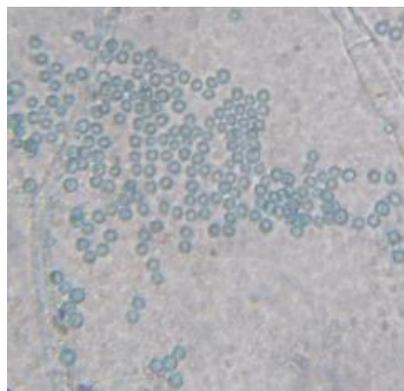


Fig. 68 *Trichoderma spp* presente en abono orgánico, tratamiento 5

La presencia considerable de levaduras, en los medios de cultivos realizados para cada tratamiento, se asocia a que cada una de las muestras analizadas (producto final de cada tratamiento), posee buenas fuentes de carbono orgánico y nitrógeno total (fuentes inorgánicas y orgánicas), ya que estas son necesarias para su crecimiento y desarrollo.

Caso contrario a otros estudios, que han reportado que no hay presencia de levaduras o presencia de esta en bajas concentraciones en el abono orgánico obtenido mediante el proceso de pacas biodigestoras, a causa de que el pH fue poco favorable para su crecimiento [18] y [22].

### 6.6 Prueba porcentaje de germinación del abono en semillas *Solanum lycopersicum*



Fig. 69 Siembra de semillas de tomate, para cada uno de los abonos orgánicos evaluados

TABLA XII  
PORCENTAJES DE GERMINACIÓN

Tratamiento	R1	R2	R3	Promedio	% Germinación
1	7	7	5	6,333	70,370
2	8	4	7	6,333	70,370
3	7	8	7	7,333	81,481
4	7	7	6	6,667	74,074
5	6	7	7	6,667	74,074
6	6	7	6	6,333	70,370
7	4	7	8	6,333	70,370
8	7	6	7	6,667	74,074

La TABLA XII, muestra los porcentajes de germinación de cada uno de los abonos orgánicos obtenidos, aunque el rango óptimo para la germinación de la semilla está entre el 80 % y el 100 %, solo el tratamiento T3 logró este rango, se cree que esto se debe a la falta de pruebas de viabilidad

de la semilla, antes de la siembra. Debido a que algunas semillas presentaban grietas y estaban en malas condiciones, lo que puede haber contribuido a los bajos porcentajes de germinación.



Fig. 70 Plántulas de tomate a los 12 días de siembras, tratamiento T8



Fig. 71 Plántulas de tomate a los 12 días de siembras, tratamiento T5.

## 6.7 Análisis estadísticos

- Análisis de varianza en Statgraphics

Con este análisis se responde a la pregunta estadística realizada. Efecto de la reducción de tamaño de partícula, adicción de microorganismo y el uso de diferentes volúmenes de material orgánico, sobre la velocidad de degradación de la materia orgánica durante el proceso de pacas biodigestoras.

Los resultados de la Anova mostraron, que existe una relación estadísticamente significativa entre la reducción del tamaño de partícula (A), La adición de microorganismos (B) y el volumen de la paca biodigestora(C), y sus interacciones AB y BC, sobre la variable de respuesta velocidad de degradación, para un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, el volumen de la paca biodigestora (C) y adición de microorganismos(B) son las que más influyen en la velocidad de degradación.

El modelo se ajustó con r-cuadrado de 99,948, lo que indica que es bueno, pues es mucho mayor al 80%.

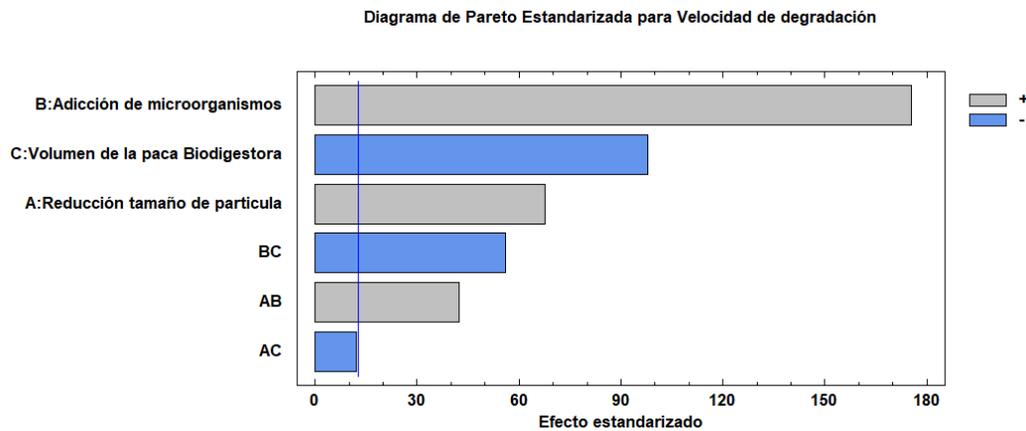


Fig. 72 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el la velocidad de degradación

El diagrama de Pareto estandarizado para la velocidad de degradación (Fig 75), demuestra que los factores A, B, C y sus interacciones BC Y AB, son fuentes importantes de la variación en la velocidad de degradación, pues estos superan el valor crítico (línea azul). Los factores A, B y la interacción AB, influyen positivamente en la velocidad de degradación, es decir que si las fuentes de variación aumentan la variable de respuesta también aumenta. En tanto, los factores C y la interacción BC, contribuyen a la disminución de la velocidad de degradación cada vez que estos aumentan.

Efecto de la reducción de tamaño de partícula, adicción de microorganismo y el uso de diferentes volúmenes de material orgánico, sobre el porcentaje de germinación y el porcentaje de cenizas (calidad del abono).

Basándonos en los resultados del estadístico R-Cuadrado, se puede decir que el modelo ajustado explica 73,3326% y de 93,2047 de la variabilidad en porcentaje de germinación y porcentaje de cenizas, respectivamente, con valores P mayores a 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% o mayor.

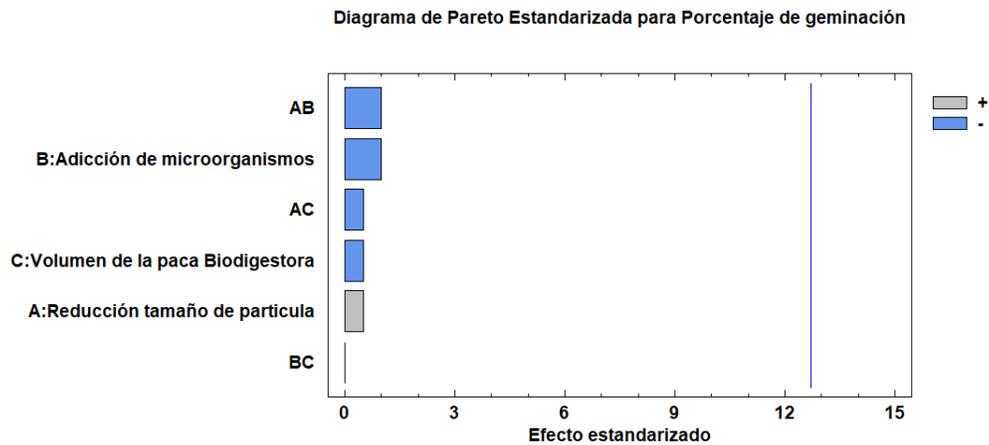


Fig. 73 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el porcentaje de germinación

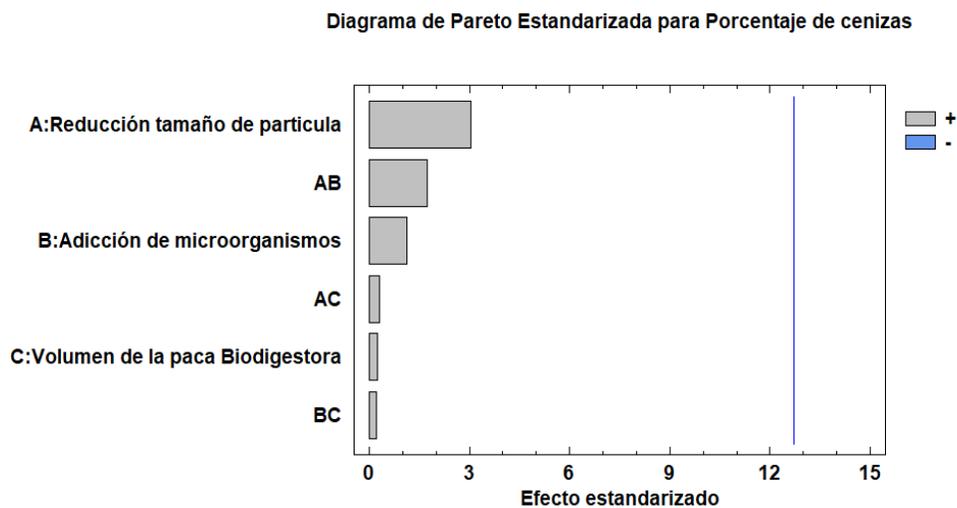


Fig. 74 Efecto de los factores evaluados con el diseño experimental, sobre el porcentaje de cenizas

El diagrama de Pareto estandarizado para las variables de respuesta, porcentaje de germinación (Fig 76) y porcentaje de cenizas (Fig 77), demuestra que ninguno de los factores (A, B y C), influyen en la variación del porcentaje de germinación, puesto que no alcanzaron el valor crítico y se encuentra de demasiado lejos de estos.

Con los resultados estadísticos obtenidos, se evidencia que factores evaluados en el diseño experimental, como la reducción del tamaño de partícula, adicción de microorganismo y el volumen

de las pacas biodigestoras, influyen más en el proceso de digestión del material orgánico (velocidad de degradación) que en la calidad del abono orgánico.

- Prueba estadística T Student

Con el fin de comparar la efectividad del uso de microorganismos, sobre la reducción del tiempo de degradación de la materia orgánica, se realizó una prueba T Student de muestras Independientes con el programa estadístico IBM SPSS STATISTICS 27, para evaluar si dos grupos difieren de manera significativa respecto a sus medias en una variable.

**Grupo 1:** pacas sin adición de microorganismos.

**Grupo 2:** pacas con adición de microorganismos.

**Variable:** velocidad de degradación paca biodigestora

La prueba comparo si existe influencia de la inoculación microbiana en la velocidad de degradación de las pacas biodigestoras.

TABLA XIII  
NORMALIDAD VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN

Shapiro - Wilk		
<b>P-Valor (SAM) = 0.727</b>	>	<b><math>\alpha = 0.05</math></b>
<b>P-Valor (AM) = 0.958</b>	>	<b><math>\alpha = 0.05</math></b>
<b>Análisis:</b>		
La variable velocidad de degradación en ambos grupos se comporta normalmente		

TABLA XIV  
IGUALDAD DE VARIANZA

<b>Prueba de Levene</b>		
<b>P-Valor = 0,140</b>	>	<b><math>\alpha = 0.05</math></b>
<b>Análisis:</b>		
Las varianzas de la variable velocidad de degradación son iguales		

TABLA XV PRUEBA ESTADISTICA T STUDENT

<b>P-Valor = 0.021</b>	<	<b><math>\alpha = 0.05</math></b>
<b>Conclusión:</b>		
<p><b>H<sub>1</sub></b> = Existe una diferencia significativa entre la media de velocidad de degradación en pacas sin adición de microorganismos (grupo 1) y las pacas inoculadas con adición de microorganismos (grupo 2)</p> <p>La media de velocidad de degradación del grupo 1 fue mayor que las del grupo 2.</p>		

## 6.6 Socialización de resultados con las comunidades del municipio de Carepa-Antioquia

La socialización de resultados parciales de la evaluación del proceso de pacas biodigestoras, se realizó por medio de dos talleres teórico-prácticos, dirigidos a la comunidad rural El Talego y la institución educativa La Colombia, ambos pertenecientes municipios de Carepa -Antioquia.

El primer taller teórico- práctico fue realizado en la Institución educativa La Colombia, el cual contó con la participación de 28 estudiantes, pertenecientes a diferentes grados de la secundaria y 3 educadores de la misma institución. Este taller tuvo lugar el día 23 de febrero de 2023, con hora de inicio 09:30 am y hora de finalización a las 12:00 pm. La jornada estuvo dividida en dos momentos, de 09:30 am a 10:30 am, se realizó una charla teórica sobre el proceso biodigestoras, se socializaron los resultados parciales obtenidos y con bases a estos, se explicó de la mejor forma el proceso de construcción una paca biodigestora. Finalizada la exposición, se pasó a un momento de evaluación de los temas aprendidos, mediante una ficha técnica.

Entre las 10:30 am a 12:00 pm, se puso en práctica lo aprendido en la jornada teórica, siendo necesario el desplazamiento de estudiantes de las instalaciones de la institución educativa a una granja perteneciente a dicha institución.

Evidencias fotográficas, taller de socialización de resultados con la comunidad educativa la Colombia.



Fig. 75 Explicación y funcionamiento del proceso de pacas biodigestoras, en instalaciones de la Institución educativa la Colombia



Fig. 76 Socialización de resultados obtenidos, en las instalaciones de la Institución educativa la Colombia



Fig. 77 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en la granja de la institución educativa la Colombia



Fig. 78 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en la granja de la institución educativa la Colombia



Fig. 79 Paca biodigestora construida por los estudiantes de la Institución educativa la Colombia



Fig. 80 Paca biodigestora construida por los estudiantes de la Institución educativa la Colombia

El segundo taller teórico- práctico fue realizado en la vereda el Talego, y se contó con 20 asistentes. El taller fue realizado el día 23 de febrero de 2023, en la jornada de la tarde de 2:30 pm a 5:00 pm, y al igual que el primer taller hubo dos momentos, un parte teórica y parte práctica.

Evidencias fotográficas, taller de socialización de resultados con la comunidad rural el talego



Fig. 81 Explicación y funcionamiento del proceso de pacas biodigestoras, en la caseta comunal Vereda el Talego



Fig. 82 Evaluación a asistentes, sobre los temas aprendidos y refrigerio, en la caseta comunal Vereda el Talego



Fig. 83 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego



Fig. 84 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego



Fig. 85 Parte práctica (construcción de una paca biodigestora), en granja de la Vereda el Talego



Fig. 86 Paca biodigestora construida por los asistentes del taller de socialización de resultados, en la vereda el Talego



Fig. 87 Paca biodigestora construida por los asistentes del taller de socialización de resultados, en la vereda el Talego



Fig. 88 Asistentes del taller de socialización de resultados, con la comunidad rural el Talego

---

## 7. CONCLUSIONES

La evaluación del proceso de pacas biodigestoras, realizada a través del proceso fermentativo en estado sólido de los residuos orgánicos, permitió la identificación una serie de etapas como mesófila, termófila, enfriamiento y maduración; tal como lo reportan otros estudios realizados de pacas biodigestoras. Las etapas como mesófila, termófila, enfriamiento y maduración permitieron relacionar el proceso de pacas biodigestoras con el proceso de compostaje, ya que la evolución de las temperaturas registradas durante el proceso en pacas fue similar a las del comportamiento característico del compostaje, marcando diferencia en que el proceso de degradación de materia orgánica en pacas, se llevó a cabo en condiciones anaeróbicas no estrictas, es decir, en un ambiente con poca disponibilidad de oxígeno, por lo que el material fue comprimido y no apilado, y por tanto la nula o poca generación de olores, presencia de vectores y roedores alrededor de las pacas.

Las pacas biodigestoras requieren de mayor tiempo para alcanzar las temperaturas máximas, pues el registro de temperaturas en cada uno de los tratamientos mostró que las temperaturas máximas fueron alcanzadas a la cuarta semana del proceso, lo que difiere del proceso de compostaje que logran estos valores a partir de los 15 días; lo anterior indica que las pacas biodigestoras tienen una velocidad de degradación más lenta.

Hubo una relación entre cada una de las variables medidas, al inicio del proceso, la temperatura iba en aumento y se registraron oscilaciones de pH entre el rango ácido además de una disminución rápida en los cambios de altura. Mientras que, en la fase de estabilización del proceso, la temperatura iba disminuyendo a medida que el pH iba aumentando, hasta llegar el punto de neutralidad, con una poca y lenta variación en los cambios de altura. También, se identificó que a medida que la temperatura aumenta, la humedad disminuye, a causa de la pérdida de agua por generación de vapor, y a medida que la temperatura disminuye la humedad vuelve a aumentar, lo que se relaciona a que durante el proceso, el material orgánico absorbe la humedad del ambiente, para este caso humedades relativamente altas, ya que la región de Urabá es una zona altamente humedad, y no se relaciona por contenidos de agua adicionados o proporcionados por lluvias, ya que durante el proceso de digestión del material no se adiciono agua a los tratamientos y el experimento fue realizado bajo techo y en un lugar cerrado.

---

Los resultados del seguimiento de los parámetros mencionados anteriormente, muestra que hay una diferencia en los tiempos que pasan las etapas del proceso (termófila, mesófila, enfriamiento y maduración), entre los tratamientos que procesan diferentes volúmenes de material orgánico, por ejemplo en los tratamientos que procesan un volumen mayor de material, alcanzan la etapa de maduración justo a los 4 meses del proceso, mientras que los tratamientos que procesan una menor cantidad de volumen alcanzan esta etapa a los 2 meses. Lo anterior refleja que, si se quiere obtener abono orgánico en un periodo de tiempo rápido, se deben procesar bajos volúmenes de materia orgánica, pero también es importante tener en cuenta que, a menor volumen, el proceso no alcanza temperaturas altas con un periodo de duración largo, lo que influye en la calidad del abono orgánico.

Se obtuvieron tasas de conversión menores al 50% en cada uno de los tratamientos realizados, esto debido a que se utilizaron residuos orgánicos frescos con un contenido de humedad alto, siendo el contenido de agua presente en estos materiales el que más aportó al registro de valores altos, de la cantidad inicial de material orgánico usado. Lo anterior influyó en los bajos valores registrados de la cantidad final del producto obtenido, por la gran pérdida de agua durante el proceso. El rendimiento en cuanto la cantidad de abono orgánico obtenido, fue de alrededor del 50%, siendo los residuos de hojarasca el representante del resto de material no convertido en abono.

El análisis de varianza obtenido mediante el software estadístico Statgraphics, muestra que factores como trituración de la materia orgánica, adición de microorganismos al proceso y procesar volúmenes diferentes de material, en pacas biodigestoras, influyen solo en el proceso de digestión de la materia orgánica y no en la calidad del producto final (abono), esto es debido a que los abonos orgánicos analizados en el laboratorio no presentaron una variación significativa en cuanto los valores medidos de parámetros fisicoquímicos como densidad, pH, % saturación, % cenizas, % humedad, conductividad eléctrica.

Los factores mencionados anteriormente presentaron un efecto significativo en la velocidad de degradación de los residuos orgánicos, siendo la adición de microorganismos y la reducción de tamaño de partícula, los factores que más influyen positivamente en la velocidad de degradación, mientras que el volumen a procesar influye negativamente en la velocidad de degradación, es decir, si se procesan volúmenes mayores de materia orgánica se tienen velocidades de degradación

---

más lentas, esto con respecto a la disminución del tamaño de cada paca, el cual se tomó como bases para el determinar la velocidad de degradación.

La media de velocidad de degradación en pacas biodigestoras, no inoculadas con biopreparado microbial, es significativamente mayor al compararla con pacas inoculadas, lo que demuestra que no es necesario realizar inoculaciones microbianas al material orgánico inicial, ya que los microorganismos nativos del chipper y el ambiente presentaron ser altamente eficientes, en el proceso de degradación. Esto se traduce en beneficios para su implementación, ya que reduce los costos de instalación y el tiempo de armado de las pacas.

Los niveles de porcentaje de humedad en los abonos orgánicos pueden variar dependiendo de la normativa de cada país o entidad, así como el tipo de abono a producir. En estos aspectos los abonos obtenidos, no alcanzaron el límite máximo permisible de 35% por la norma NTC 5167 (2011), sin embargo, entraron en el rango permisible de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Con el uso de pacas biodigestoras, se obtuvieron abonos orgánicos al cabo de los 2.5 meses, que cumplen con ítems importantes de la norma de calidad NTC 5167(2011) garantizando un bajo riesgo de salinización de los suelos, capacidad de retención de humedad adecuada, pH neutro del material, cenizas totales dentro del rango permitido y densidades que refleja una buena porosidad del material. Lo que demuestra que es un método rápido y sencillo para la obtención de abonos de calidad, empleando residuos de alto grado de biodegradabilidad y pequeños volúmenes. Sin embargo, los abonos obtenidos, no alcanzaron 35% humedad permitida por la norma, pero se catalogan como estables puesto que no superan el 60% de humedad.

Mediante el uso de pacas biodigestoras se puede fomentar, facilitar y construir conocimiento en materia de educación ambiental, a través de encuentros intergeneracionales en comunidades del sector urbano y rural del municipio de Carepa Antioquia, como alternativa para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, brindando estrategias para su aprovechamiento a través de actividades lúdicas, donde se les enseñó como construir una paca biodigestora, implementado los resultados obtenidos en la investigación.

---

## 8. RECOMENDACIONES

El monitoreo de los parámetros físico químicos, pH, altura, temperatura y humedad, permitió identificar las principales etapas del proceso de digestión en un periodo de 4 meses, donde se asume que las pacas que procesaron un menor volumen, de materia orgánica fresca, T1, T3, T5 y T7 pasaron por la fase termófila en un tiempo fuera de los intervalos de monitoreo, por lo que sugiere diseñar tiempos de muestreo diferentes para las pacas de estos volúmenes, muestreos más seguidos.

Pese a que existe una diferencia en los tiempos en que alcanzan todas las etapas del proceso de pacas biodigestoras, entre tratamientos que degradan volúmenes diferentes de materia orgánica, se recomienda extender el proceso hasta los cinco o seis meses, en los tratamientos con mayor volumen, ya que la etapa de maduración influye en la calidad del abono orgánico y por tanto es importante que el proceso pase por esta.

Debido a que casi la mitad del producto final obtenido en cada uno de los tratamientos, fue hojarasca (material no convertido), se recomienda utilizar menos cantidad de este material o someterlo a un proceso de trituración, antes de añadirlo a las pacas biodigestoras, ya que son materiales que presentan un contenido de humedad muy bajo y por ende un bajo grado de biodegradabilidad, o por el contrario reemplazarlas por materiales verdes y frescos, como residuos de poda, césped, etc., que además de servir como biofiltro aportan buenas cantidades de nitrógeno al proceso.

Se recomienda hacer pruebas de viabilidad de las semillas, antes de realizar las pruebas de germinación, puesto que es un paso esencial para garantizar tasas de germinación óptimas, ya que algunas semillas disminuyen su poder germinativo a medida que pasa el tiempo, por lo cual es necesario realizar este tipo de pruebas para seleccionar las semillas más sanas y viables.

Si el porcentaje de humedad es mayor al 35% (Norma NTC 5167/2011) y se desea comercializar el producto, se sugiere entonces realizar un proceso de secado durante una semana, la cual puede ser llevada a cabo de forma mecánica o ambiente. Para el secado en condiciones ambiente se recomienda extender una lona de plástico negro y vertir el material de forma homogénea, en patios

de secado o camas africanas. Por el contrario, si el producto final no se obtiene con fines comerciales, sino de consumo personal, entonces se puede usar, solo si no sobrepasa el 60 % de humedad, según La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

---

**REFERENCIAS**

- [1] J. P. Peñalosa Bernal, “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 [Trabajo de grado profesional]” Medellín (Colombia): Universidad de Antioquia, 2022.
- [2] "Basura Cero". Secretaria de Educación Antioquia [En línea]. Disponible <https://www.seduca.gov.co/sala-de-prensa/archivo-de-prensa/item/3484-basura-cero> (accedido el 18 de abril de 2023). Revisar Basura Cero (seduca.gov.co).
- [3] CORANTIOQUIA. “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” 2005.
- [4] D. Hoornweg, P. Bhada-Tata, “What a waste: a global review of solid waste management” 2019. [Online]. Available [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/ELearning/Moocs/Solid\\_Waste/W1/What\\_Waste\\_Global\\_Review\\_2012.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/ELearning/Moocs/Solid_Waste/W1/What_Waste_Global_Review_2012.pdf)
- [5] Secretaría de Agricultura y Medio Ambiente del Municipio de Carepa Antioquia, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipio de Carepa, 2020.
- [6] J. González, “Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución,” *Rev. Gestión y Región*, no. 22, pp. 101–119, 2016, [Online]. Available: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/gestionregion/article/view/149>
- [7] Martínez and P. Gonzales, “Guía Técnica Para el Aprovechamiento de Residuos Orgánicos,” *Grup. Investig. Sist. Integr. Prod. Agricola y For.*, p. 159, 2014, [Online]. Available: [http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP\\_SR.pdf](http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf)
- [8] J. Gilbert, “ECONOMIA CIRCULAR: CARBONO, NUTRIENTES Y SUELO,” *Rev. Asociación internacional de residuos sólidos (ISWA)*, 2015, [Online]. Available: <https://www.iswalac.org/descarga/Traduccion-espanol-Task-Force-Report-4.pdf>
- [9] L. C. Ossa-Carrasquilla, M. A. Correa-Ochoa, and L. M. Múnera-Porras, “The biodigester bale as an organic waste treatment strategy: A bibliographic review,” *Prod. y Limpia*, vol. 15, no. 2, pp. 71–91, 2020, doi: 10.22507/pml.v15n2a4.
- [10] Ministerio de ambiente y medio rural marino, “Manual de compostaje casero,” *Amigos la tierra*, no. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, p. 21, 2010, [Online]. Available: [https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24\\_tcm30-185556.pdf](https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf)
- [11] Sagarpa, “Elaboración de composta,” *Subsecr. Desarro. Rural*, p. 8, 2010, [Online]. Available: [https://www.ciaorganico.net/documypublic/513\\_librosagronicos.blogspot.com-Elaboraci%C3%B3n\\_de\\_composta.pdf](https://www.ciaorganico.net/documypublic/513_librosagronicos.blogspot.com-Elaboraci%C3%B3n_de_composta.pdf).
- [12] C. Y. Arenas Osorno, “Implementación de un sistema integral de compostaje para el

- tratamiento de los residuos orgánicos en el Centro Educativo Rural Josefa Romero, Municipio de Dabeiba”. Dabeiba (Colombia): Universidad Pontificia Bolivariana, 2017.
- [13] (S/f). Recuperado el 14 de junio de 2022, de <https://www.paisajeo.org/post/paca-digestora-una-alternativa-revolucionaria-para-el-aprovechamiento-de-residuos-org%C3%A1nicos>.
- [14] P. Bueno, M. Blanco, and F. Capitán, “Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje,” 2005. Available: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>
- [15] K. Camara and J. Laines, “La digestión anaerobia y la bioquímica,” *Kuxulkab’*, vol. 17, no. 32, pp. 89–93, 2011, [Online]. Available: <http://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/380/303>
- [16] L. Pastrana, “Fundamentos De La Fermentación En Estado Sólido Y Aplicación a La Industria Alimentaria,” *Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 1, no. 3, pp. 4–12, 1996, doi: 10.1080/11358129609487556
- [17] R.Y.Stanier, J.L.Ingraham, M.L.Wheelis and P.R. Painter, “Microbiología Segunda edición”. Editorial Reverté S.A. España, 1992, [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=2u-6Q2XCMDgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Stanier+et+al.,+\(1992\).+Microbiolog%C3%ADa+\(Segunda+edici%C3%B3n+ed.\).+Editorial+Revert%C3%A9+S.A.+Espa%C3%B1a&ots=4Wkjm5pJLs&sig=ZH5Reu4E6Cp-tbZzm\\_qU73z\\_0oo#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=2u-6Q2XCMDgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Stanier+et+al.,+(1992).+Microbiolog%C3%ADa+(Segunda+edici%C3%B3n+ed.).+Editorial+Revert%C3%A9+S.A.+Espa%C3%B1a&ots=4Wkjm5pJLs&sig=ZH5Reu4E6Cp-tbZzm_qU73z_0oo#v=onepage&q&f=false)
- [18] L. C. Ossa, “Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquía,” *Altern. sustentables y Particip. comunitaria*, pp. 153–163, 2016. Available: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/13416/1/OssaLaura\\_2016\\_PacasBiodigestorasTratamientoEcologico.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/13416/1/OssaLaura_2016_PacasBiodigestorasTratamientoEcologico.pdf)
- [19] M. S. Medina Lara et al., “Production of a compost accelerator inoculant (Generación de un inoculante acelerador del compostaje),” *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 50, no. 2, pp. 206–210, 2018, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.ar/pdf/ram/v50n2/v50n2a14.pdf>
- [20] J. Guzmán, “FERTILIZANTES QUIMICOS Y BIOFERTILIZANTES EN MEXICO,” CEDRSSA, 2018. Available: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/64%20Fertilizantes%20qu%C3%ADmicos%20y%20biofertilizantes%20en%20M%C3%A9xico..pdf>
- [21] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], “Norma Técnica Colombiana [NTC] 5167,” *Icontec Int.*, no. 571, pp. 1–51, 2011, [Online]. Available: [www.icontec.org](http://www.icontec.org)
- [22] G. Silva and Y. López, “Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios \*,” vol. 10, no. 2, pp. 38–52, 2015. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n2/v10n2a05.pdf>

- 
- [23] R. Espinosa, L. Catalina, and O. Carrasquilla, “Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México,” *Textual*, no. 69, pp. 85–101, 2017, doi: 10.5154/r.textual.2017.69.005.
- [24] V. Antury, “Evaluación de aceleradores para el tratamiento de residuos orgánicos del barrio Portal de María en Facatativá, Cundinamarca, a través de pacas digestoras,” *Ingeniería Ambiental*, Universidad Nacional, Facatativá (Colombia), 2022.
- [25] A.D. Ochoa (2019), “Desarrollo de alternativas para el manejo adecuado de residuos sólidos y orgánicos en el municipio de San Pedro de Urabá desde diversos espacios educativos,” *Universidad de Antioquia*, 2019. Available: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/12176/1/OchoaAngel\\_2019\\_DesarrolloAlternativasManejoAdecuado.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/12176/1/OchoaAngel_2019_DesarrolloAlternativasManejoAdecuado.pdf)
- [26] H. Chiriboga, G. Gómez, and K. Gárces, “*Trichoderma* spp. Para el control biológico de enfermedades Ing.,” *Biomass*, pp. 1–28, 2015, [Online]. Available: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2647/BVE17038725e.pdf?sequence=1>

**ANEXOS**

Residuos orgánicos procesados en pacas biodigestoras



Crecimiento de hongos durante el proceso de degradación de material en algunos tratamientos



Montaje de tratamientos experimentales



Germinación de semillas procedentes de los residuos de frutas y verduras



Macroorganismo presente en las pacas biodigestoras *Brassolis sophorae*

