

**EVALUACIÓN DE UN PLAN DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS
ORGÁNICOS, PROVENIENTES DEL MUNICIPIO DE CHOACHÍ POR MEDIO DE
UN PROCESO TECNOLÓGICO**

BILLY JOE JIMÉNEZ ALVAREZ

**Proyecto integral de grado para optar el título de
Ingeniero Químico**

Director

HARVEY MILQUEZ SANABRIA

Ingeniero Químico

Asesor

FERNANDO MORENO TORRES

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ DC

2021

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Diciembre 2020

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rectos del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de Facultad

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de Programa

Dra. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

Primero que todo este logro se lo dedico a Dios por darme salud y vida, sabiduría y compromiso a la hora de realizar este proyecto. Una dedicatoria especial a mis padres por haberme apoyado incondicionalmente en este proceso a pesar de todo. No menos importante, le dedico este triunfo al gremio de la ingeniería química, por ser esta una de las mejores profesiones, donde te enseña cada concepto de la vida y tener algo muy claro **SIEMPRE SER MEJOR.**

Por último le dedico este logro a mi novia la cual me apoyo mucho y siempre tuvimos la promesa de seguir creciendo como persona y profesionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Existen 3 personas a las cuales quiero agradecer de todo corazón.

La primera es Paula Buitrago quien desde un principio me apoyó en todo este proceso y a su vez dio tiempo de su vida para apoyarme en cualquier cosa que necesitaba.

La segunda es la Ing. Natalia Leal, la cual fue una persona que me apoyo bastante en este proceso de grado, aclaró dudas y fortaleció conceptos necesarios para la creación de este documento.

La tercera al Ing. Harvey Milquez, el director que todo estudiante quisiera tener, pues aparte de ser una gran persona, es una persona con un conocimiento inmenso y que sabe cómo transmitirlo con el fin de ver progresar a las personas. Le agradezco su tiempo y dedicación en este proceso.

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

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS	16
1.1 Clasificación	17
1.1.1 <i>Según su fuente de generación</i>	17
1.1.2. <i>«Según su naturaleza o características físicas</i>	18
1.2 Porcentaje de humedad	22
<i>Resultados del porcentaje de humedad:</i>	22
1.3 Sólidos totales	23
<i>Resultados de solidos totales</i>	23
1.4. Sólidos volátiles	25
<i>Resultados de solidos volátiles</i>	25
1.5 Porcentaje de cenizas	26
<i>Resultados de porcentaje de cenizas</i>	26
2. IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS	32
2.1 Compostaje	32
2.1.2 <i>Proceso de compostaje</i>	32
2.1.3 <i>Fases del compostaje</i>	34
2.1.4 <i>Parámetros de control</i>	35
2.1.5 <i>Herramientas o equipos</i>	37
2.1.6 <i>Técnicas de compostaje</i>	38
2.1.7 <i>Sistemas abiertos o en pilas</i>	39
2.1.8 <i>Sistemas cerrados (compostadores)</i>	40
2.2 Lombricultura	52
2.2.1 <i>Características de la lombriz</i>	53
2.2.2 <i>Factores para proceso de lombricultura</i>	53
2.2.3 <i>Proceso para la plantación de lombricultura</i>	55

2.3 Digestión anaerobia	63
2.3.1. Factores que afectan la digestión anaerobia.	64
2.3.2 Biodigestores	76
2.4. Degradación de materia orgánica por larvas de moscas	95
2.4.1 Condiciones	96
2.4.2 Formación	96
3. SELECCIÓN DEL MÉTODO ADECUADO PARA MUNICIPIO DE CHOACHÍ	107
4. COSTOS DEL MÉTODO TECNOLÓGICO	111
4.1 Costos de capital	111
5. CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mapa del municipio de Choachí	14
Figura 2. Clasificación de residuos	18
Figura 3. Clasificación de residuos según naturaleza	19
Figura 4. Proceso de compostaje	33
Figura 5. Condiciones ideales para compostaje	34
Figura 6. Fases del compostaje	35
Figura 7. Metodología compostaje de residuos municipales	41
Figura 8. Compost a partir caña azúcar	43
Figura 9. Efecto de residuos de origen vegetal y animal	45
Figura 10. Producción con tres residuos	47
Figura 11. Proceso de reproducción de la lombriz	54
Figura 12. Lombricultura	57
Figura 13. Comportamiento reproductivo, lombriz roja californiana	58
Figura 14. Lombricultura en pulpa de café	59
Figura 15. Implementación de la producción de lombricultura	60
Figura 16. Optimización del tratamiento de residuos	68
Figura 17. Manejo de vinazas	70
Figura 18. Estudio de viabilidad planta de metanización	71
Figura 19. Biometanización de residuos sólidos urbanos	73
Figura 20. Partes que componen el biodigestor	77
Figura 21. Etapas operacionales de reactor anaeróbico tipo batch	81
Figura 22. Funcionamiento biodigestores comunes	82
Figura 23. Diseño de biodigestor anaerobio en mercado Tiquipaya	86
Figura 24. Evaluación de un sistema de biodigestión en clima frío	88
Figura 25. Condiciones de operación de biodigestor	90

Figura 26. Evaluación de biodigestores en geo membrana en clima medio	92
Figura 27. Degradación de residuos sólidos orgánicos por larvas de moscas	99
Figura 28. Degradación de residuos de almidón y cárnicos	101
Figura 29. Proyecto Ecodiptera	102
Figura 30. Evaluación de un sistema de vermicultura	104

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resultados de caracterización de residuos	20
Tabla 2. Resultados de parámetros de medición a manera de predicción	30
Tabla 3. Resultados medición de compostaje	48
Tabla 4. Resultados de parámetros de medición de lombricultura	61
Tabla 5. Resultados de parámetros de medición de digestión anaerobia	74
Tabla 6. Resultados de parámetros de medición de biodigestores	93
Tabla 7. Resultados de parámetros de medición de degradación por larvas de mosca	105
Tabla 8. Promedio de porcentaje de abono y biogás	108
Tabla 8. Matriz de decisión de tecnologías de aprovechamiento de residuos	109
Tabla 10. Niveles máximos de metales pesados	110
Tabla 11. Niveles máximos para macro contaminantes	110
Tabla 12. Valor unitario por cada equipo y suplemento para planta de compostaje	112
Tabla 13. Valor monetario del compost	113

RESUMEN

Choachi es uno de los municipios aledaños a Bogotá que suministra todo tipo de hortalizas, verduras y frutas y a su vez realiza la cosecha para poder abastecer el consumo diario del mismo municipio; por ende, éste genera una cantidad de residuos orgánicos considerables, para poder llegar a establecer un estudio y así aprovechar esta materia y transformarla en un servicio vital para la vida cotidiana. Durante la recolección de los residuos que se realiza el municipio de Choachi no se tiene ningún tipo de tratamiento de los mismos por lo tanto estos van directamente al relleno sanitario para su disposición final, por tal motivo surge la idea de implementar un proceso tecnológico con el que se busca transformar la materia orgánica mediante el control de condiciones físico químicas de los residuos y de las condiciones de operación del proceso de tal manera que el resultado sea un beneficio para la comunidad del municipio, por tal motivo se buscaron los métodos que más se acomodan a la necesidad de la comunidad del municipio; en el caso de la producción de biogás se aprovecha como fuente de energía para llevarlo a un proceso de combustión y poder redirigir esa energía calorífica a energía aprovechable por la comunidad, reduciendo así costos de un consumo energético suministrado por una entidad privada o gubernamental (EEC); En cuanto a la mejoría del abono se dirigirá el resultado a la parte agrícola para mejorar la calidad de los cultivos por causa de un mejor abono.

Palabras claves. Residuos orgánicos, Compostaje, Lombricultura, Digestión anaerobia, Moscas, Costos, Caracterización.

INTRODUCCIÓN

«El Municipio de Choachí pertenece al Departamento de Cundinamarca y se encuentra ubicado en la Provincia de Oriente del Departamento de Cundinamarca, como se puede observar en la figura 1 del presente documento, de esta provincia también hacen parte los municipios de Cáqueza, Chipaque, Fómeque, Fosca, Guayabetal, Gutiérrez, Quetame, Ubaque y Une.

La cabecera Municipal se encuentra localizada en 04° 31'52" de latitud norte y 73° 55'33" de longitud oeste. Su altura sobre el nivel del mar es de 1900 msnm. Con una temperatura media de 18° C. Está comunicada con la Ciudad Santa Fe de Bogotá por carretera pavimentada con una extensión de 38 km. Con Ubaque y Fómeque dista 10 km. Y 16 km. Respectivamente.

Además, este municipio se caracteriza por poseer una gran cantidad de suelo fértil el cual es beneficioso para el sector agrícola a pesar que ya no es de vital importancia para la comunidad debido a que se están enfocando en el turismo y hotelería. Choachí cuenta con un área de 25.000 hectáreas aproximadamente las cuales el 70 % están destinadas a la producción agrícola de papa, cebolla, tomate y habichuela que representa un número de 17.500 hectáreas de cultivo, el 20.5% se destina para pasto en caso de ganadería, el 8.8% es vegetación de páramo; producción que se envía completamente a la ciudad de Bogotá para satisfacer parte del mercado de la ciudad. A parte el municipio cuenta con aproximadamente 850 cultivos para satisfacer la necesidad de la gente, su salud, cuidar el medio ambiente y garantizar un suelo sin químicos; además de las hortalizas y tubérculos se tiene en cuenta el cultivo frutal donde se produce durazno, gulupa, feijoa, granadilla, lulo, y ciruela con un número total de 4163 hectáreas de cultivo, lo que conlleva a que se presenten residuos orgánicos a la hora de cosechar los productos». [1]

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un plan de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, provenientes del municipio de Choachí por medio de un proceso tecnológico.

Objetivos específicos

- Caracterizar de manera teórica, la materia orgánica residual procedente del municipio de Choachí.
- Examinar los diferentes métodos tecnológicos actuales para el aprovechamiento de residuos orgánicos.
- Determinar los costos del método tecnológico para el aprovechamiento de residuos orgánicos.

1. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

La caracterización de residuos es una herramienta que nos permite obtener información primaria relacionada a las características de los residuos sólidos, y los volúmenes de producción varían geográficamente, en función de los hábitos y cultura de la población, sus condiciones socioeconómicas, las condiciones climáticas, así como de la disponibilidad y acceso a materias primas.[1]

Debido a la situación actual de salud pública en el país, se realiza una caracterización del residuo orgánico de una forma teórica, basados en artículos y guías de caracterización de residuos orgánicos por lo que los resultados mostrados a continuación son aproximados y a manera de predicción.

De acuerdo con el registro de la contraloría de Cundinamarca, «El municipio de Choachí genera 90 toneladas/mes de residuos sólidos hasta el año 2019, sin embargo se debe tener en cuenta que el 51% de los residuos son orgánicos por lo que se habla de un flujo de 45.9 toneladas al mes de residuos orgánicos a su vez maneja un plan de recolección en donde existe un centro de acopio de todos los residuos junto con un vehículo compactador y un vehículo extra de transporte, ambos en buenas condiciones y se realiza el traslado de los residuos sólidos del municipio al Relleno Doña Juana, en Bogotá.» [2] De igual forma en el municipio se realiza un aprovechamiento que se encuentra estipulado en el registro de la contraloría en donde se determinan 3 tipos de aprovechamiento:

- Aprovechamiento de residuos reciclables, donde se cuenta con población recicladora que recolecta, selecciona, compacta y comercializa los residuos reciclables.
- Aprovechamiento de residuos orgánicos, donde se tiene un gestor externo que se encarga de transformar los residuos orgánicos en compost.[2]
- Aprovechamiento del rumen producido en la planta de beneficio animal, donde el residuo es entregado a una madre cabeza de familia que se encarga de transformarlo y comercializarlo como compost. [2]

Debido a esto se ve la oportunidad de implementar el uso de equipos tecnológicos de tal manera que se obtenga energía, esto con base al mecanismo que usa cada método, ya sea un microorganismo que transforman la biomasa o la materia prima en un producto final que es el

metano, un gas que puedes hacer fácilmente combustión y producir energía, reduciendo el uso de energía eléctrica [2], o un método para cómo convertir el residuo en materia prima de cultivos.

«Los residuos orgánicos se contemplan como un factor importante para ser analizado en la actualidad debido a que es un contaminante transcendental y es posible obtener un producto beneficioso a partir de esta materia prima que es el residuo; algunas de las consecuencias por la presencia de residuos orgánicos son vertederos llenos, se refiere a aquellos lugares donde se depositan los residuos debido a que el espacio que ocupa no permite poderlo aprovechar, gases que producen el efecto invernadero por su quema ya que ciertos gases retienen parte de la energía emitida por el suelo por el calentamiento de la radiación solar, a su vez la descomposición de estos residuos generan gases como CO₂ y CH₄, los cuales generan el efecto invernadero y contaminación del agua procedente del metabolismo aerobio y anaerobio de los microorganismos presentes en el agua.» [1]

1.1 Clasificación

“Los residuos orgánicos son aquellos residuos provenientes de una fuente orgánica, estos se degradan rápidamente con otro tipo de compuesto orgánico, esta clasificación se puede observar a través de la figura 2 del presente documento. En este tipo de residuos se eximen los plásticos, que aunque provienen de materia orgánica, poseen una estructura más compleja”. [4]

1.1.1 Según su fuente de generación

- **«Residuos domésticos:** son aquellos residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias, estos residuos son de gran potencial para su aprovechamiento debido que contiene un alto porcentaje de materia orgánica en su interior debido a que se compone por restos de alimentos, verduras y en algunos casos, el césped.» [4]
- **“Residuos comerciales:** son residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios”. [4]
- **“Residuos industriales:** son residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial”. [4]

- **Residuos sólidos orgánicos institucionales:** Este residuo se compone por cartones, papeles y material orgánico. Proviene de las entidades privadas y gubernamentales. [4]

Figura 2.

Clasificación de residuos



Nota. Clasificación de los residuos orgánicos según su procedencia con lugares más comunes donde encontrarlos. Tomado de. Torres, Y. Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, 2018

1.1.2. «Según su naturaleza o características físicas

- **Residuos de alimentos:** Son restos de comida provenientes de restaurantes, casas, y sitios donde se produzca algún tipo de alimento para su venta.
- **Estiércol:** Residuos fecales, especialmente de las vacas para el aprovechamiento de su potencial en la generación de biogás.
- **Restos vegetales:** Son aquellos restos que no han recibido ningún trato antinatural que afecte su composición, como lo es el césped o las cáscaras de las frutas y verduras.
- **Papel y cartón:** Papelería con gran importancia en el reciclaje.
- **Cuero:** Derivados de los artículos de cueros o curtiembres.
- **Plásticos:** Provenientes de fuentes orgánicas como el petróleo y el etano, más sin embargo no tiene aprovechamiento en la parte orgánica, esta clasificación se puede verificar a través de la figura 3 del presente documento». [4]

Figura 3.

Clasificación de residuos según su naturaleza



Nota. Se detalla el uso adecuado de los recipientes con los residuos más comunes. Tomado de. Ministerio de medio ambiente y Desarrollo sostenible

De acuerdo a la clasificación de los residuos se procede a realizar la caracterización de los mismos de manera teórica, para esto se toman como referencia 6 artículos de acuerdo a cada parámetro a medir y se pueden verificar los resultados en la tabla.1 indicando el porcentaje obtenido de cada residuo, luego se procede a realizar un análisis de cada resultado y se realiza el cálculo de cada parámetro a manera de predicción.

Tabla 1.

Resultados de Caracterización de Residuos

Residuo	% Humedad	Sólidos totales	Sólidos volátiles	% Cenizas	Referencia
Excretas de ganado	81	19	58,37	41,63	(Reyes, E; Pérez, E. Managua FAREM-Estelí, 2019)
Excretas de caballo	66,7	33,3	75,16	24,78	
Excretas de cerdo	60,6	39,4	65,69	34,31	
Excretas de gallinaza	43,1	56,9	40,16	59,85	
Materia orgánica	72	/	/	2,08 a 8,68	(CANO, L. 2016).
Papel	3,2	/	/		
Cartón	1,92	/	/		
Madera	1,28	/	/		
Textiles	1,28	/	/		
Plásticos	7,2	/	/		
Residuos sanitarios, eléctricos y medicamentos	13,12	/	/		
Materia orgánica	40 a 85	/	40,56	6 a 30	(Muñoz, J. Chile, 1999)
Papel	1 a 10	/	9,86	20 a 45	
Plásticos	1 a 0,5	/	13,42	2 a 08	
Textiles	1 a 0,5	/	/	2 a 06	
Vidrio	1 a 10	/	6,26	4 a 12	
Metal	1 a 10	/	5,67	/	
Residuos crudos	59,7	/	/	/	(Peñalosa, E; Castillo, M; Cárdenas, B; Rodríguez, S; UAESP, 2019)
Pasto	19,43	/	/	/	
Hojarasca	16	/	/	/	
Estiércol de vaca	81,4	/	/	/	
Estiércol de cerdo	64,68	35,32	32,39	23,67	(Mojica, C; Vidal, E; Rueda, B; Acosta, D. 2016).
Granja avícola	68,58	31,42	50,55	17,23	
Paja de cereales	75 a 85	/	/	/	(Márquez, P; Díaz, M; Cabrera, F. Universidad de Huelva)
Madera	75 a 90	/	/	/	
Residuos sólidos urbanos	50 a 55	/	/	/	

Tabla 1. Continuación

Residuos sólidos urbanos	/	23,09 a 59,18	/	/	(Lastra, T. 2013)
Excretas de equinos	/	0,35	/	/	(Navarro, N. Santiago, Chile 2017)
Viruta	/	1,188	/	/	
Hortalizas	/	0,03	/	/	
Frutas	/	0,4	/	/	
Estaciones/promedio	/	156,54	/	/	(Jaya, F. Cuenca-Ecuador, 2017)
Agua de acequia	/	0,32	/	/	(Pérez, A. Chiclayo-Lambayeque, 2013).
A. residual urbana	/	4,84	/	/	
Cachaza	/	2,9	/	/	
Cachaza almacenada	/	3,6	/	/	
Agua de riego	/	5,9	/	/	
Agua residual	/	/	88-94-93	/	(Lastra, T. 2013).
Residuos sólidos	/	/	158,8	/	(Castillo, E; Cristancho, D; Arellano, V. Universidad industrial Santander, 2003)
Residuos de mercado	/	/	17	/	(Flores, C. Querétaro-México, 2008).
Mezcla de rumen/sangre	/	/	67	/	
Estiércol	/	/	17	/	
Desechos de comida	/	/	/	6,33	(Alcaldía mayor de Bogotá, UAESP. 2011)
Papel y cartón	/	/	/	4,97	
Plásticos	/	/	/	6,56	
Madera	/	/	/	0,47	
Vidrio	/	/	/	0,71	
Textiles	/	/	/	2,79	
Materia orgánica	/	/	/	33	(León, J. Bogotá, 2012)
Papel y cartón	/	/	/	33	
Plásticos	/	/	/	10	
Textiles	/	/	/	33	
Madera	/	/	/	33	

Nota. Se detallan los resultados de cada artículo respecto a sus propiedades fisicoquímicas para poder llegar a comparar de una forma más práctica.

1.2 Porcentaje de humedad

Al ser un documento basado en datos de manera teórica se realiza un análisis de acuerdo a 6 artículos como se observa en la tabla 1, sobre la caracterización de los residuos orgánicos en donde se dan a conocer los diferentes tipos de resultados obtenidos en cada parámetro.

La humedad de los residuos sólidos orgánicos está referida a la cantidad total de agua que estos contienen. El cálculo de este parámetro es importante para estimar la potencialidad de los residuos sólidos para la generación de lixiviados, y la consecuente facilitación de la degradación de los mismos (digestión aerobia y anaerobia). [5] La humedad es un factor influyente en cualquier tipo de aprovechamiento que se vaya a realizar a los residuos orgánicos ya que los microorganismos que se encargan de la transformación de la materia orgánica solo son activos en ambientes húmedos y si falta agua el proceso se retarda.

Resultados del porcentaje de humedad:

- En el documento se registraron los siguientes resultados: Excretas ganado 81%, Excretas gallina 43,10%, Excretas cerdo 60,60%, Excretas caballo 66,70%, de acuerdo a lo que expone el autor el sustrato de ganado es el que tiene las mejores propiedades fisicoquímicas, sin embargo el resto de los resultados son óptimos para producción de metano de las bacterias anaerobias en el proceso de la generación del biogás. [6]
- De acuerdo con el estudio se obtuvieron los siguientes resultados de varios residuos: materia orgánica 72%, papel 3,20%, cartón 1,92%, madera 1,28%, textiles 1,28%, plásticos 7,20%, residuos sanitarios, electrónicos y medicamentos 13,12%, en este caso el porcentaje de humedad de la materia orgánica es óptimo para realizar el respectivo aprovechamiento. [7]
- En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: materia orgánica 40-85%, papel 1-10%, plástico de 0,5-1%, textil 0,5-1%, vidrio 1-10%, metal de 1-10%, se determinó que la humedad óptima para un porcentaje de descomposición aeróbica es de un 40% a 65% de su peso total, en donde se recomienda que se realice una adecuada separación de los residuos sólidos. [8]
- En el presente estudio se obtuvieron los siguientes resultados: residuos crudos 59,70%, pasto 19,43%, hojarasca 16,00%, estiércol de vaca 81,4% el autor determina que en el caso de superar el 60% de humedad se puede generar problemas de malos olores se empiezan a degradar

mediante un proceso de putrefacción, y en caso de que el contenido de humedad sea inferior al 45% esto hace que se detenga el proceso de degradación. [9]

- En el presente documento el autor expone los siguientes resultados: estiércol de cerdo 64,68%, granja avícola 68,58% y se logra concluir que son porcentajes óptimos puesto que para asegurar la inflamabilidad del gas debe tener un porcentaje mayor al 45%. [10]
- En el documento se obtuvieron los siguientes resultados: paja de cereales 75-85%, astillas de madera 75-90%, residuos sólidos urbanos 50-55%, en este caso se logra determinar que en dado caso de que la humedad este elevada se puede controlar con una mayor aireación, sin embargo los resultados son óptimos para el aprovechamiento de los residuos en compostaje. [11]

Para determinar el porcentaje de humedad en los artículos mencionados anteriormente se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{A - B}{A - C} * 100$$

Dónde:

A = Peso del crisol más la muestra húmeda (g).

B = Peso del crisol más la muestra seca (g).

C = Peso del crisol (g).

De esta manera se puede obtener para la totalidad de las muestras un porcentaje de humedad en peso, relacionada a la muestra húmeda.

1.3 Sólidos totales

Así como se mencionó en el parámetro anterior se realiza un análisis con respecto a 6 artículos los resultados obtenidos de los sólidos totales en los residuos orgánicos se pueden observar en la tabla 1, para esto debemos tener presente que los sólidos totales se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C.

Resultados de solidos totales

- En el documento se obtuvieron los siguientes resultados con respecto a los sólidos totales: estiércol de caballo 33,3%, estiércol de ganado 19%, estiércol de gallinaza 56,9%, estiércol de cerdo 39,4%, coincidiendo de esta manera con los rangos óptimos para

la producción de metano de las bacterias anaerobias para su posterior aprovechamiento en la generación de biogás. [6]

- En el artículo se obtuvieron los siguientes resultados: un valor máximo de 59,18% y un valor mínimo de 23,09%, estos valores según el autor indican la cantidad de material que puede ser usado como alimento por las bacterias e indirectamente la cantidad de arenas, lo que es muy útil y necesario cuando el efluente sea sometido a un tratamiento biológico. [12]

- En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: estiércol de cerdo 35,32 % de sólidos totales, en los residuos de la granja avícola 31,42 % de sólidos totales, con estos resultados se logra establecer que son valores óptimos para la producción del biogás. [10]

- De acuerdo con el artículo se obtuvieron los siguientes resultados de ST en toneladas: estiércol de equinos 0,350, viruta 1,188, hortalizas 0,030, frutas 0,400, la mezcla nos da un total de 40,16%, en este caso es un porcentaje optimo puesto que para un digestor discontinuo debe estar entre un 40 a 60% para lograr su funcionamiento en el proceso, sin embargo para la producción de biogás se debe realizar el análisis de otros parámetros para determinar si existe el potencial para el respectivo aprovechamiento. [13]

- En el presente estudio se obtuvieron los siguientes resultados en las diferentes estaciones: E1. 13.3, E2. 19.2, E3 31.9, E4 181, E5 193, E6 169, E7 157, E8 210, E9 278, E10 313, en cual el autor recomienda que en las quebradas que se obtenga un mayor aporte de ST, se debe implementar un programa de reforestación que amortigüe el desgaste del suelo y por lo tanto la calidad del agua. [14]

- En el documento se obtuvieron los siguientes resultados: agua de acequia 0,32, agua residual urbana 4,84, cachaza 2,9, cachaza almacenada 3,6, agua de riego 5,9, y el autor determina que el agua de riego tiene una mayor cantidad de ST por lo tanto se debe establecer un tratamiento que mejore la calidad del agua. [15]

- Para determinar el porcentaje de sólidos totales en los artículos mencionados anteriormente se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{P2 - P1}{Vm}$$

Dónde:

ST: solidos totales

P1: Peso de la cápsula, (mg)

P2: Peso de la cápsula y los sólidos retenidos tras la estufa, (mg)

Vm: volumen de muestra, (l)

1.4. Sólidos volátiles

Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano, como se mencionó anteriormente se realiza un análisis de 6 artículos que muestran los resultados obtenidos de los sólidos volátiles los cuales se pueden verificar en la tabla 1 en donde se indica los porcentajes contenidos en los residuos orgánicos.

Resultados de solidos volátiles

- De acuerdo con el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: materia orgánica 40,56%, papel 9,86%, plástico de 13,42%, vidrio 6,26%, metal de 5,67%, el autor determina que son valores óptimos para el aprovechamiento de los residuos ya sea en compostaje o para la generación de biogás. [8]
- En el documento se obtuvieron los siguientes resultados: 88%, 94% y 93%, lo que expresa el autor es que este parámetro es importante puesto que indica la cantidad de material que puede ser usado como alimento por la bacterias e indirectamente la cantidad de arenas, lo que es muy útil y necesario cuando el efluente sea sometido a un tratamiento biológico, de igual forma los resultados obtenidos son óptimos para su aprovechamiento. [12]
- En el presente estudio se obtuvieron los siguientes resultados: los sólidos volátiles estuvieron compuestos en su mayor parte de carbohidratos y en menores proporciones de proteína y grasa, se reporta un 32,39% en residuos porcinos y un 50,55% en residuos avícolas, de acuerdo a estos resultados igualmente se determinó que son óptimos para la producción de biogás sin embargo es más efectivo el estiércol de cerdo puesto que generaría más biogás por tonelada de estiércol. [10]

- En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: el estiércol de caballo 75,16%, estiércol de cerdo con 65,69%, el estiércol de ganado con 58,37%, el estiércol de gallinaza con 40,16%, con estos resultados el autor determino que se encuentran dentro de los rangos óptimos que satisfacen las necesidades de crecimiento y producción de metano de las bacterias anaerobias para la producción de biogás. [6]
- En el artículo se obtuvo el siguiente resultado: 158,8 kg/m³, el autor propone que para el funcionamiento de la digestión anaerobia se debe realizar una remoción de sólidos volátiles en una fase de hidrólisis con el fin de estabilizar el sistema y obtener la generación del biogás. [16]
- De acuerdo con el estudio se obtuvieron los siguientes resultados respecto al cálculo de la fórmula: residuos de mercado 17%, mezcla de rumen/sangre 67%, estiércol 17%, el autor propone que los SV deben ser hidrolizados a compuestos disueltos, ya que se considera que al tener estabilizado este parámetro se podría decir que se ha perdido el efecto contaminante al medio ambiente. [17]
- Para determinar el porcentaje de sólidos volátiles en los artículos mencionados anteriormente se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$\%SV = \frac{100 * (\text{Pérdida de peso})}{(\text{peso neto humedo})}$$

1.5 Porcentaje de cenizas

Las cenizas son los residuos sólidos muy finos que proceden de la combustión. Estos se presentan bajo la forma de un polvo fino de color gris, suave y susceptible de ser arrastradas por la acción del viento. La ceniza residual es un producto de la incineración de los residuos sólidos, según lo anterior se procede a realizar el respectivo análisis de porcentaje de cenizas tomando como referencia 6 artículos con diferentes resultados como se observa en la tabla 1.

Resultados de porcentaje de cenizas

- En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: durante el proceso del estudio se realizó el análisis a los residuos sólidos en varios meses en los cuales se obtuvo que el valor máximo fue de 8,68% y un valor mínimo de 2,08%, estos valores permiten al autor determinar la factibilidad de un sistema de tratamiento térmico sin embargo aclara que se deben realizar más investigaciones, igualmente concluye que los valores son óptimos para el proceso de incineración como tratamiento para la reducción de los residuos sólidos urbanos. [7]

- En el documento se obtuvieron los siguientes resultados: 59,85% para el estiércol de la gallinaza, 24,78% para el estiércol de caballo, 34,31% para el estiércol de cerdo y 41,63% para el estiércol de ganado, con estos datos se logró determinar que son valores óptimos que se encuentran dentro de los rangos para la producción de metano de bacterias anaerobias para el proceso de producción de biogás. [6]
- De acuerdo con el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: estiércol de cerdo 23,67% y los residuos de origen avícola 17,23%, sin embargo se determinó que son valores óptimos para el proceso de generación de biogás. [10]
- En el presente estudio se obtuvieron los siguientes resultados: materia orgánica 6-30%, papel 20-45%, plástico 0,8-2%, textil 0,6-2%, vidrio 4-12%, sin embargo el autor determina que estos valores no son 100% exactos por lo tanto recomienda más estudios siguiendo la metodología del documento citado para así mismo establecer el tipo de tratamiento de los residuos sólidos y definir el tipo de aprovechamiento que se puede realizar ya sea para compostaje o biogás. [8]
- En el artículo se obtuvieron los siguientes resultados: desechos de comida 6,33%, papel y cartón 4,97%, plásticos 6,56%, madera 0,47%, vidrio 0,71%, textiles 2,79 de acuerdo a estos datos el autor recomienda que se debe realizar un sensibilización a la población en cuanto a los residuos generados y así mismo generar más investigaciones para determinar algún tipo de aprovechamiento como fuente de energía alternativa a los residuos sólidos de la ciudad de Bogotá. [18]
- En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: materia orgánica: 33%, papel y cartón 33%, plástico 10%, textil 33%, madera 33%, el autor determina que se podría realizar el aprovechamiento de cenizas a través de la incineración sin embargo es evidente que no representa una solución integral al problema de manejo de RSU de Bogotá, principalmente por el flujo de masa que se debería incinerar, igualmente el autor recomienda hacer un análisis más a fondo sobre la viabilidad de la incineración. [19]

Para determinar el porcentaje de cenizas en los artículos mencionados anteriormente se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{CC-W}{CS-W} * 100$$

Dónde:

CC= peso del crisol más la ceniza (g).

W= peso del crisol vacío (g).

CS= peso del crisol con la muestra seca (g).

De acuerdo con los resultados hallados en los diferentes artículos mencionados anteriormente podemos determinar que los resultados son similares cuando se analiza el mismo tipo de residuo, para hallar el porcentaje de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles y porcentaje de cenizas, en el municipio de Choachí a partir de la información obtenida por la Contraloría de Cundinamarca se realiza un cálculo aproximado de estos parámetros aplicando las formulas mencionadas en cada parámetro, simplemente se determinaría un caso hipotético como para dar un valor de predicción puesto que no se puede realizar trabajo de campo, se realiza un promedio de los residuos orgánicos mencionados en los artículos y este valor se toma como base para realizar el cálculo de cada parámetro, los resultados se pueden observar en la tabla 2.

- 90 toneladas/mes de residuos sólidos de los cuales el 51% son residuos orgánicos es decir 45.9 toneladas/mes de residuos orgánicos, de acuerdo al promedio de los residuos orgánicos mencionados anteriormente en los artículos se obtiene 59,15% de residuos orgánicos, suponiendo que los recipientes en donde se toma la muestra de residuos orgánicos sean de peso 200g aproximadamente, se aplica la formula teniendo en cuenta que la toma de la muestra es de 90g, se realiza el secado por 24 h en donde se secaría aproximadamente el 65% de la muestra.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{290-258}{290-200} * 100 = 36\% \text{ de humedad}$$

Con respecto a los resultados obtenidos en los diferentes estudios mencionados anteriormente para hallar el parámetro de sólidos totales debemos tener en cuenta que su economía se basa en gran parte por el sector agropecuario por lo tanto se podría determinar el porcentaje a las excretas de animal para su aprovechamiento, en el promedio de excretas de los artículos mencionados es de 49,9% de esta manera se realiza un cálculo hipotético en manera de predicción de este porcentaje utilizando la fórmula.

P2: 320g

P1:200g

Vm: 120g

$$ST = \frac{320g-200g}{120g} = 1$$

Basados en los artículos mencionados podemos establecer que es importante hallar el porcentaje de sólidos volátiles puesto que este parámetro nos permite saber que tan eficiente puede ser el aprovechamiento de los residuos orgánicos ya sea para la producción de biogás o para determinar qué cantidad de materia orgánica es útil como alimento de bacterias anaerobias, igualmente a partir de este parámetro podemos determinar qué tan contaminante es en el medio ambiente y así mismo establecer el proceso de reducción del mismo para disminuir su efecto, en el municipio de Choachí se debe establecer primero la cantidad de granjas porcinas, ganado, avícola para saber si con la cantidad de estos animales nos brindan la cantidad de excretas necesarias para su respectivo aprovechamiento, igualmente se aplica la fórmula como caso hipotético a manera de predicción.

$$\%SV = \frac{100*(58g)}{(90g)} = 64$$

Según los resultados anteriormente mencionados en la tabla 1. para determinar el porcentaje de cenizas en los residuos orgánicos se debe tener en cuenta que este porcentaje es el producto final en la combustión de los residuos, en el municipio de Choachí es importante calcular este parámetro puesto que nos sirve como indicador para determinar qué tipo de aprovechamiento se puede realizar a los residuos, sin embargo como en este caso no tenemos datos reales de las muestras de residuos tomamos como referencia el promedio de los residuos orgánicos de los artículos citados anteriormente, posteriormente se aplica la fórmula con un caso hipotético a manera de predicción del porcentaje.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(200g+25g)-(200g)}{(258-200)} * 100 = 43\%$$

Tabla 2.

Resultados de parámetros de medición a manera de predicción en el municipio de Choachí

Parámetro de medición	Humedad	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Cenizas
	36	1	64	43

Nota. Se realiza una predicción del residuo orgánico presente en el municipio de Choachí teniendo en cuenta los valores consultados

Respecto a los valores presentados en la tabla 2. Se realiza el análisis de cada parámetro de acuerdo a la información obtenida por los diferentes artículos mencionados anteriormente en cada parámetro de medición. Nos da como resultado un 36% de humedad el cual es un valor óptimo sin embargo debemos tener en cuenta que para el aprovechamiento del residuo es ideal que sea un valor de 40-70% de humedad para que se dé una mayor eficiencia en la degradación del residuo, para mejorar este porcentaje se puede regar con agua hasta obtener la humedad requerida. El resultado del cálculo nos estaría indicando que el proceso de degradación se detuvo sin embargo se realizaría un control de la temperatura y así mismo se agregaría otros factores de abono como la hojarasca en el caso de aprovechamiento para compostaje.

Así mismo hay que tener en cuenta que la aplicación de esta fórmula de sólidos totales es con valores hipotéticos por lo tanto no se podría concluir si el porcentaje es bueno para realizar el respectivo aprovechamiento de los residuos orgánicos, ya que en este caso se debe tener un porcentaje de más del 30% para garantizar la producción de biogás y se pone como referencia artículos de cálculo de sólidos totales de aguas residuales los cuales permiten determinar el tipo de tratamientos que se pueden efectuar para mejorar la calidad de la misma.

La fórmula de sólidos volátiles nos da un valor de 64% el cual es un valor óptimo para su respectivo aprovechamiento en la producción de biogás puesto que para la generación del mismo se debe tener un porcentaje mayor al 50%. Con base a los resultados de los artículos podríamos determinar que este porcentaje de cenizas es óptimo para generación de biogás y para el proceso

de incineración como alternativa para la recuperación de energía de los RSU, sin embargo debemos tener en cuenta que este valor es hipotético lo cual no es un valor exacto para determinar el tipo de aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el municipio de Choachí.

2. IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

Para la identificación de alternativas de aprovechamiento de los residuos orgánicos se escogieron los 4 métodos con mejores resultados en cuanto a la producción de biogás o porcentaje de abono sin embargo también se tuvo en cuenta el método tecnológico biofertilizantes o aprovechamiento de la materia orgánica para alimento de animales, aunque estas alternativas son óptimas no son las más eficientes para aprovechar un mayor porcentaje de los residuos orgánicos generados en el municipio, se debe tener en cuenta que los biofertilizantes son un subproducto del compostaje por lo tanto es más efectivo la aplicación del compostaje en el municipio ya que por medio de este proceso se obtiene un porcentaje alto de abono y de buena calidad para el sector agrícola y tener como resultado mejores cultivos, para utilizar los residuos como alimento de animales de granja se debe tener presente que muchos animales tienen como alimento principal el concentrado por lo tanto se estaría perdiendo un mejor aprovechamiento para este material.

Para la selección de los artículos de cada método tecnológico se revisaron bases datos como J-Gate, Knovel, Lumieres en donde se verificaron las metodologías y resultados de cada proceso de aprovechamiento y se escogieron artículos desde el año 2006 en adelante donde se muestran diferentes técnicas y procesos en la aplicación de la tecnología de aprovechamiento, de igual manera se escogió un artículo del año 1999 ya que este contaba con unos resultados óptimos que sirvieron de base para el análisis del presente documento.

2.1 Compostaje

“Es un abono orgánico que se obtiene a partir de la descomposición natural en presencia de oxígeno de residuos orgánicos, bien sea por medio de microorganismos como bacterias y hongos o por medio de lombrices (vermicompostaje). Dependiendo del tipo de residuo empleado, a partir de 100 kilogramos podemos obtener alrededor de 20 kg de compost orgánico”. [20]

2.1.2 Proceso de compostaje

“Es un proceso natural y oxidativo, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos aerobios que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, esto implica el paso por una etapa termófila dando al final como producto de los procesos de degradación de dióxido de carbono, agua y minerales”, este proceso

se puede observar a través de la figura 4 la cual muestra de manera clara el proceso de degradación para la generación de compost, también se obtiene una materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos sin que cause fenómenos adversos. [9]

Figura 4.

Proceso de compostaje



Nota. Diagrama simple que demuestra el proceso de compostaje de una manera gráfica con entradas y salidas del proceso. Tomado de. Guía de compostaje doméstico e industrial

De acuerdo con el documento de propuesta para el aprovechamiento de residuos orgánicos empleando el compostaje por parte de la Universidad Libre de Bogotá [21], se determina que el proceso del compostaje se debe realizar teniendo en cuenta:

- Ubicación correcta del compostador.
- Materia orgánica
- Interior compostador.
- Aireación/volteo
- Toma de temperatura
- Relación C/N

Así mismo debemos tener en cuenta las condiciones ideales para llevar a cabo el compostaje y que de esta manera sea un poco más productivo [21], en la figura 5 se puede verificar las condiciones y los rangos óptimos para el proceso del compostaje.

Figura 5.

Condiciones ideales para el compostaje

Condición	Rango aceptable	Condición optima
Relación C:N	20:1 – 40:1	25:1 – 30:1
Humedad	40 -65%	50 – 60%
Oxígeno	> 5%	8%
PH	5.5 – 9.0	6.5 – 8.0
Temperatura °C	55 – 75	65 – 70
Tamaño de partícula	0.5 – 1.0	variable

Nota. Se evidencian las condiciones óptimas para el manejo del compostaje y así obtener un mejor rendimiento. Tomado de. Propuesta para el aprovechamiento de residuos orgánicos empleando el compostaje (Bustos, D. Bogotá 2013).

2.1.3 Fases del compostaje

De acuerdo con la guía técnica para el aprovechamiento de los residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura, se establecen las fases para el respectivo proceso de compostaje así mismo a través de la figura 6 se puede observar las fases con los rangos ideales de temperatura, pH, y microorganismo durante el proceso del compostaje:

«**Fase de mesófila:** El material de partida comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 40°C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de carbono (C) y nitrógeno (N) generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares generan ácidos orgánicos y por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4.0 o 4.5). Esta fase dura pocos días (entre dos y ocho días). Cuando el material alcanza temperaturas mayores entre los 40-45°C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por bacterias filamentosas (actinomicetos) y hongos. Sobre los 45°C aparecen bacterias termófilas, que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina». [9]

“**Fase de enfriamiento:** Agotadas las fuentes de carbono (en especial el nitrógeno en el material en compostaje) la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C. Durante esta fase

continúa la degradación de polímeros como la celulosa y aparecen algunos hongos observables a simple vista. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración”. [9]

“Fase de maduración: Es un período que demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos”. [9]

Figura 6.

Fases del compostaje

Mesofílica	Temofílica	Mesofílica II o de enfriamiento	Maduración
Temperatura ambiente hasta 40 °C	40 a 70°C o más	Descenso de la temperatura hasta 40-45°C	18 a 22°C
Hongos mesofílicos y termotolerantes. Bacterias mesofílicas.	Bacterias Actinomicetos Hongos	Bacterias Hongos Invertebrados	Bacterias Actinomicetos Hongos
pH 5 – 5.5	pH 8 - 9	pH 8.5	pH 7 - 8

Nota. El compostaje presenta cambios de condiciones que se evidencian en la tabla dependiendo la fase en la que se encuentre. Tomado de. Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos UAESP

2.1.4 Parámetros de control

La existencia de poblaciones de microorganismos presentes en el proceso de compostaje y la velocidad de transformación de los residuos orgánicos, así como el normal desarrollo de las etapas del proceso anteriormente descritas, requieren garantizar las condiciones necesarias y el control de los siguientes parámetros:

“Temperatura: Es un parámetro dinámico durante el proceso de compostaje, el proceso de compostaje presenta diferentes rangos de temperatura en sus fases de degradación. El aumento de la temperatura garantiza la calidad microbiológica y sanidad del compost”. [9]

«Humedad: El agua es requerida para las funciones metabólicas de los microorganismos, que son quienes realizan los procesos de degradación de los residuos orgánicos. La humedad

óptima para una máxima eficiencia en el proceso de degradación esta entre el 40-60%. El calor generado en el proceso de descomposición disminuye la humedad. La humedad es adecuada si es posible formar una pelota del material sin que fragmente o se desmorone. Si está muy húmeda la mezcla, se debe agregar un poco de material seco (aserrín, hojarasca), y si por el contrario la mezcla está seca, se puede agregar un poco de agua o residuos crudos de cocina, hasta lograr la humedad recomendada». [9]

El riego debe realizarse preferiblemente por aspersión, garantizando que el agua llegue a la totalidad de mezcla; de no ser así habrá puntos muertos en la pila en los cuales el material no se degradará. [9]

«**Aireación:** Es uno de los parámetros más importantes dado que como se ha mencionado anteriormente, el compostaje es un proceso aeróbico (presencia de aire), necesario para los procesos metabólicos de los microorganismos. El suministro continuo y homogéneo de oxígeno a través de la mezcla de residuos asegura la actividad de los microorganismos y por tanto, un buen proceso de degradación. Un déficit de oxígeno puede acarrear problemas de putrefacción, se detiene el proceso de degradación y se obtiene un producto de menor calidad. En pilas siempre debe existir como mínimo entre 5% y 10% de concentración de oxígeno». [9]

«**pH:** Tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. El pH afecta la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas, cuyo crecimiento y desarrollo se pueden ver reducidos bajo condiciones de acidez y basicidad extrema, de ahí la importancia del control del proceso para lograr en el compost maduro valores cercanos a la neutralidad, es decir, con pH cercano a 7». [9]

Relación C/N: Uno de los parámetros más importantes para que una pila de compostaje funcione correctamente es la relación inicial entre el carbono y el nitrógeno. «De forma experimental se conoce que para que haya crecimiento microbiano, se necesita que esta relación esté entre 20 y 30, es decir, 20-30 átomos de carbono por cada átomo de nitrógeno. Del carbono necesario para que los microorganismos de una pila de compostaje crezcan, una parte se dedica a la obtención de energía metabólica dando como resultado la emisión de CO₂. La parte restante la incorporan en su propia estructura celular junto al nitrógeno (10/1). Así, es muy importante tanto la cantidad de carbono y su relación con el nitrógeno como su naturaleza química, ya que en

función de esto habrá más o menos crecimiento y actividad metabólica (calor). Para empezar el compostaje se debe ajustar correctamente la relación del carbono-nitrógeno con los residuos orgánicos que quieren usar». [22]

2.1.5 Herramientas o equipos

Los equipos, maquinaria y herramientas utilizadas en la producción de compostaje permiten la realización de todas las operaciones y adecuaciones cotidianas al interior de la planta; estas herramientas facilitan y aceleran el proceso de estabilización. [23]

“TRITURADORA: molino fraccionador de orgánicos de 3 caballos de fuerza y que sea para manejo de material húmedo, necesario para ajustar el tamaño de partícula de los materiales a compostar, también se utiliza para ajustar la granulometría del producto terminado”. [23]

“TERMÓMETRO: es de gran importancia para el seguimiento y control de la temperatura al interior de las pilas. Es recomendable usar un termómetro o termocupla que se pueda introducir en la pila”. [23]

“HIDRÓGENO PARA SUELOS: es un instrumento que se usa para medir el grado de humedad del aire, del suelo, de las plantas o humedad, dando una indicación cualitativa de la humedad ambiental”. [23]

- **“AIREADOR DE COMPOST CON PUNTA HÉLICE:** es necesaria cualquier herramienta de mango largo que permita airear la mezcla conforme se vayan triturando y añadiendo restos al compostaje. Esto es así porque los microorganismos responsables de la descomposición exigen oxígeno”. [23]
- **“ZARANDA:** ésta es requerida para clasificar el material por tamaño de partícula, con el objetivo de mejorar su presentación. Para esto se utiliza un tamiz o zaranda normalmente de 3mm y 5mm de separación”. [23]
- **«CINTAS DE PAPEL TORNASOL O PH METRO:** La medición de pH se puede hacer mediante cintas de papel tornasol, esta es una tecnología de bajo costo, que puede ser utilizada por cualquier persona. El procedimiento para medir este parámetro es poner la cinta humedecida sobre los residuos o sobre el material ya degradado. La forma de leer el resultado se muestra en gama de colores pH, para procesos más tecnificados lo mejor es contar con un pH metro digital para suelos, que se introduce en la mezcla y da el valor de pH». [23]

- **“HERRAMIENTAS MENORES:** Hay herramientas muy simples que cumplen una gran labor, como por ejemplo: las palas que se usan para el mezclado, armado y volteo de las pilas; las carretas para el transporte de material, el rastrillo que se usa para aflojar el material mejorando el intercambio gaseoso y la manguera que es utilizada para la humectación del material”. [23]

2.1.6 Técnicas de compostaje

- **“HOJA DE COMPOSTAJE:** La hoja de compostaje puede ser una gran forma de añadir materia orgánica de nuevo en el suelo. Este proceso de compostaje implica la difusión de capas finas de materiales orgánicos en la parte superior de la superficie del suelo”. [24]
- **«BIODINÁMICA:** Las técnicas biodinámicas no se limitan sólo al campo del agricultor, éstas se pueden practicar en jardines grandes y pequeños. El compostaje por biodinámica es muy particular en cuanto a la forma de la pila de compost, el patrón de estratificación y los materiales utilizados. Sin embargo, una de las diferencias más significativas entre esta técnica y otras es el uso de preparados biodinámicos o “preparaciones”. Estos aditivos son a base de plantas y se hacen de una manera específica por individuos altamente capacitados». [24]
- **«COMPOSTAJE ANAERÓBICO:** Describe la descomposición biológica de la materia orgánica por la actividad microbiana de las bacterias anaerobias. Entre algunos de los beneficios del compostaje anaeróbico podemos mencionar que es uno de los tipos de compostaje más eficaz y uno de los medios más básicos de la producción de compost; se puede hacer a pequeña escala, en tu patio o jardín, y por lo general produce más abono orgánico que la mayoría de otros métodos». [24]
- **“FOSA DE COMPOSTAJE:** Esta técnica implica cavar hoyos en la tierra del jardín y enterrar ingredientes primarios de compost, sin embargo la transformación de la materia tiende a tomar más tiempo”. [24]
- **«COMPOSTAJE BOKASHI:** Bokashi es un término japonés que significa “materia orgánica fermentada”. Por lo tanto, compost bokashi describe la elaboración de compost a través de la fermentación. Para lograr resultados óptimos, sus materiales se inoculan con un cultivo iniciador microbiano y se colocan en el interior de un recipiente sellado. Estos cultivos iniciadores consisten de varias especies diferentes de microorganismos, los cuales se desarrollan en condiciones anaeróbicas». [24]

Los factores clave para decidir una técnica de compostaje son:

- Tiempo de degradación.
- Requisitos de espacio.
- Controles técnicos del proceso.
- Residuos con los que se cuenta.
- Condiciones climáticas del lugar.
- Costos de operación.
- Disponibilidad de tiempo para las actividades del proceso.

“Las diferentes técnicas se dividen generalmente en sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los sistemas abiertos son aquellos que se hacen al aire libre, y los cerrados los que se hacen en recipientes o bajo techo”. [9]

2.1.7 Sistemas abiertos o en pilas

En función del manejo de las pilas en planta (espacio, tecnificación, tiempo de retención), existe una amplia variedad de formación de pilas, variando así el volumen de estas, su forma, la disposición y el espacio entre ellas. Cuando hay una cantidad abundante y variada de residuos orgánicos (sobre 1 m³ o superior), se puede llevar a cabo este tipo de compostaje. [9]

“Se construye directamente sobre el suelo, donde se van depositando, por capas, los diferentes tipos de residuos formando una pila. Hay que tener en cuenta que la pila no es una estructura estable, por lo que el material tiende a esparcirse, sobre todo si llueve y la pila no está cubierta. Las dimensiones mínimas que debe mantener la pila, son de 1 m de ancho por 1 m de alto. La longitud mínima también es de 1 m, pero esta va incrementando según vamos generando residuos”. [9]

“**Volteo:** es necesario garantizar la aireación de la mezcla realizando volteos, lo ideal es realizarlos una vez al día, pero si no se cuenta con el tiempo se deben voltear por lo menos dos veces a la semana, moviendo las pilas de un lugar a otro, mezclando y des compactando su contenido”. [9]

2.1.8 Sistemas cerrados (compostadores)

«Las técnicas de compostaje en contenedores ha sido ampliamente usada a nivel mundial para compostaje doméstico, ya que presenta una serie de ventajas que favorecen su aplicación: evita la acumulación de agua por lluvia; facilita la extracción de lixiviado; controla la proliferación de vectores (roedores y aves); evita el acceso al material en descomposición y es de fácil manejo. Sin embargo, la calidad de los productos obtenidos, tiempo de degradación de los residuos y control de los parámetros técnicos, pueden ser menores si no se consideran las variables a tener en cuenta durante el proceso. Existen numerosos materiales disponibles para usar como recipientes de compost, aunque predominan dos modalidades básicas de disposición del recipiente: vertical (o continuo/estático) y horizontal (o discontinuo/dinámico). En la disposición vertical el recipiente descansa sobre su base. El material fresco se añade por la parte superior y el material compostado se extrae en la parte inferior. Se le llama continuo porque el material fresco entra de forma continua y el producto compostado sale también permanentemente por la parte inferior si el recipiente está diseñado para que haya que voltearlo para extraer el material, entonces es una compostera discontinua, por cargas». [9]

“Compostadores y lombricompostadores artesanales para compostaje y lombricultura. La disposición horizontal, es aquella en la que el recipiente descansa sobre su eje longitudinal. Se le llama discontinuo porque es un proceso por cargas una vez que se carga la compostera, se debe dejar que el proceso de compostaje finalice para extraer el material antes de introducir una nueva carga”. [9]

De acuerdo con la información obtenida respecto a la tecnología de aprovechamiento de los residuos orgánicos para compostaje se encontraron 4 artículos en los cuales se obtuvieron diferentes tipos de metodologías del proceso de compostaje las cuales se ilustran a través de los diagramas 1, 2, 3 y 4, de igual forma se obtuvieron diferentes resultados de los parámetros de medición como se puede observar en la tabla 3.

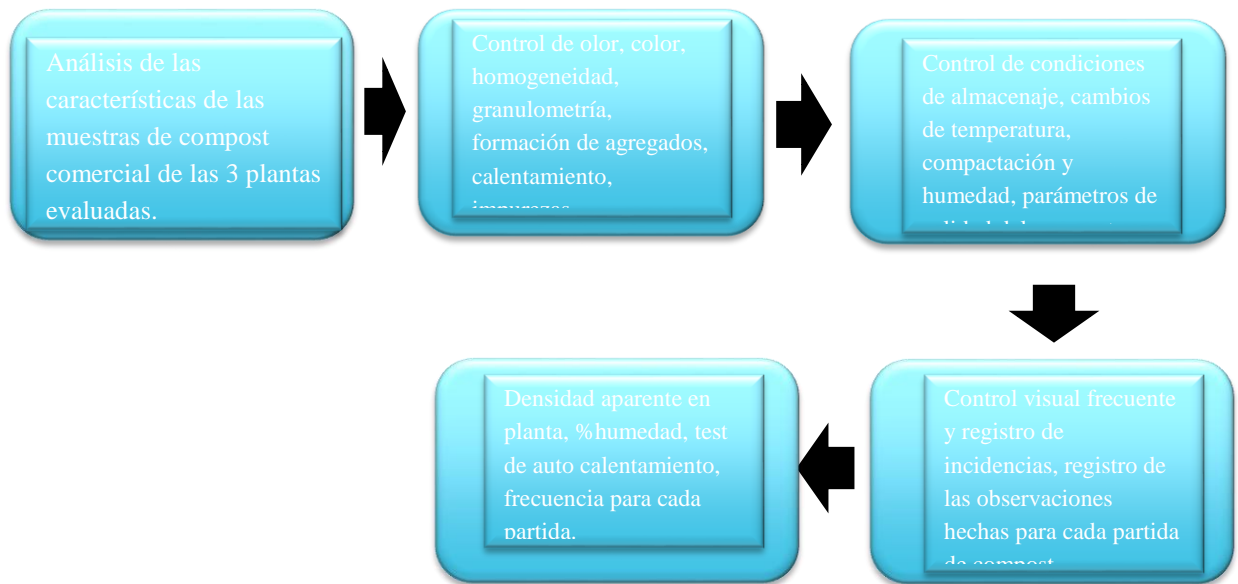
- Metodología del artículo “Compostaje de residuos municipales: control del proceso, rendimiento y calidad del producto” 2008

En el estudio se dan a conocer la calidad de productos y materiales orgánicos obtenidos mediante el tratamiento biológico procedente de diversos residuos municipales en Catalunya,

cómo afecta en la calidad del compost la eficiencia en la separación de los impropios. La metodología de este estudio se puede verificar a través del diagrama 1. [25]

Figura 7.

Metodología compostaje de residuos municipales: control del proceso, rendimiento y calidad del producto



Nota. Evidencia de manera gráfica el análisis de las características del compost en tres plantas

De acuerdo con el estudio el autor determina que existen problemas imprescindibles en las 3 plantas de tratamiento por las cuales se deben implementar medidas de mejora para optimizar el funcionamiento de las instalaciones, igualmente que determina que algunas de las características de la materia orgánica no son las adecuadas para un buen proceso del compostaje, es por esta razón que se insiste en realizar la debida separación en origen.

La gestión de los restos vegetales requiere una mejor atención para optimizar el aprovechamiento de este recurso y garantizar su abastecimiento a todas las plantas con el fin de su utilización como material complementario.

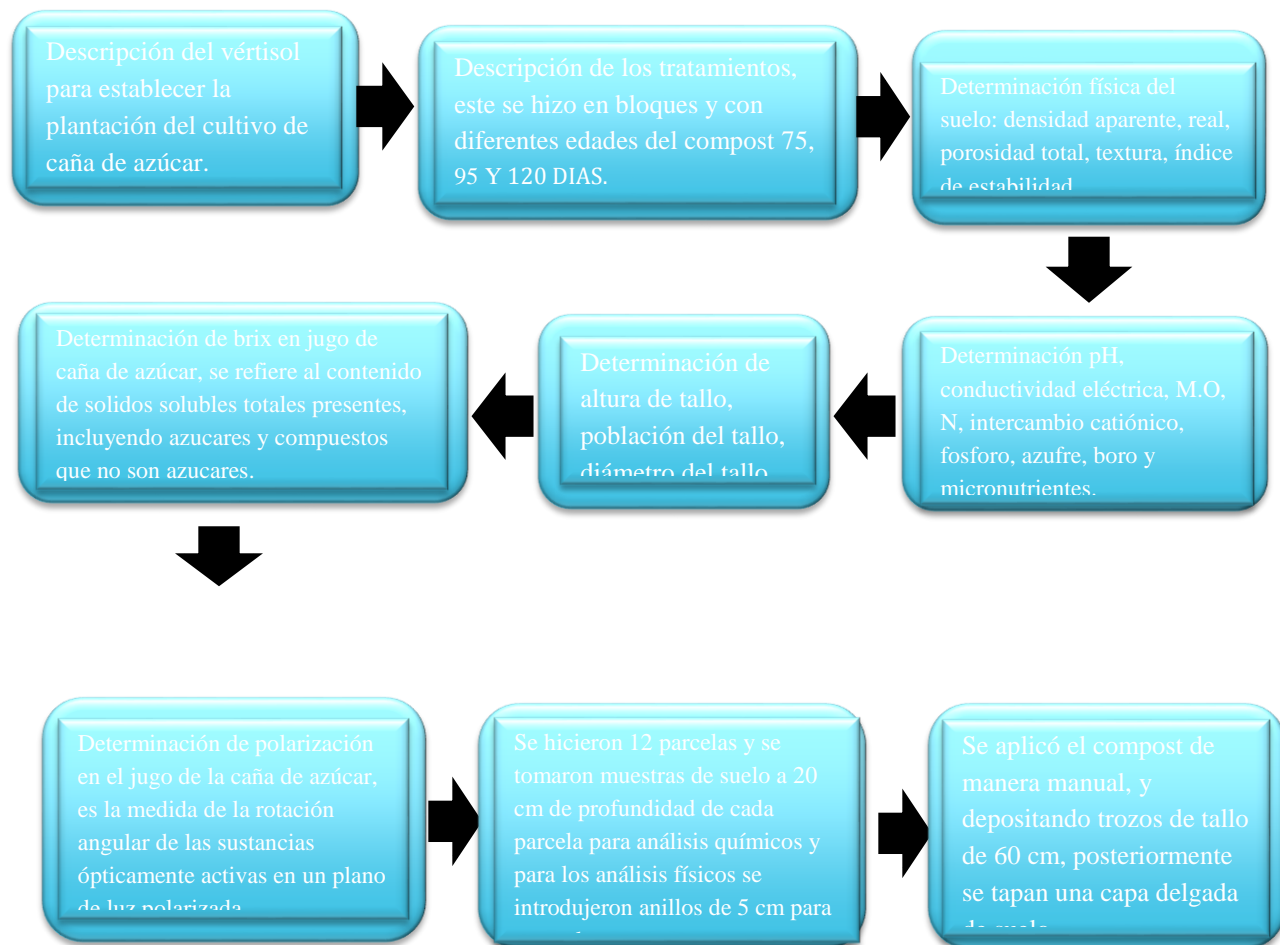
La producción de compost en cada planta es irregular y se han de mejorar las calidades de los productos en relación a las características agronómicas. La comercialización del compost no recibe la atención requerida para su introducción en el mercado. [25]

- Metodología del artículo “Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar” 2016.

El estudio consiste en evaluar el efecto de la aplicación de compost en diferentes estados de maduración y dosis, la investigación pretende generar información del beneficio que está aportando el compost generado de la industria azucarera en este tipo de suelo, la metodología de este estudio se puede verificar en el diagrama 2. [26]

Figura 8.

Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar



Nota. Proceso en el cual se demuestra la efectividad que tiene el bioabono respecto a los otros productos a la hora de realizar la parte agrícola.

El autor determina que después de la aplicación de esta metodología, el abono orgánico tiene un perfil nutricional que puede o no resultar idóneo para el escenario de clima, suelo y cultivo en el cual va a actuar, en las variables evaluadas se observó en las tres edades del compost tendencia general hacia el cumplimiento de los parámetros de la norma. Hay un descenso de humedad al transcurrir el tiempo de descomposición, debido a la actividad metabólica de los microorganismos que se traduce en incremento de temperatura, y disminución de esta variable,

además del asocio del pH a este comportamiento en la fase final de maduración que debe estar entre 7 y 8, siendo esto consecuencia de las propiedades naturales de amortiguador de las sustancias húmicas que se producen en el proceso, así mismo determina que el no cumplimiento del carbono del 15% en las tres edades es consecuencia de una alta actividad microbiana y un buen proceso de compostaje o de mineralización, ya que disminuye con el aumento de la edad. [26]

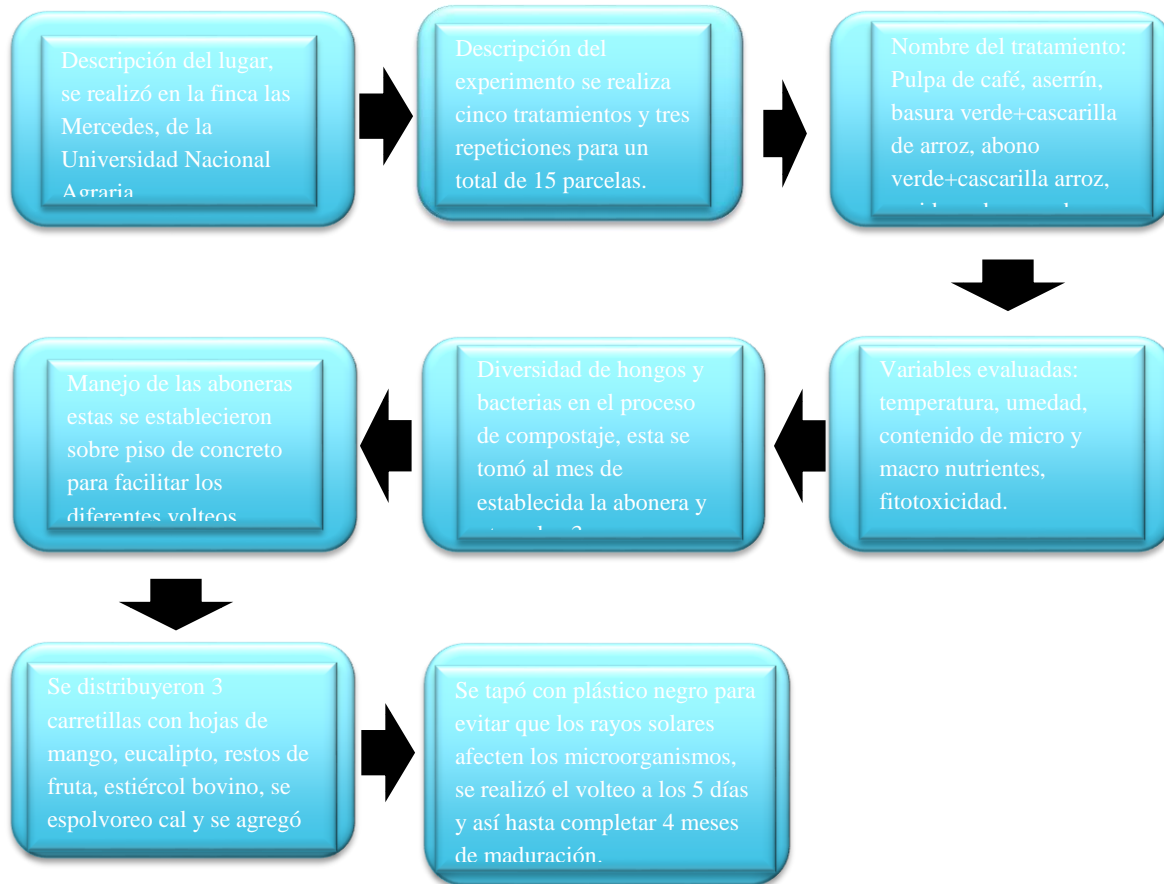
«La materia orgánica presentó cambios significativos en el tratamiento donde se aplicó compost con estado de madurez de 95 días frente al compost de 70, estos valores están en un rango medio (Entre 2 y 4%) según las categorías establecidas por Cenicaña (Castro, 2010) para las condiciones climáticas predominantes en la zona de estudio, por lo tanto se determinó que en el compost de 70 días se presenta un mayor contenido de materia orgánica fresca»; así mismo los resultados de cada parámetro de medición se puede verificar en la tabla 3. [26]

- Metodología del estudio de “efecto de diferentes residuos de origen vegetal y animal en algunas características física, química y biológica del compost” 2007

El estudio busca contribuir a la búsqueda de alternativas de reciclaje de diferentes materiales de origen vegetal, animal y que contenga buenas características físicas, químicas y biológicas, evaluar el efecto de diferentes materiales orgánicos en el compost, toda la metodología se puede verificar en el diagrama 3. [27]

Figura 9.

Efecto de diferentes residuos de origen vegetal y animal en algunas características física, química y biológica del compost



Nota. Demuestro como puede llegar a afectar el contenido vegetal y animal en las propiedades fisicoquímicas del residuo

El autor determina que en términos generales el Compostaje se puede definir como una biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica. La biodegradación es consecuencia de la actividad de los microorganismos que crecen y se reproducen en los materiales orgánicos en descomposición. Se concluye que existe diferencia significativa entre los tratamientos. La pulpa de café es el material de origen vegetal que favorece mayor actividad microbiana y que permitió obtener temperaturas más altas que el resto de mezclas.

[27]

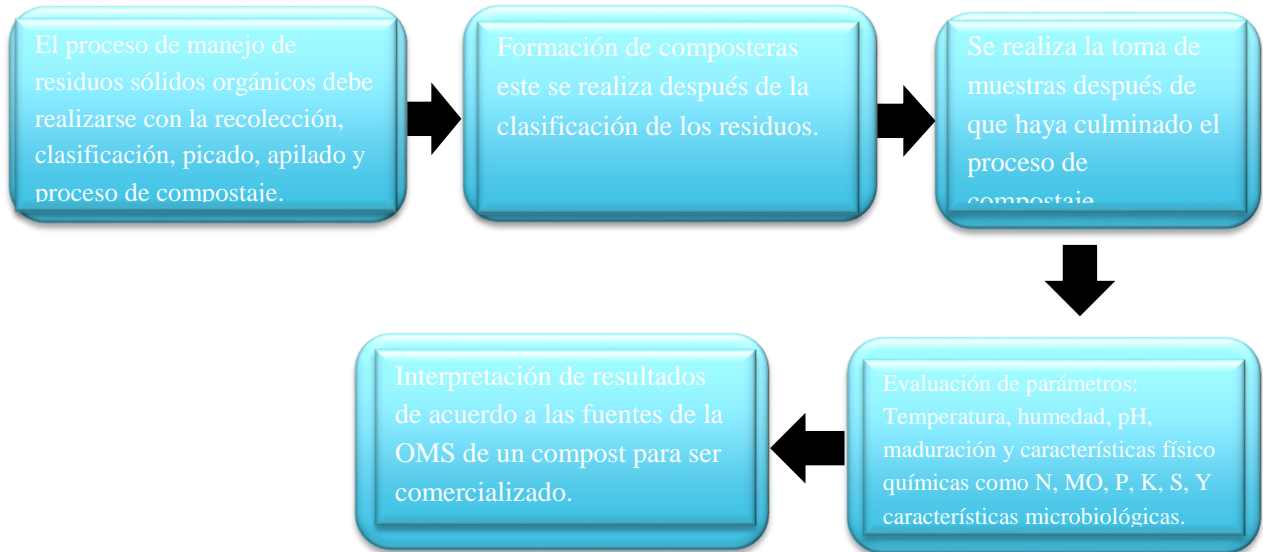
«Las condiciones de temperatura de la abonera a los 30 días de establecida favorecieron la presencia de hongos como el *Aspergillus sp*, encontrado en cuatro de los tratamientos: pulpa de café, aserrín, basura verde + cascarilla y residuos del comedor, la presencia de *Aspergillus* se debe al aumento de sus propágulos por las altas temperaturas. También se encontró poblaciones del género *Penicillium* y *Erutium* sólo en la mezcla de residuos de comedor». Igualmente el autor concluye que todos los tratamientos tienen óptimo contenido de humedad y la pasteurización del abono se logró a través de que la temperatura alcanzara entre 45° C y 50° C por un tiempo prolongado, lo que asegura la eliminación de las semillas de malas hierbas y las esporas fito patógenas sean afectadas. [27]

- Metodología del estudio “proceso de producción y aplicación del producto de microorganismos eficaces en la calidad de compost a partir de la mezcla de 3 tipos de residuos orgánicos”, 2015.

En el presente estudio se busca la elaboración de abonos orgánicos como el compostaje constituye una práctica importante como alternativa de solución para el reciclaje de algunos de los desechos generados por los mercados, avícolas y camales, así como la conversión de estos subproductos en materiales que puedan utilizarse para la mejora del suelo, la metodología se puede observar en el diagrama 4. [28]

Figura 10.

Proceso de producción y aplicación del producto de microorganismos eficaces en la calidad de compost a partir de la mezcla de 3 tipos de residuos orgánicos



Nota. Se evidencia el proceso en la cual se comparan tres residuos orgánicos con el uso de microorganismos.

El autor determina que el presente análisis de parámetros físicos se tomó de los datos a lo largo del proceso de compostaje para determinar la variación de cada tratamiento, desde que se instaló las unidades experimentales hasta la obtención del compost, los análisis microbiológicos fueron realizados con el fin de comprobar la higienización del material, después de las altas temperaturas. En general el autor concluye que en los 6 tratamientos se cumple con los rangos óptimos de los parámetros de medición y la cantidad de bacterias nitrificantes son altas y fijadores de nitrógenos moderados y altos, en cuanto a los patógenos como coliformes no cumplen con la normatividad.

El proceso de producción y aplicación del producto “Microorganismos Eficaces” influye en la calidad del compost aumentándola con un proceso mecanizado, Se obtuvo promedios totales, de color 2,61 correspondiente a un marrón oscuro, el olor 2,44 que corresponde a un olor más agradable a medida que se aumenta la dosificación del producto “Microorganismos Eficaces”. [28]

De acuerdo a las metodologías se realiza la tabla 3 de resultados de parámetros de medición durante el proceso de compostaje de los 4 artículos y se hace el respectivo análisis de los mismos, igualmente se muestra el porcentaje de abono obtenido después del proceso:

Tabla 3.

Resultados de parámetros de medición de compostaje

Referencia	Temperatura	Humedad	Ph	Relación c/n	Materia orgánica	Nitrógeno	Cenizas	% Abono
(Huerta, O; López, M; Soliva, M; Zaloña, M. Compostaje de residuos municipales, 2008)	50°C	43,19	6,9 8	20,16	57,27	1,43	/	85
(Ospina, I. Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar, Universidad Nacional de Colombia, 2016)	45 A 50°C	24	7,7	19	22	0,97	50	70
(Rojas, F; Zeledón, E. Efecto de diferentes residuos de origen vegetal y animal en las características físico	44 a 50 °C	54,68 a 60,91	/	60:1 a 79:1	60	0,25 a 0,31	/	94,6

Tabla 3. Continuación

químicas del compost, Managua, 2007)								
(Rafael, M. Proceso de producción y aplicación del producto microorganismos eficaces en la calidad compost, Huancayo-Perú, 2015)	28,3°C	32,5	7,6	12,21	59,8	2,87	/	89,36

Nota. Una comparación de forma visual donde se evidencian las características de los cuatro artículos.

De acuerdo con los artículos anteriormente mencionados podemos analizar los resultados que se obtienen en cada estudio respecto a la aplicación de compostaje a través de diferentes tipos de residuos, podemos identificar que solo 1 de los artículos contiene el valor de todos los parámetros de medición, sin embargo en cada artículo nos brindan el porcentaje de abono que se genera después del proceso de compostaje, igualmente podemos identificar que los métodos para el proceso de compostaje en cada artículo varían por ejemplo en el primer artículo además de realizar el compostaje se le realiza un nuevo tratamiento por medio de digestión anaerobia, y otros 2 artículos se enfocan en la utilización de materiales orgánicos como restos de comidas y excretas de animales para la aplicación en cultivos agropecuarios el cual nos sirve de referencia para la aplicación de la tecnología en el municipio de Choachí de acuerdo con los residuos que generan en el mismo, y ya en el último artículo durante el proceso se incluyen los microorganismos puesto que el autor determina que esto aumenta la calidad del compost generado, sin embargo se debe evaluar los costos de este método ya que para mantener el funcionamiento de los microorganismos durante la degradación de la materia orgánica se requiere un mayor control de los parámetros.

En la primera referencia el autor determina que la calidad del compost no es la más favorable, sin embargo al momento de realizar el promedio de compost que se genera durante el proceso da como resultados un 85% el cual es óptimo para su posterior aprovechamiento como abono, igualmente el porcentaje de relación carbono/nitrógeno es un poco bajo en este caso el exceso de nitrógeno se pierde como amoníaco lo que genera contaminación y producción de malos olores, la solución sería añadir a la mezcla material rico en carbono como hojas secas, ramas, viruta de madera, entre otros, sin embargo los otros parámetros de medición cuentan con los niveles óptimos para su aprovechamiento estos valores se determinaron por el promedio que se obtuvo en cada planta.

En la segunda referencia el autor determina que la aplicación de compost mejora la disponibilidad de algunos elementos, sin embargo, no supe la necesidad total de los nutrientes que requiere el cultivo de caña de azúcar en este tipo de suelo, igualmente verificando los valores de medición de cada parámetro el porcentaje de humedad es muy bajo por lo tanto esto hace que se detenga el proceso de degradación sin embargo para solucionar el porcentaje de humedad se debe regar con agua hasta llegar al porcentaje adecuado, igualmente el porcentaje de relación C/N no es el adecuado, y la presencia de materia orgánica es bastante baja ya que se requiere un porcentaje de 50% en adelante para lograr el efectivo funcionamiento del compostaje, así mismo los otros valores de parámetros se encuentran dentro de los rangos óptimos para su ejecución, igualmente el porcentaje de abono es óptimo para su aprovechamiento sin embargo se requiere de un mayor control de los parámetros de medición para así mejorar la calidad del compost.

En la tercera referencia el método de compostaje se realiza a partir de 5 tratamientos con los residuos que generan en la Hacienda las Mercedes (pulpa de café, aserrín, basura verde + cascarilla de arroz, abono verde + cascarilla de arroz, residuos del comedor) en donde se quiere determinar cuál es más eficiente para aplicar nuevamente en la siembra de cultivos en este caso se evaluó la germinación de la semilla del rábano, en el cual el autor determina que el tratamiento de pulpa de café es el que tiene las mejores propiedades para el crecimiento del cultivo sin embargo todos los tratamientos son óptimos para su posterior aprovechamiento como abono ya que en el promedio de los 5 tratamientos nos da como resultado 94,6% de abono después del proceso de compostaje, así mismo se puede verificar que el porcentaje de relación C/N no se encuentra dentro de los rangos óptimos establecidos (30/1), esto nos indica que la actividad de los microorganismos

disminuye debido a deficiencia disponibilidad de Nitrógeno para su reproducción esto se puede mejorar al añadir la mezcla material rico en nitrógeno como estiércol, residuos crudos de cocina, restos de leguminosas. Adicionalmente durante el estudio no se determinó el pH y este parámetro es importante para conocer la dinámica de los procesos microbianos ya que este afecta la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas, cuyo crecimiento y desarrollo se pueden ver reducidos bajo condiciones de acidez y basicidad extrema.

En la cuarta referencia se utilizaron como residuos orgánicos (estiércol de ganado, residuos de avícola, residuos orgánicos de mercado, aserrín y microorganismos eficaces), en donde se aplicó la técnica de producción de compost tradicional en donde se escogió los residuos inertes en el cúmulo donde se encontraba almacenado y mecanizada en donde se utilizó la faja transportadora en la tolva o el área de descarga en donde se puede realizar una clasificación preliminar y el proceso se realizó en pilas, se obtuvo como resultado 89,36% de abono en promedio al final del proceso de compostaje por lo cual es óptimo para el aprovechamiento en cultivos o en recuperación de jardines o parques como lo determina el autor, así mismo la aplicación de microorganismos mejora la calidad del compost por ser altos fijadores de Nitrógeno, y de igual forma concluye que las muestras que obtuvieron un mejor compost fueron las que se hicieron con la técnica mecanizada, y los parámetros en cada muestra son óptimos para su aprovechamiento.

2.2 Lombricultura

«Es un proceso similar al compostaje donde en adición a las bacterias y otros microorganismos, el sistema digestivo de la lombriz juega un papel importante, transformando los residuos orgánicos en abonos de excelente calidad debido a los microorganismos benéficos que le aporta al suelo. La lombricultura es la utilización de lombrices para compostar residuos orgánicos. Es un proceso aerobio en el que las lombrices, con ayuda de los microorganismos, transforman la materia orgánica en compuestos más simples (Román et al, 2013), este es un producto estable donde se encuentran nutrientes disponibles para las plantas y gran cantidad de microorganismos benéficos que estimulan el desarrollo y la sanidad de los cultivos». [9]

Clasificación taxonómica de lombriz

Clase: Oligoqueta

Familia: Lombrícidae

Género: Lombricus, Eisenia

«En el mundo existen cientos de especies de lombrices que degradan residuos orgánicos, pero la mayoría de ellas viven en estados silvestres, como la lombriz de campo (*Allolobophora caliginosa*) y las lombrices nocturnas (*Lumbricus terrestris*), mientras que hay otras cuyo comportamiento y requerimientos ambientales permiten que sean cultivadas, como la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), la lombriz roja (*Lumbricus rubellus*), la lombriz nocturna europea (*Dendrobaena veneta* o *Eisenia hortensis*), estas últimas son producidas comercialmente y son usadas ampliamente en la mayoría de los climas debido a su tolerancia a diferentes rangos de temperatura y humedad (FAO, 2013). Para la obtención de lombricompost, la especie de lombriz que comercialmente más se emplea es *Eisenia foetida* conocida comúnmente como lombriz roja californiana». [9]

«**Función ecológica de la lombriz:** Participan en la degradación y mineralización de la materia orgánica del suelo (se les atribuye un 20 % del total) reciclando las hojas muertas y otros materiales orgánicos para convertirlos en nutrientes que pueden utilizar las plantas y árboles; además, en el desplazamiento que realizan remueven la tierra y airean el suelo. La lombriz en su

estado natural tiene gran participación en la fertilidad del suelo, por su efecto marcado sobre la estructuración del mismo (turrículos)». [9]

2.2.1 Características de la lombriz

- Es de color rojo.
- La presencia de clitelo (un anillo más grueso que los otros) indica su madurez sexual.
- Su cola es achatada, de color amarillo.
- Mide aproximadamente de 8 a 10 cm en su edad adulta.
- Son muy resistentes a condiciones adversas del medio.
- Consumen aproximadamente su propio peso diariamente.
- Requiere para su alimentación de altas concentraciones de materia orgánica.
- Excretan el 60 % de lo que consumen en forma de lombricompost.
- A las lombrices NO les gusta la luz, es por eso que siempre deben estar en condiciones de oscuridad.
- Su aparato respiratorio es primitivo.
- “Respiran” a través de su piel. No tienen pulmones, por eso es necesario tener un porcentaje de humedad adecuado, entre 70 y 80 %.
- Los sistemas, nervioso, circulatorio y excretor, están repartidos en los diferentes anillos.
- Su capacidad reproductiva es muy elevada, la población puede duplicarse cada 45-60 días.

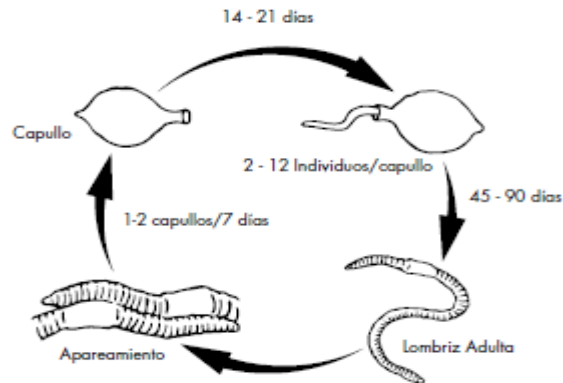
[9]

2.2.2 Factores para proceso de lombricultura

- **«Reproducción:** El cuerpo de la lombriz parece una cadena formada de anillos, destacándose un anillo más grande, que contiene los órganos reproductivos, denominado clitelo. La lombriz es hermafrodita, es decir que en un mismo individuo tiene los dos sexos, pero para la reproducción se requiere de dos individuos. La fertilización es cruzada, se realiza por la unión de los clitelos de dos lombrices, donde se realiza la cópula, cada 7-10 días. Los dos individuos quedan fecundados y producen huevos, llamados cocones, o capullos así como se puede observar en la figura 7 el cual muestra el proceso de reproducción de la lombriz». [9]

Figura 11.

Proceso de reproducción de la lombriz



Nota. Explicación mediante diagrama del proceso de reproducción de las lombrices presentes en el proceso de lombricultura. Tomado de. Guía UAESP aprovechamiento de residuos orgánicos

Medición de parámetros:

Temperatura: De 10 a 25°C, teniendo cuidado de que no descienda por debajo de 7°C y no supere los 35°C. [9]

Humedad: Entre 70 y 80%, humedades inferiores pueden dificultar el movimiento de las lombrices en el lombricultivo y muerte debido a la dificultad de obtener el oxígeno del agua; humedades superiores pueden ahogar a las lombrices debido a que ellas respiran por la piel, además de la posible atracción de vectores (moscas). [9]

pH: Entre 6,5 y 7,5. Valores de pH por debajo de 4,5 y por encima de 8,5 pueden causar la muerte del lombricultivo. Es importante verificar el pH del alimento antes de suministrarlo a la lombriz. [9]

Luminosidad: Las lombrices son fotosensibles, por lo tanto se debe mantener el lombricultivo protegido de los rayos directos del sol, ya que condiciones de exposición directa pueden matar a la lombriz. [9]

Relación C/N: La relación inicial de los residuos debe ser de 30:1. [9]

Salinidad: Debe estar por debajo de 0,5 %. Es importante conocer el origen del alimento del lombricultivo debido a que los residuos pueden contener altos contenidos de sal que pueden afectar el desarrollo de las lombrices. [9]

Contenido de amonio: Se recomienda que el contenido de amonio se mantenga por debajo de 0,5 mg/g. Una dieta rica en nitrógeno puede causar “gozzo ácido”, también síndrome proteico, enfermedad que puede matar a las lombrices. [9]

Alimentación de la lombriz: La lombriz roja californiana requiere de altas concentraciones de materia orgánica para alimentarse, pueden consumir prácticamente todos los tipos de materia orgánica, pudiendo ser ésta de origen orgánico vegetal, animal o mixto, fresco o en diferentes estados de descomposición. [9]

2.2.3 Proceso para la plantación de lombricultura

“Es importante recordar que cualquier sistema que se implemente debe ubicarse en sitios con piso sólido, facilitar la recolección de lixiviados, estar protegido de la luz del sol, de la lluvia, de temperaturas extremas, así como de animales domésticos; debe ser un sitio con fácil acceso y tener un espacio adecuado para realizar las labores operativas del lombricultivo”. [9]

Para el establecimiento del lombricultivo deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- **Contenedor o cama:** se caracterizan por ser recipientes abiertos para facilitar la alimentación de las lombrices y el monitoreo de las condiciones del lombricultivo. Los tamaños y materiales de estas estructuras son variables, empleándose para su construcción generalmente madera, ladrillos o concreto. [9]
- **Preparación del lecho (primera cama):** El lecho es la estructura o sustrato inicial donde van a estar las lombrices, para su armado se necesita: -Colocar una capa de estiércol fresco preferiblemente de caballo, con 5 días por lo menos en pre-compostaje. - Colocar una capa de paja o pasto y revolver con el estiércol. [9]
- **Preparación de alimento para las lombrices:** Se pueden emplear diferentes tipos de residuos, dependiendo de la disponibilidad de materiales en la casa o finca. [9]
- **Pre compostaje de los residuos:** En un contenedor aparte se va poniendo a descomponer la mezcla. Se debe dejar degradar una semana y luego se les pasa a las lombrices. [9]

- **Prueba de alimentos:** con 50 lombrices: en una caja de 50 * 50 * 15 cm con orificios para drenaje se coloca el material pre compostado en una capa de 5 cm, sobre la cual se colocan 50 lombrices, se riega con suficiente agua y se deja en un lugar oscuro por 24 horas, al cabo de las cuales se debe verificar que las lombrices han profundizado en el material y que se encuentran activas. [9]
- **Cosecha de lombrices:** Cuando tenga una apariencia granulosa, de coloración negra, con olor a tierra, donde no se distingan los materiales originales con que se preparó la mezcla, la densidad de lombrices se ha duplicado y la altura del lecho ha superado los 60 cm de altura es el momento de retirar las lombrices y cosechar el lombricompost. [9]
- **Extracción de lombricompost:** Se reduce la humedad, debe estar cercana al 30%, una vez se ha cosechado el lombricompost es necesario pasarlo por un tamiz o zaranda cuyo tamaño de orificio no sea mayor a 1 cm. El material fino será el producto final, apto para su uso o comercialización. El material grueso puede ser llevado al lombricultivo de nuevo. [9]

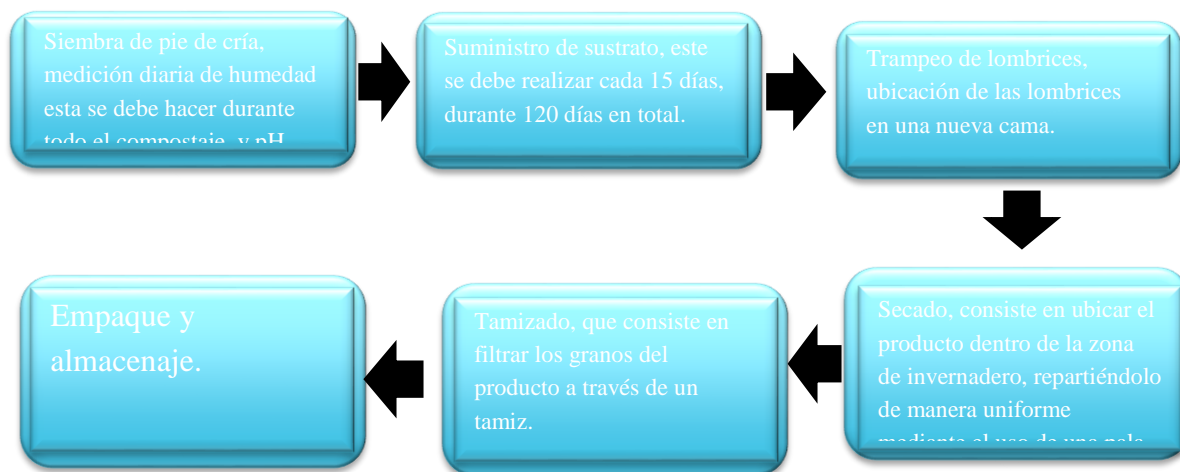
De acuerdo con la información sobre la tecnología de lombricultura como aprovechamiento para residuos orgánicos se encontraron 4 artículos en los cuales se dan a conocer las metodologías a través de los diagramas 5,6,7 y 8 por cada estudio y así mismo se muestran los resultados a través de la tabla 4, y se realiza el respectivo análisis.

- Metodología “Lombricultura: Una alternativa productiva en la Finca MAMAIA”2010

El presente documento muestra el caso de la Finca Mamaía, ubicada en el Municipio de La Vega, Cundinamarca, Colombia; donde se combinaron procesos agrícolas con estrategias de mercadeo, la metodología se puede observar a través del diagrama 5. [31]

Figura 12.

Lombricultura: Una alternativa productiva en la Finca MAMAIA



Nota. Proceso de producción de Humus con el uso de lombrices para la finca MAMAIA

De acuerdo con la metodología utilizada el autor determino que la lombriz roja californiana era la más adecuada para el proceso de lombricultura, como fuente de alimento utilizo el estiércol bovino de tres formas (fresco, maduro y viejo), esto se hizo con el fin de tener abonos en la agricultura para la obtención de frutos cítricos, frutos tropicales, familia de la guayaba.

Igualmente durante el proceso de lombricultura se determina que los parámetros de medición son óptimos para el aprovechamiento del mismo como abono para utilizar en la agricultura. [31]

- Metodología “Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana según estación del año y tipo de alimentación” 2004

En el presente estudio se pretende comparar el comportamiento reproductivo de esta lombriz en distintas estaciones del año y bajo diferentes sistemas de alimentación. «Los trabajos se llevaron a cabo en el predio de la Facultad de Ciencias Veterinarias de Corrientes, Argentina, sobre suelo natural no anegable, con agua proveniente de una conexión de red, disponiéndose de dos áreas diferenciadas. Una de ellas se utilizó para la degradación aeróbica de 3 tres diferentes residuos orgánicos utilizados como alimento (restos de comida, residuos de algodón y estiércol de

bovinos). La otra constituyó el sector de experimentación, donde se construyeron 9 módulos o lechos de cría de 1x1, 5 m, destinándose cada uno de ellos a un tratamiento diferente», la metodología se puede observar a través del diagrama 6. [32]

Figura 13.

Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana según estación del año y tipo de alimentación



Nota. Diagrama de la metodología que se evidencia en el artículo para comparar la efectividad de la lombriz roja californiana de acuerdo a las condiciones que se encuentre.

«La reproducción de lombrices en lechos tratados con compostaje proveniente de estiércol bovino produjo los más altos valores de crías, este tipo de alimento fue el más eficiente en todas las épocas del año, por esta razón el autor determina que la lombricultura es una alternativa válida para la diversificación productiva, ya que permitiría al productor disponer de abono orgánico de manera permanente, al tiempo que las lombrices podrían utilizarse como complemento proteico para la fabricación de alimentos balanceados para peces y animales de granja». [32]

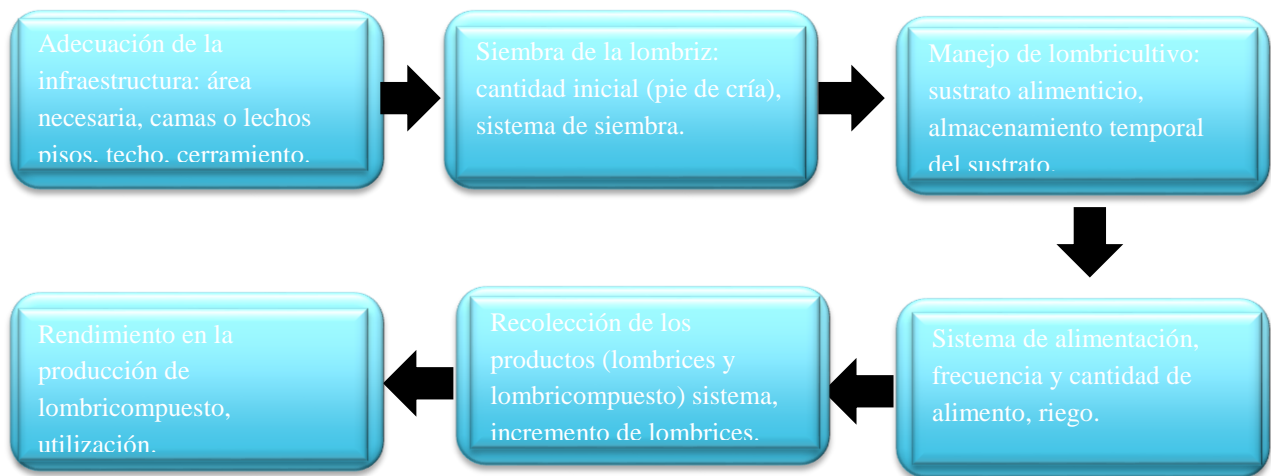
- Metodología “Lombricultura en pulpa de café” 1996

El presente estudio determina que es una actividad sencilla que puede emprender cualquier caficultor, con las ventajas de acelerar el proceso de descomposición de la pulpa de café y obtener lombricompost y lombrices para utilización en la misma finca.

“La velocidad de transformación de la pulpa depende de la cantidad de lombrices. Cuando se desea un proceso rápido, la densidad de lombrices debe ser alta: alrededor de 5kg de lombriz pura/m², esto corresponde aproximadamente entre 20 y 25kg de lombriz mezclada con sustrato”, la metodología de este estudio se puede verificar en el diagrama 7. [33]

Figura 14.

Lombricultura en pulpa de café



Nota. Diagrama de proceso de lombricultura presente en los residuos generados del proceso de producción de café.

En el presente estudio se utilizó como sustrato alimenticio la pulpa de café sola, obtenida por un beneficio tradicional o mezclada con mucilago esta última, proveniente de beneficiadores que utilicen despulpado sin agua, en este tipo de lombricultivos se han observado mayor incremento en peso de lombrices, de igual manera el autor propone que se utilice otros residuos que se generan en la finca y se mezclen con estiércol de diferentes especies animales (vacuno, porcino, equino) o residuos de otros cultivos. De acuerdo a la finca que cuenta con 1000 arrobas

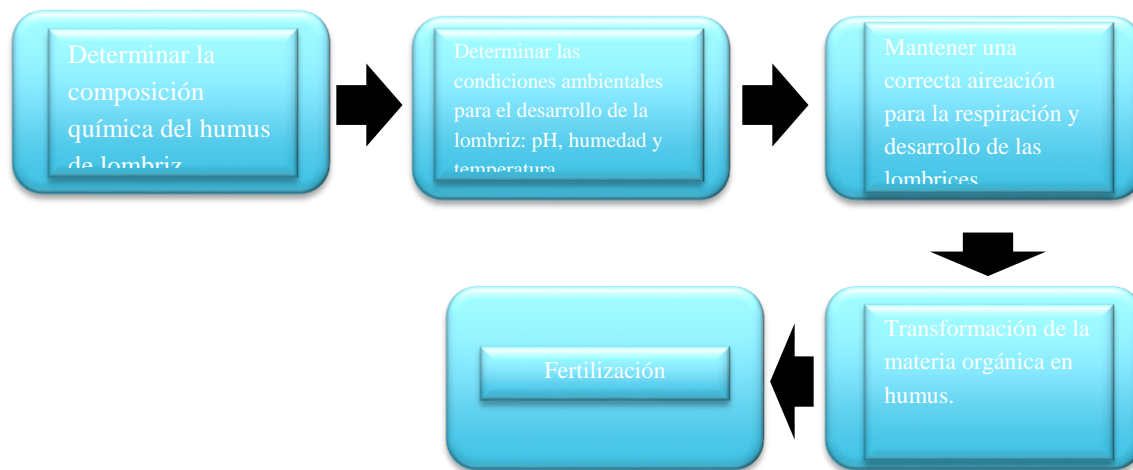
de café por lo cual se determina que se puede tener una producción de 9 toneladas de lombricompost húmedo fresco al año. Así mismo el autor concluye que todo el lombricompost obtenido es utilizado como abono en huertas, viveros, etc. [33]

- Metodología “implementación de la producción de lombricultura”2012

En el presente estudio el autor refleja cómo es llevada a cabo la lombricultura, la misma es conocida como una actividad centrada en la crianza de lombrices, en este caso se utiliza la lombriz roja californiana, dicho animal es el responsable de la producción de humus, el cual se obtiene por medio de un proceso de transformación, que está ligado íntimamente al reciclado de basura y la excreción de humus. Este estudio se lleva a cabo en la empresa Fénix S.A. quien aporta su espacio para la lombricultura. El proyecto se realiza con el fin de poder reducir el uso de fertilizantes químicos por el abono orgánico conocido como humus, permitiendo a su vez, mejorar la calidad del suelo, la metodología se puede observar a través del diagrama 8. [34]

Figura 15.

Implementación de la producción de lombricultura



Nota. Detalle grafico de la implementación de lombricultura como método de aprovechamiento de residuos orgánicos.

Para la alimentación de las lombrices se utilizaron pulpas de frutas y durante el proceso de producción de la lombriz se comprobó que la pulpa que mejor se adaptó como fuente de alimento

fueron, los desechos de pulpa de manzana y pera, ya que estas no eran tan líquidas, sino que en su composición eran las que más desechos orgánicos tenían (hojas, cáscaras, semilla, etc.). El autor determina que en un año la población de lombrices pasa de 1.000 unidades a 385.187 y así mismo la cantidad mensual de humus acumulado al cabo del año es de 8.958 Kg. El cual alcanzara para fertilizar un total de 16.29 hectáreas. [34]

Seguido de las metodologías de los estudios de lombricultura mencionados anteriormente se realiza la tabla 4. Con el fin de mostrar los resultados de los parámetros de medición de cada estudio y así mismo realizar el respectivo análisis.

Tabla 4.

Resultados de parámetros de medición de lombricultura

Referencia	Humedad	Temperatura	Luminosidad	Ph	% Abono
(Maldonado, S. "Lombricultura una alternativa productiva finca mamaia", Bogotá 2010)	70%	20 a 25°C	1%	6 a 7	8,33/mes
(Toccalino, P; Agüero, M; Serebrinsky, C; Roux, J. "Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana"2004)	80%	19 C°	/	6,5	54
(Dávila, A; Ramírez, C. "Lombricultura en pulpa de café"1996)	80 a 85%	21°C	/	/	92
(Marnetti, J. "implementación de la producción de lombricultura"2012)	70%	12 a 25°C	/	7	60

Nota. Comparación de los resultados en los cuatro artículos evaluados en el proceso de lombricultura

De acuerdo a los resultados observados en la tabla 4. Se puede determinar que en la referencia 1 se realizó un proceso tipo batch en donde se instalaron 3 camas en total para la producción del lombrihumus, en la finca hay varios cultivos de frutas como manzana, peras y guayaba y los residuos que estos generan son los que se utilizan para la alimentación de las lombrices y el abono que se genera después del proceso es un promedio de 2961 kg al año el cual es óptimo para la utilización en los cultivos de la finca o para la comercialización del mismo, sin embargo hay que tener en cuenta que el porcentaje de generación de abono por mes es un poco bajo por lo tanto se debe analizar la cantidad de abono que se requiere en cada cultivo y así mismo darle el mejor aprovechamiento, este estudio en general tiene unos valores óptimos para el aprovechamiento del lombricultivo como abono, igualmente es el único que determina el porcentaje de luminosidad el cual es importante puesto que las lombrices son fotosensibles y requieren de una luminosidad que no sea tan alta para lograr su completo desarrollo. [31]

En la referencia 2 se realizaron 9 módulos o lechos para la crianza de las lombrices durante el proceso se realiza inicialmente un compostaje de los residuos (restos de comida, cáscaras de frutas, partes de verduras, trozos de pan, estiércol de bovino), el material resultante fue ofrecido a las lombrices de acuerdo a un programa de alimentación establecido. Así mismo el autor determina que el alimento que generó un mayor crecimiento de la lombriz fue el estiércol bovino por lo tanto se generaría un mayor porcentaje de abono, igualmente se puede determinar que en cuanto a los valores de parámetros de medición estos son óptimos para el respectivo aprovechamiento como abono o como complemento proteico para la fabricación de alimentos balanceados para peces y animales de granja, además el autor determina que la pesca deportiva es uno de los principales atractivos turísticos del nordeste argentino, la posibilidad de comercializar el excedente de lombrices adultas como carnada viva podría representar una fuente extra de ingresos para el productor. [32]

En la referencia 3 se aplica el lombricultivo en una finca productora de café y la pulpa que se genera de este cultivo se utiliza como alimento para las lombrices, en este caso el autor determina que en una finca de 1000 arrobas de café se puede llegar a generar hasta 9 toneladas de lombricompost al año para su posterior aprovechamiento como abono en huertas, viveros, o para su comercialización, el autor hace mención al porcentaje de humedad el cual es óptimo para el desarrollo de las lombrices sin embargo es importante medir y controlar pH, y luminosidad para

mantener el estable desarrollo de la lombriz y así mismo se debe calcular el pH del alimento que se va a utilizar antes de suministrarlo a la lombriz, igualmente el autor determina que en este lombricultivo se ha encontrado que la mezcla de una parte de lombricompost con tres partes de suelo es la más adecuada para la preparación de almácigos de café y es rentable para el manejo de los subproductos. [33]

En la referencia 4 el lombricultivo se aplica en una empresa dedicada a la producción de pulpa de fruta, el cual aporta desechos de estas pulpas para que se utilicen como alimento para las lombrices, en cuanto a la cantidad de humus el autor determina que al año se obtendrá 8958 kg el cual sería suficiente para fertilizar un total de 16.29 hectáreas, además al obtener un abono totalmente orgánico se reducen costos y ayuda al mejoramiento de los suelos deteriorados por los fertilizantes químicos, igualmente los valores de medición del lombricultivo son óptimos para su respectivo aprovechamiento y para que se desarrolle completamente la lombriz, así mismo el autor determina que la lombricultura nos permite poder aprovechar un desecho como lo es la pulpa de frutas, la cual en este caso no tenía ninguna utilidad para la empresa en donde se realizó el estudio. [34]

2.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA

«La digestión anaeróbica, también llamada biometanización, es un proceso biológico que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el que parte de la materia orgánica de los residuos orgánicos se transforma, mediante la acción de los microorganismos, en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono y otros gases en pequeñas cantidades (amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, etc.)». [35]

«La materia orgánica de las deyecciones se transforma, por la acción de microorganismos, se trata de un proceso complejo en el cual intervienen diferentes grupos de microorganismos. La materia orgánica se descompone en compuestos más sencillos, que son transformados en ácidos volátiles, que son los principales intermediarios y moduladores del proceso, estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénicos que producen metano y dióxido de carbono». [36]

2.3.1. Factores que afectan la digestión anaerobia

Las bacterias metanogénicas responsables de la conversión final de la materia orgánica a un producto estable, son muy sensibles a las condiciones dentro del digestor. Por lo que disminuirían su actividad si estas no son mantenidas a niveles óptimos. [37]

- **Bacterias:** “Los lodos crudos que entran al reactor contienen las bacterias necesarias para lograr la estabilización. Por lo que es necesario que durante la operación se mantenga el mayor número posible dentro del proceso para realizar el trabajo de biodegradación, evitando remover más lodo digerido del necesario”. [37]
- **Carga de alimentación:** “Dentro de los parámetros del lodo crudo que deben medirse a la entrada del reactor están: la concentración (que es la concentración de sólidos en un determinado volumen de agua); la cantidad de sólidos volátiles (que indica la cantidad de material que puede ser usado como alimento por las bacterias e indirectamente la cantidad de arena)”. [37]
- **Mezclado:** «La estabilización de los lodos sólo puede llevarse a cabo si los 2 factores previamente descritos, bacterias y alimento, interaccionan. El mezclado permite mantener la mayor cantidad de alimento en contacto con las bacterias, reducir el volumen ocupado por materiales orgánicos e inorgánicos sedimentables y homogeneizar la temperatura y la concentración. Todo esto con el fin de acelerar el proceso de ruptura de sólidos volátiles y producción de metano». [37]
- **Condiciones anaerobias:** “Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, por lo que incluso pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para su metabolismo, las condiciones de anaerobiosis son mantenidas por medio de digestores cubiertos capaces de recolectar el biogás que se genera sin permitir el paso de aire”. [37]
- **Materiales inhibitorios o tóxicos:** “La digestión anaerobia como todos los procesos biológicos es susceptible a la acción de materiales y sustancias que en cantidades o concentraciones altas resultaran tóxicas o inhibitorias para la actividad microbiana”. [37]

2.3.1.a. Temperatura. “La temperatura tiene un efecto importante sobre las propiedades fisicoquímicas de los componentes encontrados en la digestión del sustrato. Esta también influye en la velocidad de crecimiento y el metabolismo de los microorganismos, además la temperatura tiene un efecto significativo en la presión parcial del H₂ en los digestores, por lo tanto influye en la cinética del metabolismo sintrófico”. [38]

«Las bacterias metanogénicas trabajan óptimamente en un rango de 29-37 ° C y de 48-60 ° C, fuera de estos rangos la actividad metabólica se ve reducida en forma significativa. Por ejemplo la actividad es casi nula a temperaturas menores de 10° C. Cabe señalar que a pesar de que no existe actividad metabólica a estas temperaturas las bacterias no sufren daño alguno». [37]

2.3.1.b. pH. «Cada uno de los grupos de microorganismos tiene diferentes rangos de pH óptimos. Los metanogénicos son extremadamente sensibles a este factor con un óptimo entre 6.5 y 7.2) mientras que los fermentativos son algo menos sensibles y pueden trabajar en un amplio rango de pH que va desde 4 hasta 8.5; a bajo pH los productos principales son ácido acético y butírico, mientras que a pH de 8.0 principalmente se forman ácido acético y propiónico». [38]

2.3.1.c. Humedad y sólidos totales. La metanización se produce en un rango de humedad de 45% a 85%. De forma general cualquier residuo que contenga una carga alta de materia orgánica es susceptible de utilizarse en este proceso teniendo en cuenta que cada combinación afecta el resultado y que a mayor carga orgánica mejores resultados se pueden esperar. [39]

Los sólidos totales son el material residual que queda en un recipiente después de la evaporación de una muestra y esta es subsecuentemente secada a una temperatura definida. De la concentración de sólidos totales que entran al digestor solo un porcentaje está disponible para la biodegradación, este porcentaje se determina mediante una prueba de sólidos volátiles. [37]

2.3.1.d. Adición de inóculo . El crecimiento de los microorganismos representa un problema, ya que desde que se inicia el arranque del proceso hasta que se ha alcanzado la estabilidad, lo más importante es la retención de la biomasa viable dentro del reactor y su posterior acumulación, es por ello que la inoculación de un digestor es la primera fase del proceso.

“El inóculo debe tener cierta actividad metanogénica, cuanto mayor sea menor será el periodo de arranque. El uso de un lodo maduro proveniente de un reactor anaerobio en

funcionamiento es altamente recomendable aunque también puede ser utilizado el estiércol de vaca, cerdo e incluso lodos domésticos”. [38]

2.3.1.e. Sólidos volátiles. El contenido de sólidos volátiles dentro del digestor debe ser aproximadamente mayor al 70%, de manera que la alimentación al reactor deberá monitorearse a fin de mantener un buen equilibrio. [37]

“Existen dos factores de carga distintos: el factor de carga orgánica y el de carga hidráulica. Que además de ser indicadores del proceso nos permiten evaluar la eficiencia del digestor. El factor de carga orgánica es la cantidad de alimento que entra como sólidos volátiles por día y se calcula como kilogramos de sólidos volátiles por día por metro cúbico por el volumen activo del digestor”. [37]

2.3.1.f. Tiempo de retención. «El tiempo de retención de sólidos es el tiempo promedio en que la biomasa permanece dentro del digestor, controla la conversión de sólidos a gas y mantiene la estabilidad del reactor, mientras que el tiempo de retención hidráulico es el tiempo en el cual el sustrato permanece en el digestor. El tiempo de retención hidráulico es igual al volumen del digestor dividido entre el flujo volumétrico diario, establece la cantidad de tiempo disponible para el crecimiento bacteriano y la subsecuente conversión de la materia orgánica a biogás. En la mayoría de los sustratos utilizados para la digestión anaerobia se requieren periodos largos de retención para disminuir la cantidad de SV y convertirse a biogás. Entre mayor sea la carga orgánica, mayor será el tiempo de residencia hidráulico para la disminución de los sólidos volátiles». [38]

De acuerdo con la información del proceso de digestión anaerobia se dan a conocer 4 artículos con las respectivas metodologías las cuales se pueden observar a través de los diagramas 9,10, 11 y 12 y los resultados se pueden verificar en la tabla 5 y se realizan los respectivos análisis de acuerdo a los parámetros de medición.

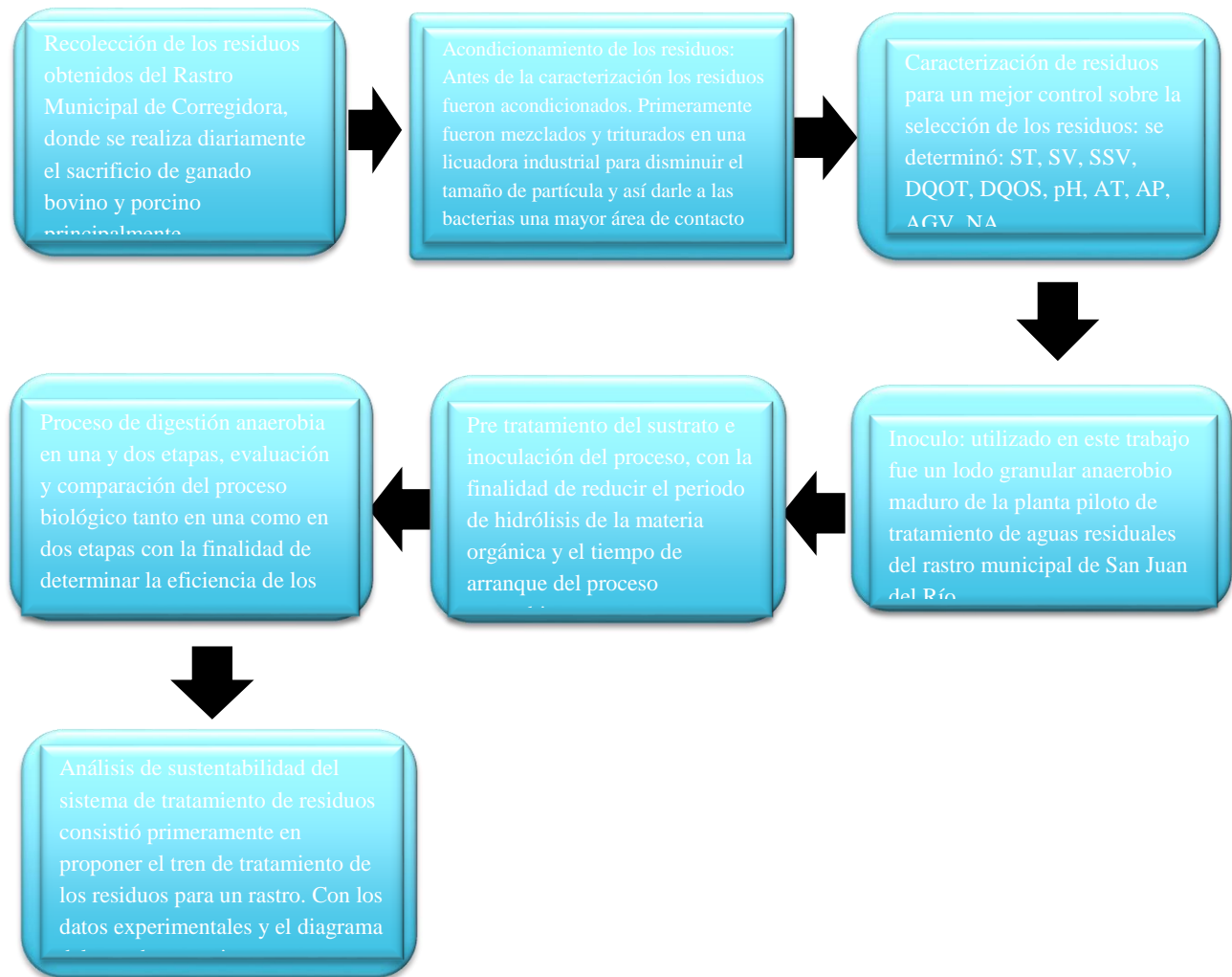
- Metodología “optimización del tratamiento de residuos provenientes del rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás” 2010

El presente estudio pretende «evaluar el efecto de pre tratar térmicamente el sustrato e inocular los biorreactores con lodo granular, inducir la separación de las etapas de la digestión anaerobia, fermentación y metanización, para lo cual se dio seguimiento al comportamiento de los

AGVs, ya que cuando estos se producen la etapa predominante es la fermentación y cuando se consumen da paso a la metanización, en el día 9 de operación finaliza la fermentación e inicia la metanización», la metodología se puede observar a través del diagrama 9. [38]

Figura 16.

Optimización del tratamiento de residuos provenientes del rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás



Nota. Detalle de la optimización de un proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás.

De acuerdo a lo que expone el autor en el presente estudio asegura que alrededor del 80 % de los sólidos son SSV, indicando que se tiene un elevado contenido de bacterias siendo esto

favorable para el proceso en cuanto a la caracterización del inóculo, también se obtuvo un valor alto para la actividad metanogénica, el cual representa que por 1 g de bacterias (SSV) presentes en el medio se transforma 1,39 g de DQOt a metano en un día.

El autor considera la posibilidad de usar un pre tratamiento térmico para solubilizar la materia orgánica y volverla más accesible para las bacterias, y de dividir el proceso en dos etapas con la finalidad de aumentar la producción de biogás.

Con respecto a la primera etapa del proyecto donde se llevaron a cabo las pruebas de pre tratamiento térmico e inoculación, se determinó que la solubilidad del residuo de rastro aumenta respecto a la temperatura de pre tratamiento, presentando los mayores incrementos de solubilidad de 55 y 49 % en las muestras pre tratadas a 60 y 70 °C respectivamente.

«En la inducción de la separación de las etapas se observó que los AGVs aumentan desde el inicio del proceso. Su mayor concentración se midió entre los días 3 y 5 de operación, permaneciendo estable hasta el día 9, y a partir de este día disminuyeron drásticamente para mantenerse estables durante todo el tiempo restante de operación. En la comparación de los sistemas en una y dos etapas se demostró que la remoción de materia orgánica es la misma para ambos casos, con un 56,5 y 56,1 % de eliminación de la DQOt respectivamente. Con todos los resultados y conclusiones anteriores se propuso un tren de tratamiento compuesto por acondicionamiento, fermentación y metanización. Se determinó el balance de materia / energía correspondiente con el fin de estudiar la auto sustentabilidad del proceso, observándose que el sistema no solo es capaz de producir la energía necesaria para su auto abastecimiento, sino que también existe un excedente de energía que puede ser utilizado en otras áreas del rastro con una finalidad diferente al tratamiento de los residuos generados dentro de este». [38]

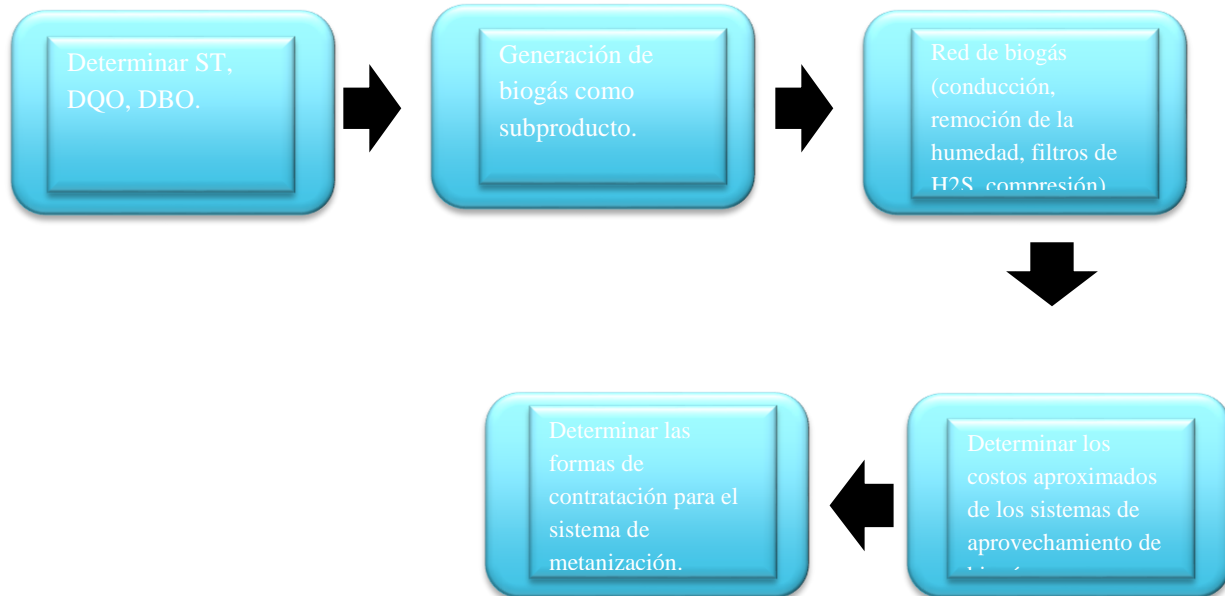
Así mismo el autor determina que el tren de tratamiento propuesto estabiliza la materia orgánica presente en el residuo y aumenta la producción de un combustible limpio como lo es el biogás, y también genera un producto estabilizado que puede ser utilizado como bioabono. [38]

- Metodología “manejo de vinazas: metanización y compostaje, aplicaciones industriales”2006

En el presente estudio el autor determina que las vinazas, como subproducto de la destilación de alcohol, tienen una carga orgánica muy alta, que las hacen potencialmente contaminantes. Una destilería de 150,000 litros diarios genera la misma carga orgánica que una ciudad de 1 millón de habitantes. La carga orgánica depende sin embargo de la materia prima utilizada, en este caso se utilizaron vinazas de las destilerías del Valle de Cauca (Colombia), provenientes de una mezcla de 40% de melaza y 60% de jugo de caña, o de una miel B, toda la metodología se puede observar en el diagrama 10. [40]

Figura 17.

Manejo de vinazas: metanización y compostaje, aplicaciones industriales



Nota. Detalle del aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante dos procesos tecnológicos, metanización y compostaje.

De acuerdo con el estudio el autor determina que “la metanización es sólo el primer paso de una cadena de tratamiento, hasta cumplir con las normas de descarga fijadas por la Autoridad ambiental. El principal inconveniente de este sistema de manejo para los Ingenios del Valle del Cauca es la necesidad de cumplir con las normas de descarga fijadas por la autoridad ambiental (200 mg/l de DBO = 99,1% de remoción). Una remoción de DBO tan alta implica una gran cadena

de lagunas de ‘post-tratamiento’, preferiblemente aireadas, con un buen nivel de operación y mantenimiento”. [40]

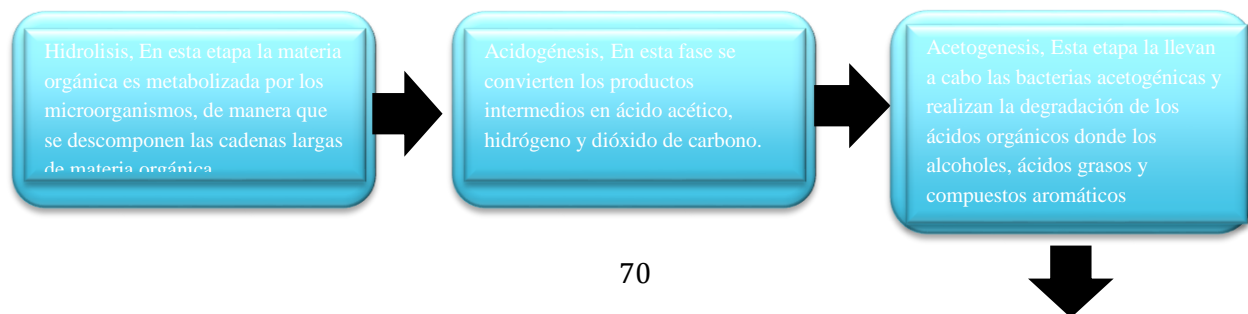
Igualmente determina que «Genera altas cantidades de biogás, que hoy en día tiene un mayor valor en el mercado que hace 2 años, por el incremento del precio del petróleo. El mundo está buscando fuentes renovables de energía. El biogás puede servir para: vender a gases de occidente para distribución domiciliaria / Generar vapor en una caldera de gas, y electricidad con una turbina (24 horas al día, 365 días al año) / Generar agua caliente para precalentar el agua de las calderas / Generar electricidad en motores de gas o turbinas de gas. El aprovechamiento del biogás se hace mayormente en motores de gas (o dual-fuel) para generar electricidad (Palmeiras y PSE en Tumaco) o en calderas (Cartones América en Cali o Sucromiles en Palmira); en algunos casos para distribución urbana (Sololá en Guatemala) o alumbrado de gas (Liofilizado en Chinchiná)». [40]

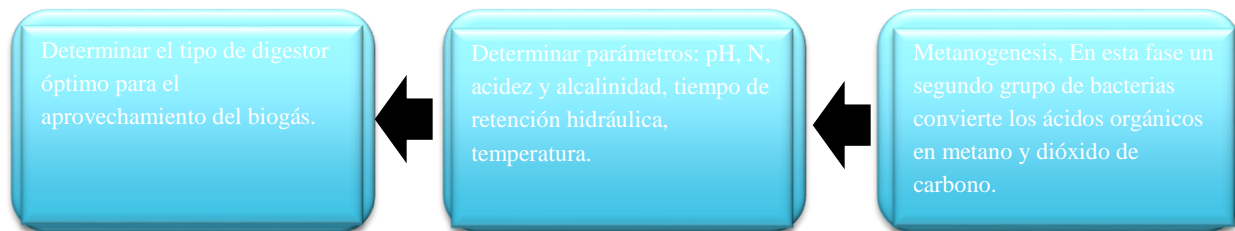
- Metodología “Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero” 2011

Este estudio pretende prevenir la contaminación del mar puesto que en los cruceros por la cantidad de personas que se encuentra se generan grandes cantidades de residuos y así mismo se disponen aguas residuales directamente al mar afectando el ecosistema, por esta razón el estudio consiste en la instalación de una planta de metanización y así poder hacer una valoración tanto a nivel económico como medioambiental para decidir si vale la pena albergar una planta de estas características y tener que reducir el tamaño de algunos de los servicios lúdicos del crucero, la metodología se puede observar en el diagrama 11. [41]

Figura 18.

Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero





Nota. Diagrama explicativo para formar una planta de producción de biogás mediante residuos orgánicos con la dificultad de realizar este proyecto en un buque.

De acuerdo a la metodología mencionada anteriormente el autor determina que es posible la instalación de una planta de estas características y además se pueden lograr unos beneficios que no se conseguirían con una planta de tratamiento de aguas residuales o tanques de almacenaje de residuos. «Además de los beneficios medioambientales están los beneficios económicos que se generan al tener esta planta. Por una parte está el ahorro del coste de descarga de los residuos de los restaurantes y las aguas negras al llegar a puerto, ya que son eliminados con el digestor. Igualmente determina que a mayor temperatura y mayor TRH, mayor puede ser la carga orgánica volumétrica (COV) y por lo tanto con más masa orgánica puede ser alimentado el digestor. Pero a mayor COV mayor es el riesgo de inhibir el proceso, ya que se carga demasiada biomasa a las bacterias. El autor da a conocer que la velocidad de degradación de la biomasa a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales especialmente a una disminución repentina de sólo unos pocos grados. Temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos, y por lo tanto mayores volúmenes de digestor». [41]

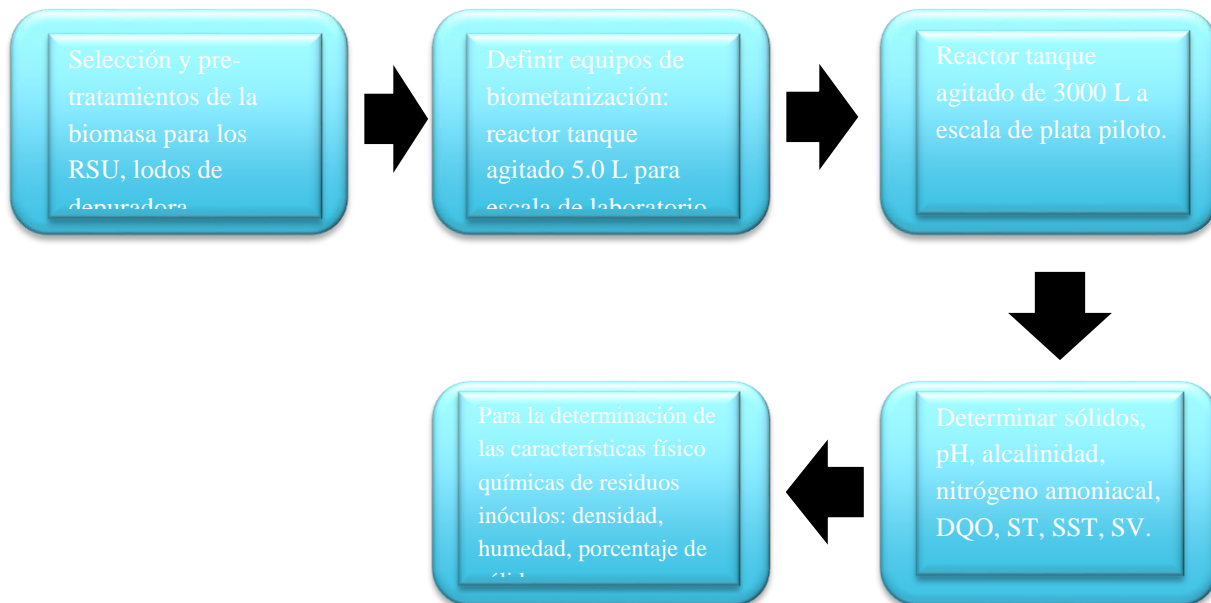
- Metodología “biometanización de residuos sólidos urbanos: escala de laboratorio y planta piloto”2007

«El biogás generado en la digestión anaerobia de los RSU, de los lodos de depuración de aguas urbanas, y de los residuos ganaderos presentan un gran potencial energético, ya que su componente principal es el metano y, por tanto, puede emplearse para producir energía térmica, eléctrica o en sistemas de cogeneración. Este estudio pretende seleccionar las condiciones

operacionales más adecuadas para realizar la etapa de arranque y estabilización de bio-reactores anaerobios termofílicos y secos, y obtener un procedimiento apropiado para el desarrollo de la fase de arranque de la digestión anaerobia seca de RSU, en un reactor de tanque agitado a escala de laboratorio». Así mismo, se pretende comprobar la aplicabilidad del estudio y la posibilidad de transferencia tecnológica al sector industrial, mediante ensayos realizados a escala de planta piloto, la metodología del estudio se puede verificar a través del diagrama 12. [42]

Figura 19.

Biometanización de residuo sólido urbano: escala de laboratorio y planta piloto



Nota. Breve descripción del proceso de digestión anaerobia a escala laboratorio y la evaluación de este sistema en planta piloto.

De acuerdo a la metodología mencionada anteriormente el autor determina que con respecto a la caracterización de residuos sólidos heterogéneos (residuos de restaurante, residuos sólidos urbanos, etc.) se puede concluir que, «existe el problema de obtención de una muestra representativa, debiéndose realizar un muestreo sobre lotes homogeneizados y seleccionados al azar para obtener la muestra bruta inicial. Para el manejo posterior del residuo (preparación de las alimentaciones de reactores, etc.) Con respecto a la fracción orgánica del RSU triturada, utilizada

en el reactor de 5 Litros, a escala de laboratorio, los resultados indican una puesta en marcha ensayado para este residuo permite alcanzar un arranque efectivo en 50 días, aproximadamente. A lo largo de este período se detecta una primera fase con predominio de la hidrólisis y acidogénesis, que alcanza los primeros quince días, y posteriormente se observa un comportamiento menos definido como consecuencia de la coexistencia de todas las etapas del proceso anaerobio, así mismo determina que la eficacia de eliminación de la materia orgánica (expresada como DQO) se presenta más acusada a partir del día 30 de ensayo. Resultados semejantes se obtiene en la eliminación de DQO, un 59,3%». [42]

El autor indica que de acuerdo a los resultados el reactor piloto que trata RSU es el que presenta una mayor eficacia de eliminación de materia orgánica expresada como SV y DQO. Así, el valor final de eliminación de SV en el reactor RSU alcanza el 89,5%. Además se observa una rápida biodegradación (72,1% de DQO tras 60 días de experimentación. [42]

Al describir las metodologías de los diferentes estudios de metanización (digestión anaerobia) se realiza la tabla 5. En donde se muestran los resultados de cada parámetro y se realiza el respectivo análisis.

Tabla 5.

Resultados de parámetros de medición de digestión anaerobia

Referencia	S.t	S.v	S. S.v	Dqot	Dqos	Reducción de dco	Ph	Alcalinidad total	Alcalinidad parcial	Acidos grasos volátiles	Nitrógeno amoniacal	Producción de biogás
(Medina, M. "optimización del tratamiento de residuos provenientes del rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás"2010)	174,6	128,6	134,21	232,32	135,89	56.85	6,49	20,88	5,55	15,33	2134,6	268.9 L
(Conil, P. "manejo de vinazas: metanización y compostaje,	5	/	/	60000	/		4	/	/	/	/	12000 L

realiza en dos etapas (fermentación y metanización) es el más favorable porque aumenta la producción de un biocombustible limpio como lo es el biogás, y también genera un producto estabilizado que puede ser utilizado como bioabono. [38]

En la segunda referencia podemos identificar que no se realiza la medición de todos los parámetros para determinar si el proceso de metanización es óptimo para su respectivo aprovechamiento, igualmente se determinó una remoción de DQO del 70% por lo tanto gran parte de la materia orgánica es degradada durante el proceso de la digestión anaerobia, sin embargo el autor determina que con el estudio que se le realizó a los residuos mencionados en la metodología se obtiene 12000 l de biogás el cual es el necesario para ser aprovechado en motores a gas, generación de electricidad o en calderas, y así mismo indica que sería un proyecto limpio puesto que se sustituya la energía fósil y así mismo se puede evitar la liberación de metano a la atmósfera, que es uno de los principales gases de efecto invernadero. [40]

En la tercera referencia podemos identificar que no se obtienen la suficiente cantidad de resultados para determinar si el biogás generado de la metanización es el óptimo darle el respectivo aprovechamiento en el crucero, hay una remoción de DQO del 75% por tanto el proceso es óptimo para la degradación de la materia orgánica, sin embargo el autor determina que con la aplicación de este proceso se obtiene 900000 l de biogás para su posterior aprovechamiento como combustible limpio, igualmente se obtiene un valor restante de 10 m³/día de bioabono el cual puede ser utilizado como abono de alta calidad para implementar en cultivos y así mismo se puede comercializar como lo plantea el autor. Finalmente el autor concluye que la digestión anaerobia es la mejor opción para disminuir la contaminación directa al mar y así mismo se disminuirían costos al utilizar el biogás como energía, a pesar de los pocos datos que se obtienen estos son óptimos para el proceso de metanización. [41]

En la cuarta referencia el autor determina que el reactor más útil es el piloto puesto que elimina mayor cantidad de materia orgánica, el lodo digerido posee un contenido medio en humedad del 96,6%. Los valores medios de sólidos volátiles fueron 19,75 gSV/kg y los sólidos fijos del orden de 13,85, por lo que la cantidad de materia biodegradable supone el 54,2%. Los lodos suelen presentar niveles de materia orgánica relativamente altos, entre 36 y 75%, con una cierta cantidad de sales minerales, lo que se refleja en su conductividad. Analizando los datos del biogás, se han podido apreciar los siguientes resultados: en los primeros días de ensayo se detecta

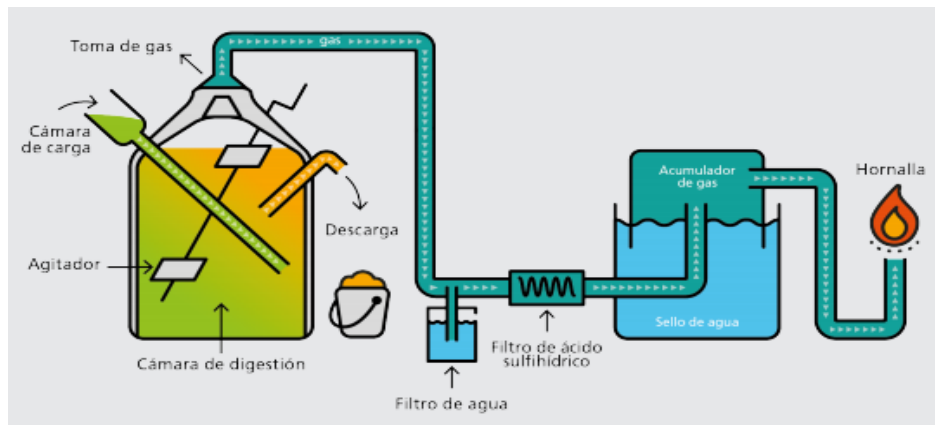
una alta producción de biogás y metano. La primera etapa del proceso (arranque) ocurre en la primera semana del ensayo y se caracteriza por una alta producción de biogás (media de 3,3 L/día). Posteriormente el reactor permanece estable hasta el día 40 con una producción baja de biogás (media de 3,28 L/día) y metano (1,0 L/día). Con respecto a la producción acumulada de biogás y metano, la misma ocurre de forma continuada en toda la experimentación hasta valores de 82,0 L para biogás y 29,9 L para metano para su posterior aprovechamiento como combustible, en cuanto a la composición del biogás casi no se detecta producción de hidrógeno, entre los días 1 y 5. El aumento de la producción inicial de metano a partir del día 8-10 coincide con la disminución de dióxido de carbono. Entre los días 5 y 40 de ensayo, se observan valores constantes de metano (44,8%) y dióxido de carbono (55,2%), característico de la fase metanogénica. (72,1% de remoción de DQO tras 60 días de experimentación. [42]

2.3.2 Biodigestores

«Es un recipiente o tanque (cerrado herméticamente) que se carga con residuos orgánicos. En su interior se produce la descomposición de la materia orgánica para generar biogás, el cual puede reemplazar al gas natural (de garrafas o red pública). Como se observa en la figura 8, el residuo, luego de ser descompuesto, se utiliza como biofertilizante. El biodigestor puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico». [43]

Figura 20.

Partes que componen el biodigestor



Nota. Descripción del proceso de digestión anaerobia teniendo en cuanto los equipos necesarios.
Tomado de. Biodigestor Manual de uso, UNCUYO

2.3.2.a. Tipos de biodigestores

- ***Biodigestores discontinuos (por lotes):*** «Los biodigestores discontinuos o por lotes son contenedores cerrados que una vez cargados no permiten extraer o añadir más sustratos hasta que finalice el proceso completo de biodegradación y producción de biogás. En otras palabras, el proceso finaliza cuando no se produce más biogás. Estos tipos de digestores admiten mayor carga de materiales poco diluidos, por lo que el requerimiento de agua es menor que en los sistemas continuos. Otro aspecto a favor es que no son afectados por presencia de material pesado como tierra o arena». [44]
- ***Biodigestores semi-continuos:*** «Estos biodigestores son alimentados diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total, esta se deposita en la cámara de carga, e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante. Generalmente producen biogás casi permanentemente, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias. Una limitante importante es la disponibilidad de agua, debido a que la carga debe ser una mezcla de una parte del material orgánico y cuatro partes de agua». [44]
- ***Biodigestores de mezcla completa:*** «La característica que define a este tipo de biodigestores es que la carga añadida periódicamente se mezcla casi en su totalidad con el contenido ya presente en cámara de digestión. Como resultado, parte del material sin biodegradar sale en el efluente, lo cual evita que se pueda garantizar la eliminación total de agentes causantes de enfermedades en plantas y animales así como de semillas de plantas arvenses (malezas)». [44]
- **Modelo chino:** «consiste en una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga que puede ser construida de concreto armado o ladrillos. Tienen una larga vida útil (mayor a 15 años) con un adecuado mantenimiento. Sin embargo, el relativo alto costo que representa la construcción de este modelo hace que no se haya popularizado en países latinoamericanos tanto como otros diseños. El digestor almacena solo pequeño volumen del gas generado en el interior, por lo que requiere un contenedor diferente construido para tal fin (gasómetro)». [44]
- **Modelo indio:** «También llamado de domo flotante, en su parte superior presenta una campana o domo que se mantiene flotando en el líquido a causa del biogás que retiene en su interior. El domo puede ser de metal o preferiblemente de un material resistente a la corrosión

como los plásticos reforzados. Esta campana sube y baja dependiendo del volumen de gas que contiene y por esto requiere una varilla guía central o rieles laterales que eviten el rozamiento contra las paredes de la estructura». [44]

- **Biodigestores de flujo pistón:** “Son aquellos en los cuales la cámara de digestión es alargada y por lo tanto la degradación de los residuos transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor. En esta categoría se encuentran los digestores familiares de bajo costo”. [44]

- **Modelo horizontal:** «Es básicamente un digestor tubular horizontal en cuyos extremos se sitúan las cámaras de carga y descarga del sistema. Su configuración alargada impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen; Esto lo hace útil en el aprovechamiento de residuos que requieran un tratamiento prolongado, tales como excretas humanas y ciertos desperdicios de sacrificio de animales». [44]

- **Los biodigestores familiares de bajo costo:** “populares en países en vías de desarrollo, son fáciles de implementar ya que se fabrican con grandes bolsas de polietileno tubular. Suelen situarse dentro de una especie de trinchera y su periodo de vida útil son unos cinco años”. [44]

2.3.2.b. Tipos de reactores

Reactor anaeróbico de alta velocidad: «Los digestores anaeróbicos de alta velocidad consisten esencialmente de un reactor continuo con agitación, que opera bajo condiciones mesofílicas o termofílicas. El desarrollo de fermentadores para la metanogénesis presenta extremados problemas en comparación con la mayoría de los fermentadores para otros procesos. Las consecuencias del fallo del proceso pueden ser grandes, particularmente si la operación de la planta productora debe cesar cuando el efluente no se trata continua y satisfactoriamente». [45]

Algunos de los parámetros que se deben considerar para el funcionamiento de reactores anaeróbicos son:

- **Tiempo de retención de sólidos (TRS):** «El tiempo de retención adecuado requerido para una digestión efectiva puede ser evaluado en estudios a escala de laboratorio o escala piloto o mediante la evaluación de una planta existente, basándose en la producción máxima de bioenergía como función del TRS. El tiempo de retención puede variar entre 15 a 30 días para la digestión mesofílica y entre 5 a 15 días para la digestión termofílica». [45]

- **Tasa de carga de sólidos volátiles (SV):** “La tasa de carga de SV es la aproximación más utilizada para dimensionar el digestor anaeróbico. Una tasa de carga de SV típica para una

digestión mesofílica es de 1.6 – 4,8 kg/m³.día. Para un digestor termofílico, la tasa de carga de SV puede ser el doble de uno mesofílico”. [45]

- **Reactor anaeróbico en secuencia tipo batch:** Este sistema funciona por ciclos y no en flujo continuo, donde cada ciclo de operación se divide en cuatro etapas como se puede observar en la figura 9:

- **Alimentación:** el afluente es incorporado al reactor.

- **Reacción:** etapa de tiempo variable en donde ocurre, en mayor grado, la degradación de la materia orgánica.

- **Sedimentación:** se detiene la agitación y la biomasa decanta, separándose del efluente clarificado.

- **Descarga:** el efluente depurado (clarificado) es retirado del reactor. Este tipo de reactor presenta ciertas características particulares que lo hacen ventajoso frente a los sistemas convencionales continuos, dentro de las cuales destacan:

- Permite un mejor control del proceso y una mejor calidad del efluente, ya que la descarga puede ser llevada a cabo cuando el efluente presenta los estándares requeridos.

- La operación puede llevarse a cabo sin recirculación de sólidos ni de líquido, a menos que ésta se utilice como agitación.

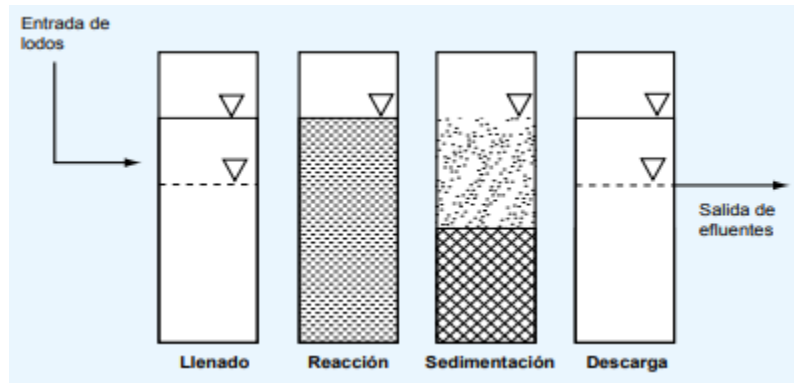
- La etapa de sedimentación se realiza dentro del mismo reactor por lo que no es necesario una unidad aparte.

- Se puede conseguir la eliminación de la etapa de sedimentación, con la consiguiente disminución del tiempo de cada ciclo, mediante la utilización de biomasa inmovilizada en soportes.

[45]

Figura 21.

Etapas operacionales del reactor anaeróbico en secuencia tipo batch

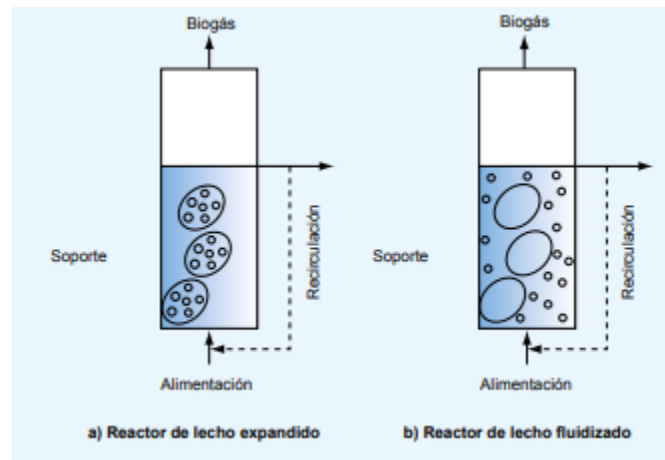


Nota. Etapas que se evidencia en biodigestor para la producción de biogás. Tomado de. Manual de biogás, Gobierno de Chile

Reactor de lecho expandido y fluidizado: «El reactor de lecho expandido (RLE) corresponde a una estructura cilíndrica, empaquetada hasta un 10% del volumen del reactor con un soporte inerte de pequeño tamaño lo que permite la acumulación de elevadas concentraciones de biomasa que forman películas alrededor de dichas partículas. Estos soportes pueden ser de arena, carbón activado granular u otros medios plásticos sintéticos, en los cuales ocurre la degradación de la materia orgánica, este reactor se puede observar a través de la figura 10 del presente documento. La expansión del lecho tiene lugar gracias al flujo vertical generado por un elevado grado de recirculación. La velocidad ascensional es tal que el lecho se expande hasta un punto en el que la fuerza gravitacional de descenso es igual a la de fricción por arrastre. En un RLE, se mantiene una velocidad de flujo ascendente tal que permita la expansión del lecho en 15 – 30%». [45]

Figura 22.

Funcionamiento biodigestores comunes



Nota. Representación esquemática de un reactor de lecho expandido y de lecho fluidizado. Tomado de. Manual de biogás, Gobierno de Chile

Biorreactor de membrana anaeróbica: “El biorreactor de membrana anaeróbica (BMA) integra una unidad de membrana dentro de un reactor o en un circuito externo para facilitar la separación sólido-líquido. Un BMA es capaz de retener biomasa y por ende puede operar a TRS extremadamente largos, independiente del TRH, lo cual es un prerrequisito para una operación de proceso anaeróbico exitoso”. [45]

2.3.2.c. Tipos de operación

Fases de la biodigestión anaerobia: La biodigestión se divide en cuatro etapas, que ocurren simultáneamente:

- **Hidrólisis:** éste es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por las enzimas extracelulares e intracelulares de los microorganismos aerobios facultativos. [46]
- **Acidogénesis o fermentación:** En la acidogénesis, los productos de la hidrólisis son fermentados en ácidos grasos de cadena larga y ácidos grasos volátiles. Como productos adicionales se obtienen también dióxido de carbono e hidrógeno. [46]

- **Acetogénesis:** “La acetogénesis es la etapa en la cual las bacterias acetogénicas actúan sobre esos ácidos grasos intermedios produciendo ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Esta etapa es llevada a cabo principalmente por dos tipos de bacterias acetogénicas: las productoras obligadas de hidrógeno (obligate hydrogen-producing acetogens, OHPA) y las homoacetogénicas”. [47]
- **Metanogénesis:** “La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaerobia. En esta etapa, distintos microorganismos metanogénicos (arqueas) producen metano a partir de los sustratos producidos en las etapas anteriores (acidogénesis y acetogénesis). El producto final de la metanogénesis es el metano que junto al dióxido de carbono son los compuestos principales del biogás”. [47]

Dilución: Siempre que se alimente el biodigestor con residuos orgánicos, es necesario colocar la misma cantidad en volumen de agua. Por ejemplo, si se carga 10kg de residuo, se debe agregar 10L de agua. “Para cargar el biodigestor se necesita un recipiente, balde o similar, que nos ayude a visualizar el volumen de residuos que se carga. Luego de medido el sólido en el balde, éste se volcará en la cámara de carga y luego se agregará la misma cantidad de agua que arrastrará los residuos hacia la cámara de digestión. Simultáneamente se producirá la descarga que también debe ser recogida en tachos o baldes para utilizarla luego como abono. Si durante la carga llegara a formarse un tapón con los residuos agregados, éste puede removerse fácilmente empujándolo con una varilla hacia adentro del caño de carga”. [43]

Agitación: Cada vez que se alimenta el biodigestor debe agitarse. La agitación produce que el sustrato cargado entre en íntimo contacto con las bacterias que se encuentran dentro del biodigestor. Por eso se recomienda agitar lentamente el mayor tiempo posible, luego de haber realizado la carga. Se pueden identificar tres tipos principales de agitación:

- **Agitación mecánica:** Mediante la utilización de agitadores de paletas o similares, ya sea de manera manual o utilizando motores.
- **Agitación por recirculación de digestato:** La agitación se logra al introducir una bomba de recirculación que mantiene el digestato en movimiento, generando turbulencia en la parte líquida del reactor.
- **Agitación por recirculación de biogás:** La agitación se da por burbujeo al inyectar el biogás producido al fondo del reactor. [47]

Temperatura: La temperatura es un factor importante dentro de la biodigestión anaerobia, pues define la velocidad de las actividades metabólicas de los microorganismos encargados de degradar los sustratos (bacterias y arqueas). Se pueden definir tres rangos de temperatura principales en los cuales se puede dar la biodigestión anaerobia: psicrófilo, mesofílico y termofílico, los cuales son definidos en relación con los microorganismos adaptados a estas temperaturas:

- **Rango psicrófilo:** Este rango de temperatura abarca desde los 5°C hasta los 25°C. La biodigestión realizada en este rango se caracteriza por producciones de biogás muy bajas, por lo que su aplicación industrial es muy limitada. [47]
- **Rango mesofílico:** Con temperaturas desde los 30°C hasta los 40°C, el rango mesofílico es el rango más empleado en plantas de tratamiento de aguas residuales y en biodigestores anaeróbicos. [47]
- **Rango termofílico:** Abarca desde los 45°C hasta los 60°C, se caracteriza por ser un rango de mayor demanda energética, altas producciones de biogás, alta tasa de destrucción de patógenos y soportar una mayor carga orgánica diaria. [47]

Relación C/N: «El carbono y el nitrógeno son los principales nutrientes que necesitan las bacterias para vivir. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Por lo tanto, ambos nutrientes deben estar equilibrados, por lo que la relación óptima C/N en el sustrato está en el rango de 30:1 hasta 20:1. En sustratos con una relación C/N > 35:1 la biodigestión ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado». [46]

Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles: Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). Matemáticamente podemos mostrarlo así:

%ST: Porcentaje de Sólidos Totales = gramos de Sólidos Totales /100 g de mezcla

“El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digester es muy importante, ya que la movilidad de las bacterias se ve crecientemente limitada a medida que

se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas”. [46]

Los Sólidos Volátiles: son aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. La expresión matemática de los mismos es:

$$\%SV: \text{porcentaje de Sólidos Volátiles} = \text{gramos de Sólidos Volátiles} / 100 \text{ g de ST}$$

Para saber calcular las mezclas, debemos saber cuál es el contenido de sólidos de nuestros sustratos. [46]

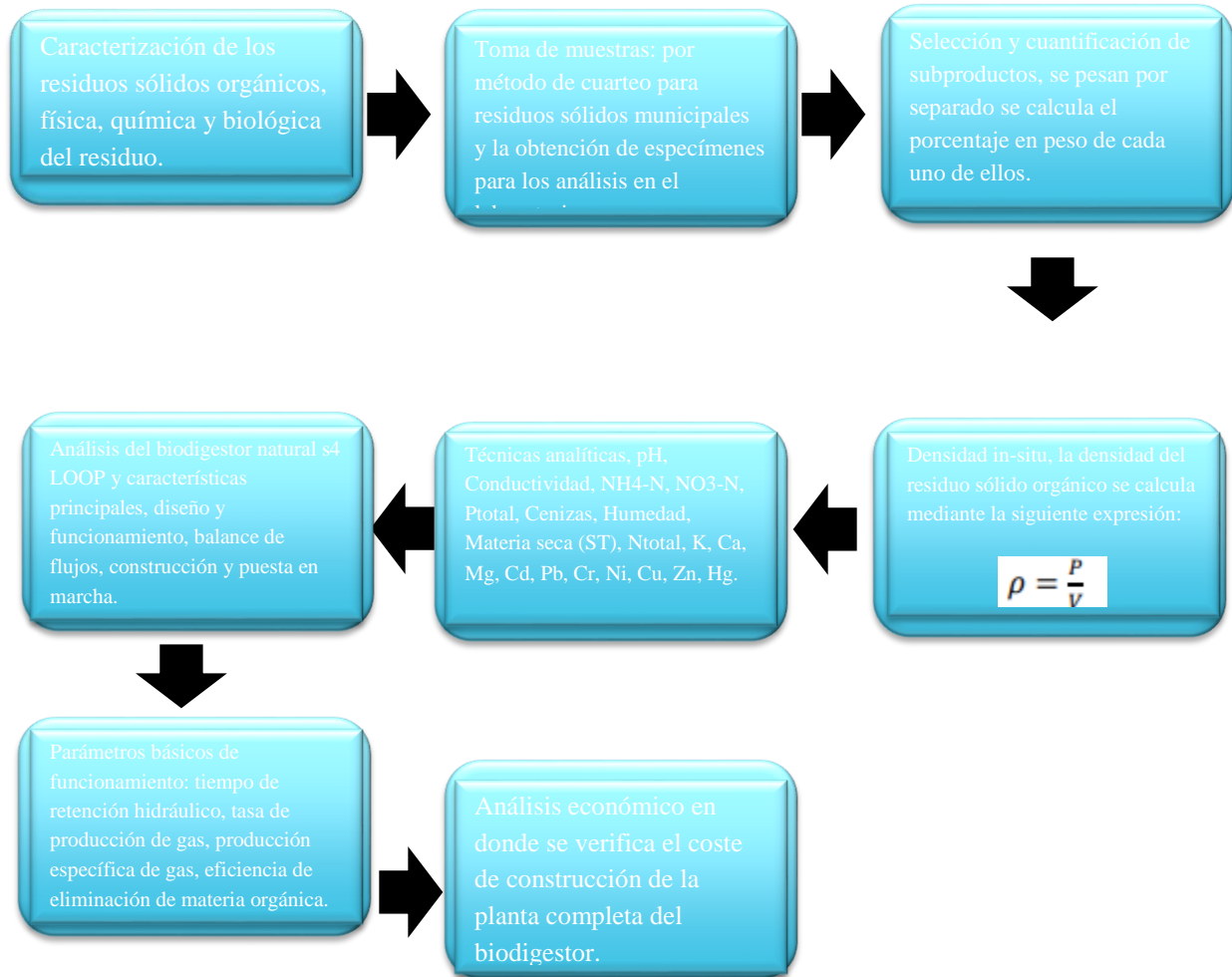
De acuerdo con la información del proceso de los biodigestores se dan a conocer 4 artículos con las respectivas metodologías las cuales se pueden observar a través de los diagramas 13,14, 15 y 16 y los resultados se pueden verificar en la tabla 6 y se realizan los respectivos análisis de acuerdo a los parámetros de medición.

- Metodología “Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (BOLIVIA)” 2013

En el presente estudio se describe el diseño, la construcción y puesta en marcha de un biodigestor novedoso para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), el principal objetivo es implementar, poner en marcha y evaluar el biodigestor Natural S4 Loop y evaluar la idoneidad de este como opción para tratar los residuos sólidos orgánicos. Para ello, se describe el diseño, la construcción y puesta en marcha del digestor, así como un análisis económico del mismo, la metodología se puede observar en el diagrama 13. [48]

Figura 23.

Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (BOLIVIA)



Nota. Producción de biogás mediante los residuos orgánicos teniendo en cuenta densidad relativa y las propiedades para el desarrollo de producto final.

El autor al aplicar la metodología mencionada anteriormente determina que el residuo tiene una gran cantidad de cebolla, papa/yuca, acelga y cítricos (mayormente naranjas), ya que supone casi el 50 % del peso total de la muestra. La presencia de este último componente (20,74 % en peso) puede ser problemática, ya que según la bibliografía las sustancias producidas en la descomposición de la naranja pueden ser potencialmente tóxicas o inhibidoras. [48]

El porcentaje de ST es del 21,25 y 21,65% en peso para cada una de las ciudades. Estos valores son acordes a la concentración de sólidos totales del residuo de frutas y vegetales está en el rango de 8 - 18%, con un contenido en sólidos volátiles entre 86 y 92%, indicativo de una alta concentración de materia orgánica susceptible de tratamiento anaerobio. [48]

La caracterización física realizada “in situ” muestra una densidad de 456,7 kg/m³, típica para este tipo de residuos en este tipo de países, y se ha podido observar un alto contenido de cítricos. Este compuesto puede ser perjudicial para el proceso de digestión anaerobia, ya que algunos estudios mencionan que su descomposición genera sustancias tóxicas que pueden inhibir el proceso. [48]

Igualmente el autor establece que los mayores problemas a la hora de tratar la FORSU en reactores mediante la tecnología de digestión anaerobia se producen debido a sus propiedades físicas desfavorables (baja densidad y flotabilidad), la necesidad de un pre-tratamiento por el tamaño de sólidos (mayor coste) y la sobreproducción de AGV en las etapas iniciales del proceso que puede llevar al fallo del sistema. [48]

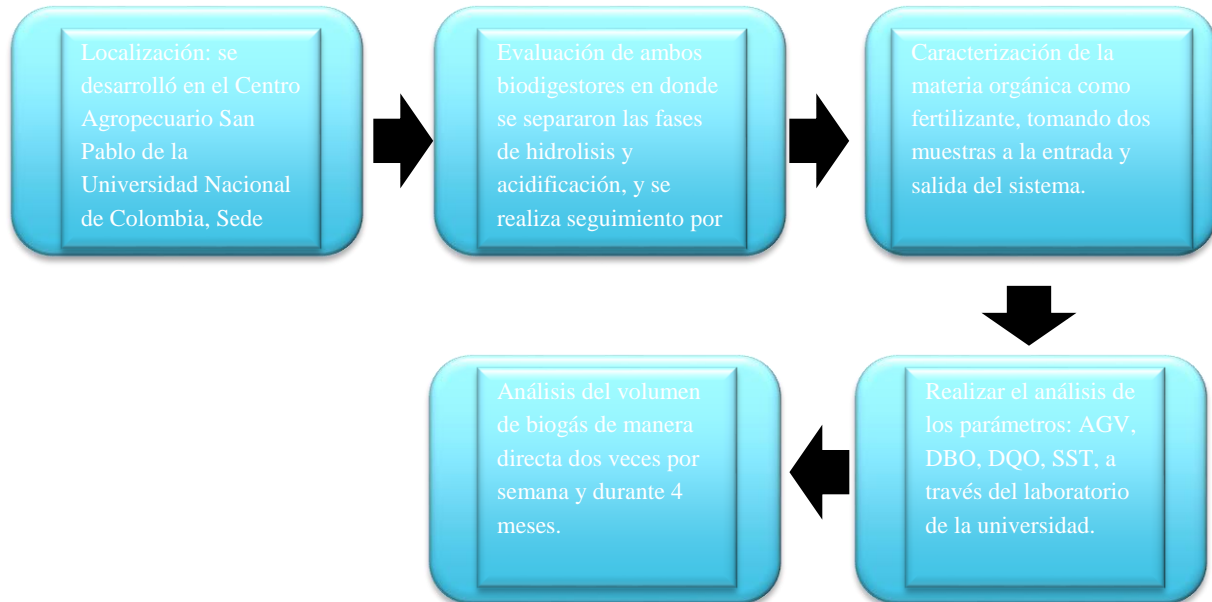
- Metodología “Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío” 2007

En el presente trabajo se busca evaluar «la etapa de estabilización el funcionamiento de un sistema en serie, de dos biodigestores de cúpula fija GTZ y uno tipo Taiwán en clima frío, a partir de la degradación de las excretas porcinas las cuales son muy interesantes desde el punto de vista de la digestión anaerobia, no solo por su alta capacidad de producir metano, sino también por su alta concentración de nutrientes con respecto a otros sustratos, lo que les confiere buenas características como abono agrícola, especialmente después de la biodigestión. La composición de la porquinaza depende de factores fisiológicos, ambientales, y alimenticios». [49]

Las características anteriormente expuestas son de vital importancia a la hora de escoger un sistema de aguas residuales eficiente en descontaminación y económicamente sostenible. De las explotaciones porcinas se desprenden residuos sólidos y líquidos que son arrastrados por el agua de lavado, lo que se conoce como agua residual, que se compone principalmente por excretas, 55% heces y 45% de orina, la metodología de este estudio se puede verificar a través del diagrama 14. [49]

Figura 24.

Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío



Nota. Proceso para realizar una digestión anaerobia en condiciones climáticas frías que puede llegar a afectar el diseño de la planta.

De acuerdo con la metodología utilizada los autores determinan que los AGV comenzaron a decrecer hasta el tercer mes, a partir del cual se comenzaron a estabilizar con valores que oscilaron entre 17,5 y 18 mg · L. En este caso los AGV disminuyen constantemente, lo cual favorece la etapa metanogénica y la producción de biogás. [49]

La producción de biogás fue de 62,30 m³/semana, la cual se incrementó y se estabilizó entre los meses 3 y 4. En los meses 2 y 3, una vez estabilizado completamente el sistema, se presentan relaciones de 3:1 de m³ de biogás por m³ de biodigestor, por lo cual se acerca al comportamiento de un biodigestor de alto flujo, que adquiere dicha eficiencia en condiciones termofílicas. La producción de biogás en este sistema en serie para clima frío se considera alta. [49]

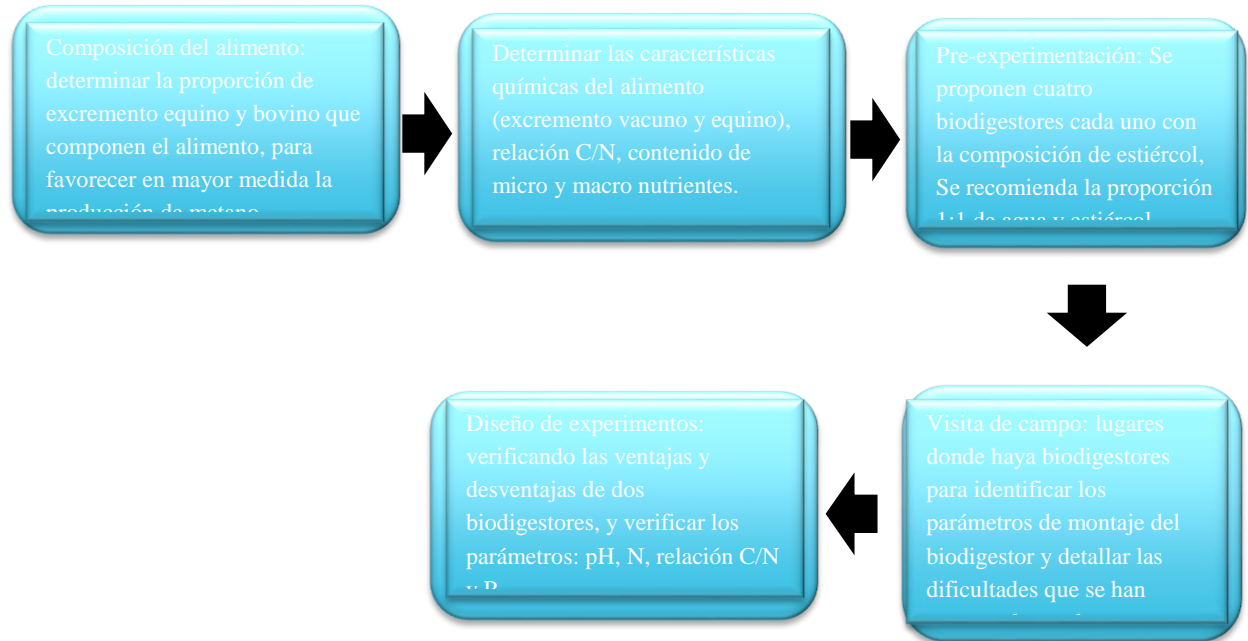
«Durante la investigación los autores determinan que el sistema en serie de un biodigestor GTZ y uno Taiwán, es una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, ya que se logran altas remociones de carga contaminante y altas eficiencias en la producción de biogás. A partir del conocimiento de la capacidad metanogénica del sistema, y el comportamiento que este presentó, se concluye que el sistema en serie funciona realizando las etapas de hidrólisis y acidificación en el biodigestor GTZ, mientras que la etapa de metanización se realiza en el biodigestor Taiwán, cumpliendo de esta manera con los objetivos de la investigación. Igualmente los autores consideran importante realizar nuevas investigaciones reduciendo los tiempos de retención y variando la relación agua/estiércol, con el fin de analizar la eficiencia del sistema con otras condiciones de trabajo en campo». [49]

- Metodología “Especificación de las condiciones de operación de un biodigestor usando como materia prima estiércol bovino y equino en la finca “villa italia” ubicada en el municipio Paipa (Boyacá) “ 2019

En el presente estudio se diseñó una propuesta para la «implementación de un biodigestor para la finca “Villa Italia” ubicada en Paipa, Boyacá a partir de excretas bovinas y equinas, animales con los que cuenta la finca actualmente, y que producen alrededor 102kg de excretas por día, disponibles para el funcionamiento del biodigestor. Para la realización de la propuesta se determinaron las características químicas de las excretas para comprobar su viabilidad para la obtención de gas metano». Luego se realizó una pre-experimentación en donde se compararon distintas mezclas de alimento variando las cantidades de excremento bovino y equino presente en estas para obtener la mezcla de excremento con la cual se obtiene mayor cantidad de metano, toda la metodología se puede verificar a través del diagrama 15. [50]

Figura 25.

Especificación de las condiciones de operación de un biodigestor usando como materia prima estiércol bovino y equino en la finca “Villa Italia” ubicada en el municipio Paipa (Boyacá)



Nota. Breve paso a paso para el aprovechamiento de residuos como estiércol mediante la digestión anaerobia.

De acuerdo con la metodología los autores determinan que en el proceso de degradación, el estiércol sufre una variación tanto en la composición como en sus propiedades, según el tipo de animal del cual proviene. “En la recolección del estiércol, generalmente se encuentra una parte en base seca otra en base húmeda. En cuanto a la relación C/N presente en el estiércol de 20 a 40, se identifica que el equino es bajo comparado con el vacuno; lo que puede implicar un mayor tiempo de retención en la obtención de metano, cuando se tiene un reactor alimentado únicamente con estiércol equino, a pesar de presentar mayor proporción de macro nutrientes”. [50]

Según la experimentación realizada por el autor se determinó que «la proporción de alimento que favorece en mayor proporción la producción de gas metano, es la de 0,75 estiércol vacuno y 0,25 estiércol equino, ya que fue la que presentó mayor concentración de gas metano al momento de ser disuelto en el aire comparándolo con las demás mezclas evaluadas. La temperatura

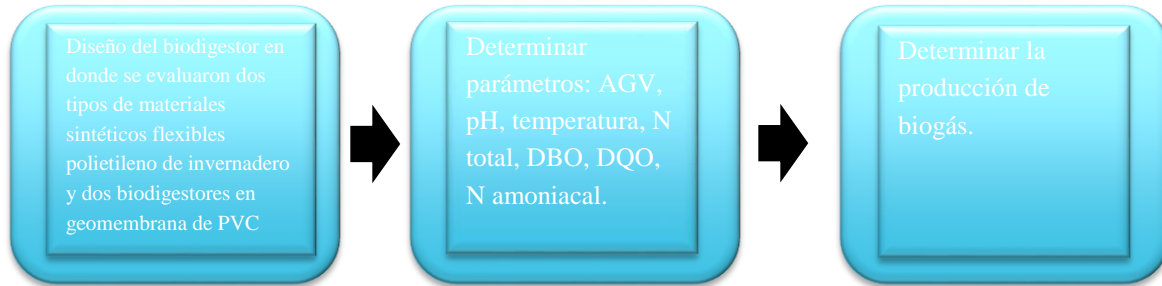
de entrada y dentro del biodigestor sería el ambiente, teniendo en cuenta que el aislante que se recomendó ayuda a que no se den variaciones significativas dentro del biodigestor. El pH de la mezcla de estiércol es con el agua, correspondiente a 7,3, favorece la producción de metano, por lo cual no habría que hacerle ninguna corrección en el alimento frente al pH. El tiempo de residencia del alimento dentro del biodigestor según su tamaño es de 30 días. El autor recomienda que antes de usar el bio-abono se debe ampliar la información según el cultivo que se tenga, debido a que para cada cultivo son distintos los requerimientos del mismo, igualmente recomienda evaluar la posibilidad de agregar otros desechos a la mezcla, para hacer uso de otros residuos que se generen en la finca, como lo pueden ser residuos de comida, siempre y cuando se garantice la misma o mayor cantidad de metano». [50]

- Metodología “Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino” 2002.

El presente estudio en donde se realizó el experimento comprendió dos biodigestores de plástico polietileno de invernadero y dos biodigestores en geomembrana de PVC. «Cada biodigestor poseía una longitud de 2,6 m y 520 litros de volumen líquido. Se cargaron diariamente con 34,7 litros de una mezcla (26 litros de agua, 4,7 kg de estiércol y 4 litros de orina) durante las fases de arranque (3 meses) y de estabilización (3 meses). El tiempo de retención de los biodigestores fue de 15 días. El ensayo se desarrolló en la Finca El Vergel, ubicada en la vereda Bellavista municipio de El Dovio, en zona de ladera de la cordillera Occidental del Valle de Cauca, a 1850 msnm, con precipitación promedio de 1600 mm anuales y temperatura ambiental promedio de 18°C», la metodología se puede verificar a través del diagrama 16. [51]

Figura 26.

Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino



Nota. Desarrollo de un plato de biodigestores en pvc para aprovechar los residuos sólidos.

Respecto a la metodología el autor determina que la media de producción de biogás para los biodigestores de geomembrana es de 66,4 litros/ día y de 65,5 litros/día para los biodigestores plásticos. “Se encontraron correlaciones muy bajas ($r < 0.34$) entre la producción de biogás y la temperatura ambiental (entre 17 y 20°C) para cada uno de los materiales empleados en el biodigestor. De igual manera, el coeficiente de correlación entre el biogás producido y la temperatura interna fue muy bajo en los dos tipos de biodigestores ($r < 0,42$); este mismo resultado se obtuvo al correlacionar con AGV”. Esto indica que en la variación de la producción de biogás no se evidenció una influencia directa del comportamiento de parámetros como la temperatura ambiental, interna o AGV. [51]

Igualmente el autor determina que las producciones de biogás que son muy similares en los dos tipos de biodigestores (98 litros/día). No hubo diferencias significativas entre los dos tipos de material, lo cual se verificó en la práctica en el desarrollo del proceso de descontaminación para el biodigestor en geomembrana y el de plástico. “Las concentraciones promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) en comparación con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) presentaron valores notablemente mayores, cuyas relaciones DQO/DBO estuvieron cerca de lo que indicaría mayor presencia de compuesto inorgánicos en el sistema. En cuanto al comportamiento de las remociones de DQO y DBO en los biodigestores se observó que se

redujeron con respecto a los valores obtenidos durante el arranque, por lo cual se pudo asumir que se empezó a estabilizar el proceso para iniciar la fase metanogénica”. [51]

Así mismo el autor determina que esta investigación permite corroborar estadísticamente que los biodigestores tubulares de flujo continuo son una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, pues se logran altas remociones de materia orgánica y buena producción de biogás a muy bajo costo. [51]

Tabla 6.

Resultados de parámetros de medición de biodigestores

Referencia	Equipos	Ph	Densidad	S.t	S.v	Ntotal	Ptotal	T°	Remocion de dco	Dco	Produccion de biogas
(Díaz, A. "Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)"2013)	Biodigestor natural S4 Loop, de carga continúa con flujo pistón y un sistema de recirculación. La planta completa consta de un reactor anaerobio, un sistema de recirculación de efluente, y un depósito de vaciado.	7 a 7,2	608,8 a 649,0	21,25 a 21,60	95,77 a 94,51 0	3,09 a 3,47	1,15 a 0,32	26,3 °c	/	/	44,35 L
(Osorio, J; Ciro, H; González, H. "Evaluación de un sistema de biodigestion en serie para clima frio" 2007)	Dos biodigestores uno de estructura rígida tipo GTZ y otro de flexible tipo Taiwán, donde se Separaron las fases de hidrólisis y acidificación.	6,9 a 7,3	/	53,38	0,5-9	0,063	378	16° c	96,1	54,72 9	62300 L
(Hernández, B; Ramírez, N. "Especificación de las condiciones de operación de un biodigestor usando como materia prima estiércol bovino y equino en la finca "villa italia" ubicada en el municipio Paipa (Boyacá) " 2019)	Biodigestor flexible está conformado por un digestor tubular hecho de material plástico, que pueden ser de compuestos como polietileno, PVC, entre otros, y biodigestor de almacenamiento tradicional; estructura semiesférica de material de polietileno de	5,5 a 7,4	1211,66	9	6	1,55	5	22° c	/	/	43290 L

Tabla 6. Continuación

	Película delgada en vez de una campana móvil o cúpula fija.										
(Pedraza, G; Chara, J; Conde, N; Giraldo, S; Giraldo, L. "Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino" 2002.	Dos biodigestores de polietileno de invernadero y dos biodigestores en geomembrana de PVC, Cada biodigestor poseía una longitud de 2.6 m y 520 litros de volumen líquido.	6,94	/	/	/	33,7	/	17 a 20 ° c	89	88,5	184 L

Nota. Cuadro comparativo respecto a los valores presentados en cada artículo teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas evaluadas.

En la referencia uno de acuerdo a los resultados el autor determina que aunque las previsiones y los resultados obtenidos hasta el momento le sean favorables, este proyecto requiere de su continuación (análisis, seguimiento del funcionamiento del biodigestor, etc.) para poder confirmar que el Natural S4 Loop es un modelo suficientemente competente en el mercado actual de tratamiento de FORSU de bajo coste en países en vías de desarrollo. «Los datos muestran un pH de 7 y 7,2 estos valores medios se encuentran dentro del rango óptimo de funcionamiento de un biodigestor. La densidad, en cambio, es mayor que el calculado “in situ” para el residuo de Tiquipaya, aunque hay que tener en cuenta que son valores acordes, todos los resultados que se observan en la tabla 6 son valores óptimos para el funcionamiento del biodigestor sin embargo el autor propone que se realicen más estudios, ya que falta la información de DQO el cual nos ayuda a determinar el porcentaje de degradación de la materia orgánica, así mismo se determinó en promedio 44,35 L de biogás, en el biodigestor natural s4 Loop (100 kg/día) en el cual se espera una producción de biogás de 8,1 L/día y del biodigestor natural s4 Loop (1t/día) se espera una

producción de biogás de 80,6 L/día lo cual es un valor óptimo para su respectivo aprovechamiento como combustible, igualmente se espera un promedio de 0,875 kg de bioabono para ser utilizado en cultivos o plantas». [48]

En la referencia dos se puede identificar que el rango de variación de pH en los cuatro meses estuvo entre 6,9 y 7,3; considerándose como óptimo para el proceso de digestión. El autor establece que los valores de pH a medida que se acercan a la salida se van estabilizando en el rango básico, lo cual es importante para el equilibrio en la etapa de metanización, cuyos rangos se encuentran dentro de los límites permisibles de la normatividad para verter en suelos y aguas. Así mismo encontraron remociones promedio de DBO, DQO y SST de 97,4%, 96,1% y 95,1% respectivamente, valores que se estabilizaron al comenzar la etapa metanogénica. La alta remoción de los sólidos totales se debe a que gran parte de éstos, son sólidos volátiles, que son la materia prima para la producción del biogás, y en la medida que la producción de biogás sea mayor, mayor serán los porcentajes de remoción. Igualmente los valores de nitrógeno son óptimos y dentro de los valores normales para excretas porcinas, en cuanto a la producción de biogás se obtuvo un valor de 62300 L por semana el cual es óptimo para su respectivo aprovechamiento como combustible limpio o en la generación de energía, el sistema en serie de un biodigestor GTZ y uno Taiwán, es una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. [49]

En la referencia tres se puede identificar que durante el proceso de metanogénización de residuos, se encuentran unos rangos característicos de pH para cada una de las etapas, fase hidrolítica valores entre 7 a 7,2, acidogénica entre 5,5 a 6,5 y por último la fase metanogénica de 6,8 a 7,4 siendo este último el pH favorecedor para la reproducción de los microorganismos encargados de transformar las moléculas de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogeno y algunos ácidos, formadas en las fases anteriores en metano. De igual forma podemos identificar en la tabla 6 que no están los valores de DQO por lo tanto no sabemos el porcentaje de degradación de la materia orgánica durante el proceso del biodigestor, sin embargo durante el estudio el autor determina que la conversión de biogás a electricidad está en un 16% lo cual indicaría una generación de energía real de 22,9kWh, con lo cual se garantiza el cubrimiento de la necesidad energética. Al finalizar el autor escoge el biodigestor flexible y el de almacenamiento convencional para aplicar en la finca puesto que este presenta un menor tiempo de retención y así mismo este

debe ser alimentado a diario con una cantidad de 72kg de estiércol vacuno y 7,8kg de equino, adicionalmente debe tener una disolución de 3:1 (agua: estiércol) para evitar posibles atascamientos en el biodigestor. [50]

En la referencia cuatro el autor observa que el comportamiento de los AGV según la variación del pH; la tendencia fue la misma que en la etapa de arranque, mientras el pH aumenta, los AGV disminuyen. En este caso los AGV se reducen constantemente, lo cual favorece la fase metanogénica y la producción de biogás. «El pH a pesar de sus variaciones se mantiene entre 6,80 y 6,93, así mismo el autor estableció además que para temperaturas ambientales de 18 a 21 grados centígrados como las de este ensayo, es adecuado trabajar 15 días de tiempo de retención y una carga volumétrica diaria de 0,066 m³/m³ de biodigestor. Con estos parámetros se puede esperar una remoción de DBO mayor del 90% y de DQO mayor del 89%, y una producción de biogás de 184 L diarios por m³ de biodigestor el cual es óptimo para su aprovechamiento, igualmente las concentraciones de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal logradas en los efluentes de los biodigestores requieren de un posterior tratamiento, puesto que bajo estas condiciones pueden alterar de manera nociva el medio ambiente, el autor establece que los valores de producción de biogás no varían mucho con los materiales del biodigestor (plástico y geomembrana) la única diferencia notable entre los dos materiales es el costo, pues un biodigestor de 3m de longitud y 1m de diámetro cuesta en Colombia US\$ 33 en plástico y US\$ 100 en membrana de PVC y aunque este último sea de un costo mayor es el que presenta una mayor durabilidad». [51]

2.4. Degradación de materia orgánica por larvas de moscas

Este tipo de composta es muy poco conocida, siendo más difundida la de lombrices. “En los últimos años la inducción con larvas de moscas soldado (*Hermetia illucens*) ha tomado fuerza debido a su rapidez de degradación, consumo de diferentes tipos de residuos, además de que en algunos lugares también se han implementado como ingrediente para la alimentación de los animales, alimento con niveles altos de proteína”. [52]

La mosca soldada negra, conocida científicamente como *Hermetia Illucens L* se encuentra en la naturaleza en una amplia variedad de hábitats especialmente al norte y sur de América. Su identificación taxonómica es:

- **Reino:** Animal

- **Phyllum:** Artrópoda
- **Clase:** Insecta o Hexápoda
- **Subclase:** Pterigotas
- **División:** Endoterigotas
- **Orden:** Díptera Brachycera
- **Superfamilia:** Stratiomyoidea
- **Familia:** Stratiomyidae
- **Género:** Hermetia.
- **Especie:** H. Illucens. (Gamboa, E; Jaspón, N. 2008).

2.4.1 Condiciones

«Se desarrollan en una amplia variedad de materiales en descomposición, incluyendo frutas, vegetales, desperdicios humanos y animales y animales muertos. Sus huevos son depositados en conjunto dentro de la materia en descomposición y eclosionan en cuatro días. Su temperatura óptima de crecimiento puede estar alrededor de los 24 C° – 30 ° (75°F) y las larvas se desarrollan a través de cinco estadios en dos semanas o más». [53]

2.4.2 Formación

“Se puede aplicar cualquier tipo de materia orgánica, solamente debe ser en recipientes cerrados. Entre los recipientes es más común de madera o tambos de plástico. Se forma dos capas: la inferior será de mayor tamaño y es conformada por la materia orgánica y la superior será una ligera y poco densa capa de larvas”. [52]

«La incubación de los huevos se realiza en cámaras especiales durando de 3 a 4 días, poniendo alrededor de 500 a 1200 huevecillos por mosca. En condiciones ideales, a cuatro días la larva eclosiona y puede madurar en 10 días. Al eclosionar las larvas se colocan sobre la materia orgánica para que comiencen a degradar. Pueden convertir 5 kg de materia orgánica a 1 kg de pupa. Cuando las larvas están listas de transformarse en pupa, tienen un instinto natural para salir de la pila de composta (esto es para evitar que se enterrado y sofocarse). El instinto de las larvas permite que sea fácil para los agricultores recolectar las pupas. Posterior de recolectar las pupas se colocan de nuevo en una cámara limpia y se espera que se convierten a moscas, se reproduzcan y generen nuevamente huevecillos reiniciando el ciclo». [52]

«Las larvas trabajan mucho más rápido que los procesos con lombrices o compostaje y eliminan el 95% de los desechos orgánicos; son fuente de proteínas y grasas para la alimentación animal, y los lixiviados provenientes de este proceso son de uso agrícola como fertilizantes para la floricultura. El empleo de este tipo de organismos con fines alimenticios es una práctica que día a día se fomenta en el mundo, dadas las diversas posibilidades que esto permite no solo alimenticias sino a nivel económico. Este tipo de larva no es un transmisor de enfermedades, por el contrario, se encuentra en lugares con alta cantidad de desechos orgánicos eliminando otras larvas y moscas que son generadores de enfermedades». [53]

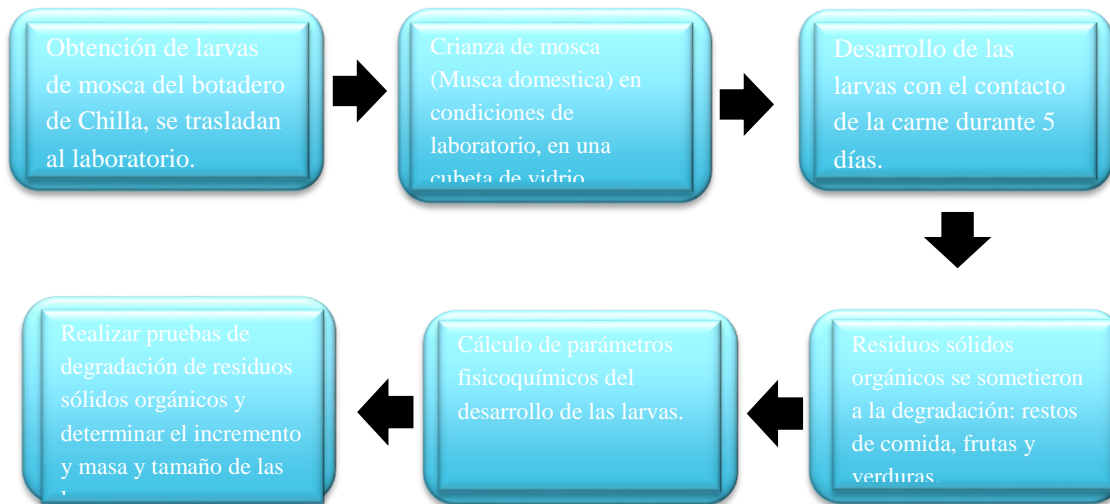
De acuerdo con la información del proceso de degradación de materia orgánica por larvas de mosca se dan a conocer 4 artículos con las respectivas metodologías las cuales se pueden observar a través de los diagramas 17,18, 19 y 20 y los resultados se pueden verificar en la tabla 7 y se realizan los respectivos análisis de acuerdo con los parámetros de medición.

- Metodología “Evaluación de la degradación de residuos sólidos orgánicos por larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*), en la Ciudad de Juliaca”, 2017

El presente estudio permite conocer la capacidad de desintegración de todo elemento orgánico mediante el uso de gusanos de mosca (*Musca domestica*) especie común de la ciudad mencionada anteriormente. «La degradación de la materia orgánica por larvas de mosca doméstica, se tiene evidencia científica que las mosca soldado negra (*Hermetia Illuscens l*) tiene capacidad de degradar materia orgánica en tiempos relativamente cortos. El presente estudio tuvo como objetivo establecer la capacidad de degradación de residuos sólidos orgánicos con intervención de larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*). La presente investigación de acuerdo a los resultados esperados es de tipo descriptiva y de diseño experimental, las larvas de mosca fueron obtenidas en cultivo en laboratorio, para posteriormente experimentar con 42,9g de larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*) en 360g de residuos sólidos orgánicos; la degradación de materia orgánica se evidenció con la disminución de la masa de residuos sólidos orgánicos e incremento del tamaño y masa de larvas de mosca», la metodología de este estudio se puede verificar a través del diagrama 17. [54]

Figura 27.

Evaluación de la degradación de residuos sólidos orgánicos por larvas de mosca doméstica (musca domestica), en la Ciudad de Juliaca



Nota. Diagrama de proceso en el cual se hace uso de la degradación de materia orgánica por medio de la larvas de moscas domesticas.

«La degradación de residuos sólidos orgánicos mediante larvas de mosca doméstica (Mosca domestica) está en función al desarrollo de las mismas, la que se evidencia con el incremento del tamaño y masa; por lo que, el tamaño promedio de desarrollo de las larvas está considerada como 11 mm; sin embargo, se observa un incremento considerable en el tamaño de las mismas, promedio 8,3 a 9 mm es al inicio del trabajo de investigación antes de someterlas a residuos sólidos orgánica y luego de ser sometidas a los residuos sólidos orgánicos para la degradación por larvas de mosca (Musca domestica) varia el crecimiento de las larvas de un promedio de 15 a 17mm en las seis pruebas que se realizó. El peso promedio de desarrollo de las larvas está considerado como 0,85g; sin embargo, se observa un incremento considerable en el peso de las mismas, al someterlas a la degradación de los restos de alimentos, verduras, frutas y entre otros de un valor de 0,45 g hasta 1,2 g, pero no es determinante por los días de exposición, a partir del día 7 se desarrolla mayor incremento de peso». [54]

El autor determina que el peso de la larva, por cada gramo que se incrementó de larvas de mosca se tiene una variación en la descomposición del material orgánico con una capacidad de

4,30%, del tamaño de larva; por cada milímetro de incremento de larvas de mosca se va tener una variación de degradación de 0,17%, la variación del peso acumulado que se tiene se va perder menos 9,42% si esta se incrementa en el mismo envase. [54]

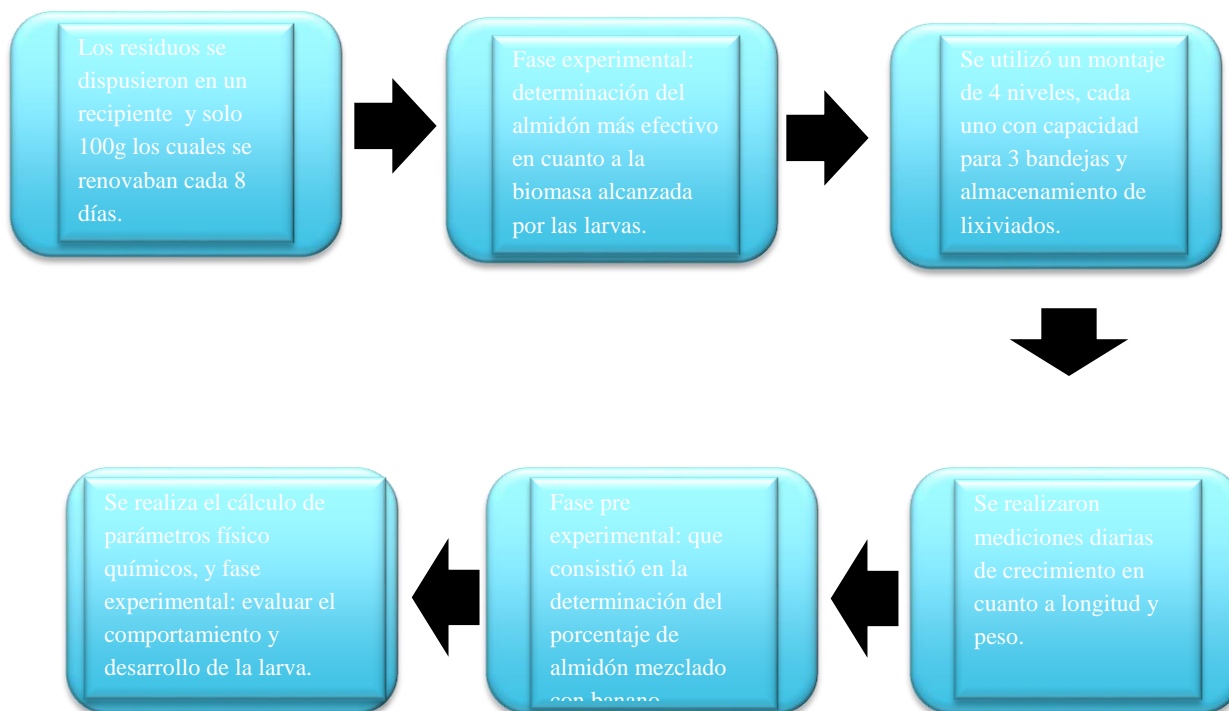
- Metodología “Degradación de residuos de almidón y cárnicos, mediante la producción de la larva soldada negra (*hermetia illuscens L.*)”, 2008

Esta investigación se realizó teniendo en cuenta la importancia ambiental y económica que implica una disminución de los residuos sólidos que llegan a los centros de disposición y rellenos sanitarios, los cuales en el caso de los residuos orgánicos constituyen el 65% del total de los residuos sólidos producidos diariamente en Colombia. Se pretende que sus resultados permitan establecer la calidad de la harina de las larvas para incluirlas como materia prima en algunos procesos y al mismo tiempo generar un beneficio ambiental.

La alternativa que se plantea, es el uso de larvas de mosca soldada negra (*Hermetia Illucens L.*), en procesos de degradación de materia orgánica, compuesta por residuos de banano, yuca, papa, arracacha y un porcentaje de carne de res. La investigación estuvo compuesta por una fase pre experimental, y una fase experimental. [53]

Figura 28.

Degradación de residuos de almidón y cárnicos, mediante la producción de la larva soldada negra (*hermetia illuscens L.*)



Nota. Paso a paso de la utilización de la larva soldado negra como degradante de la materia orgánica con el fin de aprovechar estos residuos.

De acuerdo con la metodología planteada el autor determina que dentro del desarrollo de la pre experimentación se observó que el tamaño de los gránulos del almidón influye en el tiempo de degradación, ya que entre más pequeños sean estos más fácil es su asimilación por parte de las larvas. El caso más favorable fue el de las larvas alimentadas con arracacha, almidón cuyos gránulos varían de 5 a 27 μm y su forma es redonda, el tiempo de degradación para este almidón fue de 26 días, tiempo en el cual las larvas alcanzaron su último instar, mientras que en el caso de la papa el tiempo de degradación fue de 29 días y para las larvas alimentadas con yuca, el tiempo fue de 31 días. Así mismo el autor establece que las larvas de la especie *Hermetia Illucens L.* son más eficaces degradando almidones en descomposición que sustratos de procedencias animales y que este sustrato adicional influye negativamente en la tasa y efectividad de degradación del

porcentaje de almidón incluido, dado que este proceso fue más lento que en fases anteriores y generó la muerte de una cantidad considerable de larvas. [53]

Igualmente el autor establece que este proceso, ofrece ventajas ambientales en cuanto a que permite una clara disminución del volumen de residuos sólidos, adicionalmente un apropiado desarrollo del proceso en el que se tengan en cuenta las medidas de manejo ambiental anteriormente mencionadas, hace que este no genere impactos ambientales significativos, por lo cual su ejecución se hace viable. [53]

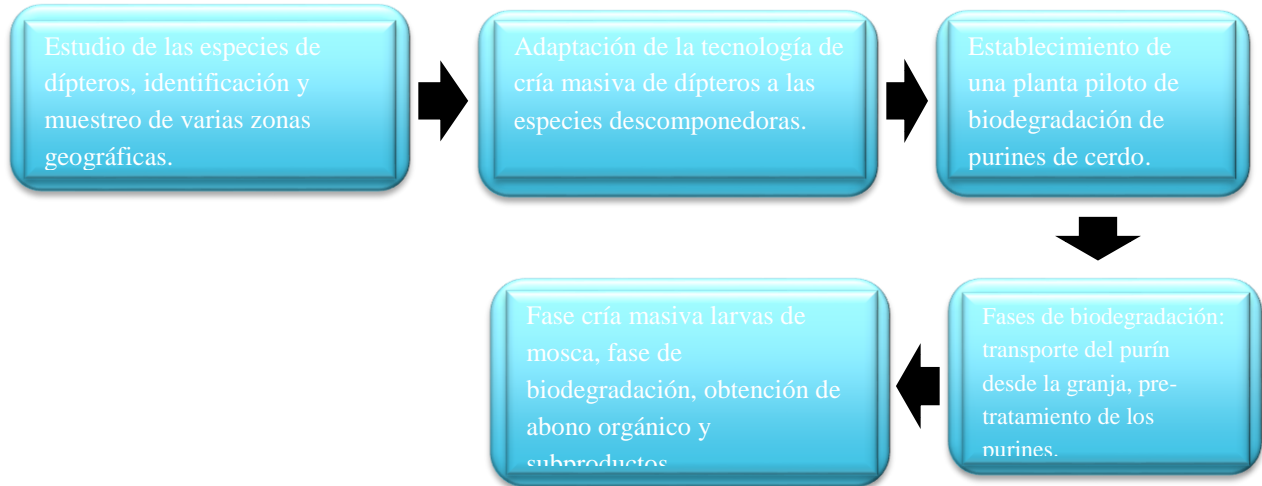
- Metodología “Proyecto Ecodiptera”, 2008

El objetivo del proyecto Ecodiptera es el de establecer un método alternativo y sostenible de gestión de purines porcinos. Para ello se aplicará el proceso natural de degradación de la materia orgánica animal mediante el uso de larvas de insectos (en concreto larvas de mosca, es decir dípteros).

“El estudio consiste básicamente en el tratamiento de los residuos porcinos mediante especies y variedades seleccionadas de dípteros descomponedores en su estado de larva. La descomposición se realizará mediante un proceso biológico (digestión larvaria), transformándolos en un producto estabilizado fácilmente utilizable como abono orgánico de gran calidad”, la metodología de este estudio se puede verificar a través del diagrama 19. [55]

Figura 29.

Proyecto Ecodiptera



Nota. Método alternativo para el tratamiento de residuos porcinos mediante dípteros en estado de larva.

«Los purines generados en las explotaciones porcinas, son transportados hasta el equipo de metacrilato especialmente diseñadas para la optimización del proceso, unos 50.000 adultos de mosca (por cámara) se reproducen generando millones de huevos de mosca. Posteriormente en la zona de Biodegradación los huevos se aplican en unos contenedores junto con los purines semisólidos. Durante su fase de desarrollo (7 días) las larvas se alimentan de la materia orgánica de los purines degradando hasta el 70 % de los residuos porcinos. Las larvas de mosca o las pupas son separadas del purín degradado». [55]

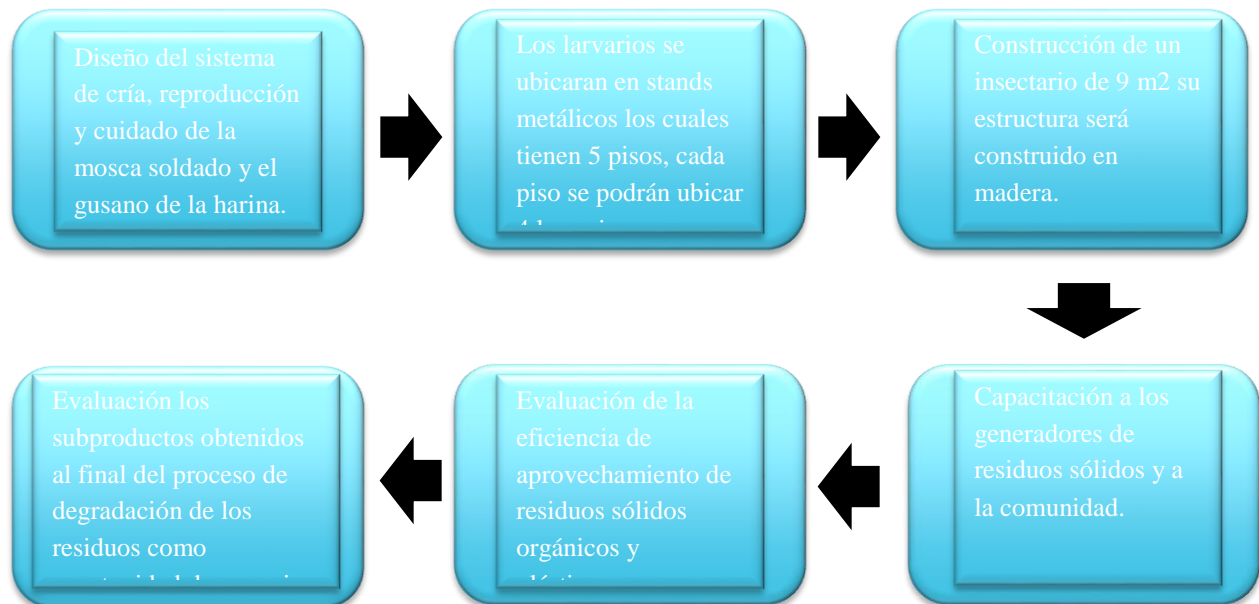
El autor determina que se necesitan 0,8 ml de huevos de mosca para degradar un kilo de purín pre-tratado (80% humedad). «Las larvas completan su desarrollo de huevo a larva en 6-7 días. Los adultos utilizados para la obtención de huevos deben ser reemplazados cada 30-45 días según las condiciones ambientales. Así mismo una producción de 25 ml de huevos de mosca diarios, permitirían la biodegradación de algo más de 30 kg de purín pre-tratado (80 % de humedad) al día, es decir de 3 toneladas de purín líquido con menos del 5% de sólidos totales). Considerando cinco días de puesta pueden degradarse 150 kg de purín pre-tratado a la semana, esto suma una capacidad de tratamiento anual de 7.800 Kg de purín pre-tratado al año». [55]

- Metodología “Evaluación de un sistema de vermicultura utilizando larvas de *hermetia illucens* y *tenebrio molitor* para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado la rosita”, 2018

El presente trabajo está dirigido a la búsqueda de una alternativa eficiente para solucionar la problemática ambiental relacionada con los residuos sólidos. Se plantea el uso de vermicultura, utilizando dos especies de larvas, la *Hermetia illucens* para degradación de residuos orgánicos y el *Tenebrio Molitor* para el tratamiento de poliestireno expandido. La evaluación estuvo conformada por una etapa de revisión bibliográfica, de diseño y una parte experimental, que consistió en la evaluación del sistema para la crianza, el ciclo de vida de ambas especies, los factores que alteran su cría, reproducción y degradación de los residuos, la metodología de este estudio se puede verificar a través del diagrama 20. [56]

Figura 30.

Evaluación de un sistema de vermicultura utilizando larvas de *hermetia illucens* y *tenebrio molitor* para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado la rosita



Nota. Proceso de aprovechamiento de residuos orgánicos teniendo a consideración el tipo de mosca más común llamado *hermetia illucens*.

De acuerdo con la metodología el autor determina que el desarrollo de un sistema que permita la degradación de materiales orgánicos y plásticos utilizando organismos vivos puede ser una opción viable en el ámbito económico debido a los beneficios que se obtienen, ya que en el proceso se generaran dos subproductos que dan viabilidad económica al sistema, el sustrato que puede ser usado para aplicarlo en diferentes cultivos agrícolas así como la utilización de pre-pupas como fuentes de proteína para la industria pecuaria debido a sus características nutricionales así como el gusto que les genera a los animales al alimentarse de estas. [56]

«La etapa de degradación de la materia orgánica se da a los 90 días y para la evolución de los subproductos obtenidos se realizó un análisis de los parámetros físico químicos para determinar la efectividad del proceso y así mismo establecer el porcentaje que se puede aprovechar como abono en cultivos, en cuanto al tenebrio Molitor, presenta características únicas, debido a su capacidad para sobrevivir alimentándose única y exclusivamente de Poliestireno expandido, un material no degradable que perdura por cientos de años, es así una alternativa que puede llegar a cerrar el ciclo de un material que presenta muchos impactos negativos en la tierra». [56]

Tabla 7.

Resultados de parámetros de medición de degradación de materia orgánica por larvas de mosca

Referencia	Temperatura	Ph	Humedad	Nitrogeno	% Abono
(Cahua, J., "Evaluación de la degradación de residuos sólidos orgánicos por larvas de mosca doméstica (musca domestica)", 2019)	16,5°c	8,5	/	/	80
(Gamboa, E; Jaspón, N., "Degradación de residuos de almidón y cárnicos, mediante la producción de la larva soldada negra (<i>hermetia illuscens L.</i>)", 2008)	30°c	8,43	47,84	5,33	95
(Layman, "Proyecto Ecodiptera", 2008)	23°c	/	80	2,45	70
(Gómez, W., "Evaluación de un sistema de vermicultura utilizando larvas de <i>hermetia illucens</i> y <i>tenebrio molitor</i> para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado la rosita", 2018)	29,3°c	8,3	52,7	3,26	55,1

Nota. Se hace la comparación de los respectivos artículos con el fin de observar de manera general las condiciones en la que se encuentra toda la materia.

En la referencia uno podemos evidenciar que los parámetros de medición son óptimos para el aprovechamiento del abono que se genera después del proceso, se obtiene un 80% de abono que puede ser utilizado como fertilizante para plantas, igualmente podemos identificar que hace falta verificar el porcentaje de humedad ya que de este parámetro depende el crecimiento de las larvas, de acuerdo a lo que el autor establece indica que la degradación de materia orgánica con larvas (*Hermetia illucens*) es similar a la degradación con mosca doméstica ya que los resultados no tiene mucha variación, así mismo determina que este proceso es una alternativa biológica lo cual en 7 días de exposición de las larvas de mosca doméstica en 360g de residuos sólidos orgánicos fueron reducidos a 20g de residuos sólidos orgánicos. Igualmente el autor recomienda realizar un mayor control de los parámetros ambientales en la degradación de residuos sólidos orgánicos, y que se haga el corte de la etapa larval en la etapa de pupa, subiendo o bajando de temperatura ambiente en el que se experimenta, para no proliferar enfermedades o tenerlas bien controladas. [54]

En la segunda referencia podemos identificar que realizan el análisis de todos los parámetros de medición los cuales sirven para determinar el desarrollo de la larva y su efectividad como agente de degradación de materia orgánica, igualmente el autor determina que con respecto a la efectividad de degradación de las larvas con los diferentes sustratos, se establece que esta es mayor cuando las larvas son alimentadas con arracacha, sin embargo es necesario tener en cuenta que este sustrato no es lo suficientemente efectivo en otros aspectos que deben considerarse como la adquisición de biomasa y proteínas por parte de las larvas, con los resultados obtenidos en el estudio de la harina de las larvas de *Hermetia Illucens L.* se considera que esta posee un contenido nutricional aceptable, igualmente en el estudio se determina que al finalizar el proceso de degradación se puede obtener un 95% de abono que puede ser utilizado en cultivos como fertilizante. [53]

En la tercera referencia el autor determina que después del proceso de degradación de materia orgánica se puede llegar a obtener 3500 kg de abono orgánico de gran calidad el cual fue aplicado en cultivos de maíz y girasol y fue comparado con otros fertilizantes de uso comercial y como resultado el autor establece que el abono orgánico obtenido tras el proceso de biodegradación produce unos resultados agronómicos similares o incluso superiores a varios de los fertilizantes existentes en el mercado europeo, así mismo el autor indica que el 100% de la sustancia obtenida tras el proceso de biodegradación larvaria, es una sustancia estable sin riesgo de contaminación de

las aguas por lixiviación, en cuanto a los parámetros de medición podemos identificar que hace falta el cálculo del pH el cual nos indica en qué condiciones se están desarrollando las larvas, sin embargo los demás resultados son óptimos para el respectivo aprovechamiento del abono orgánico derivado de este proceso adicionalmente este también se puede llegar a comercializar. [55]

En la referencia cuatro el autor obtiene abono después del proceso de degradación de la materia orgánica a través de la larva de mosca soldado negra y el gusano de harina y después de este proceso se obtuvo un 55, 1% de abono el cual es un porcentaje un poco bajo a comparación de otros estudios por esta razón el autor establece que en el diseño es necesario la implementación de otros sistemas para la evaluación conjunta donde se puedan comparar los resultados en la cría, reproducción de las especies y transformación de los residuos, las áreas de degradación y otros factores que puedan alterar el comportamiento de las especies a evaluar, igualmente recomienda que se realice la caracterización de los residuos que se generan en la plaza de mercado esto con el fin de mejorar el tiempo de degradación de la materia orgánica, sin embargo los demás resultados que se muestran en la tabla 7 son óptimos para el desarrollo del proceso de degradación y su posterior aprovechamiento. [56]

3. SELECCIÓN DEL MÉTODO ADECUADO PARA MUNICIPIO DE CHOACHÍ

De acuerdo con las tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos presentadas anteriormente se realiza el promedio de porcentaje de abono y biogás obtenido de cada artículo con el fin de determinar cuál de las tecnologías es la más eficiente para aplicar en el municipio de Choachí, estos valores se pueden observar a través de la tabla 8 del presente documento.

Tabla 8.

Promedio de porcentaje de abono y biogás

Tecnología	% Abono	Producción de biogás
Compostaje	84,74	/
Lombricultura	53.58	/
Digestión Anaerobia	5	228087 L
Biodigestores	2	26454,58 L
Degradación de materia orgánica por larvas de mosca	75,02	/

Nota. Datos finales luego de un promedio entre cada método tecnológico según la producción generada.

Con respecto a los valores presentados en la tabla 8. Podemos observar que el compostaje es el que presenta un mayor porcentaje de abono, sin embargo la digestión anaerobia también se puede aplicar puesto que tiene una producción alta de biogás, por lo tanto para determinar la tecnología más adecuada para aplicar en el municipio de Choachí se realiza una matriz de decisión con todas las tecnologías para así determinar la más eficiente y esta se puede verificar a través de la tabla 9.

Se toma en cuenta que la calificación de la matriz de decisión es de “4” siendo el más favorable para el municipio y “1” el menos favorable.

Tabla 9.

Matriz de decisión de tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos

Metodo	Cantidad de herramientas y equipos	Tiempo de generación de abono o biogás	Espacio de implementación	Complejidad para mantener las condiciones de operación	Producción de abono o biogás	Facilidad en implementación del proceso	Facilidad de obtención de equipos	Total
Compostaje	4	3	2	4	4	4	3	24
Lombricultura	3	4	3	2	1	2	2	17
Digestión anaerobia	1	1	1	1	3	1	1	9
Degradación de materia orgánica por larvas de moscas	2	2	4	3	2	3	4	20

Nota. Se realiza una adecuación de la característica de forma cuántica de tal manera que con el resultado se pueda determinar el método más adecuado para el municipio.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 9 podemos identificar que la mejor tecnología para aplicar en el aprovechamiento de los residuos orgánicos es el compostaje el cual se centra en la producción de abono para utilización como fertilizante en cultivos o plantas, para la aplicación de esta tecnología se pueden seguir los pasos y recomendaciones que se describen en el presente documento igualmente para aplicar en fincas del municipio de Choachí se puede utilizar la materia orgánica que se genera en el lugar como restos de comida o estiércol de vaca, cerdo o gallina y se debe realizar el respectivo control de los parámetros de medición para aumentar la producción y calidad del compost.

Igualmente se tiene en cuenta el tiempo en el que tarda la producción de abono o de biogás, el compostaje en este caso de acuerdo a los artículos mencionados anteriormente es el que tiene un menor tiempo de generación de abono puesto que en 90 días ya tiene un compost maduro que se puede utilizar en el sector agrícola, mientras que los demás métodos tecnológicos tardan hasta 120 días en obtener el resultado deseado para la su respectivo aprovechamiento.

Para llevar a cabo el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el proceso de compostaje se debe tener en cuenta la norma técnica colombiana NTC 5167/2011 en el cual se establecen los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes, en esta norma se establecen los niveles máximos de metales pesados, macro contaminantes, niveles máximos de patógenos.

Tabla 10.

Niveles máximos de metales pesados

Límites máximos de metales pesados	mg/Kg (ppm)
Arsénico (As)	41
Cadmio (Cd)	39
Cromo (Cr)	1 200
Mercurio (Hg)	17
Níquel (Ni)	420
Plomo (Pb)	300

Nota. Niveles que se presentan en el producto final del compostaje. Tomado de. NTC 5167 Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.

Tabla 11.

Niveles máximos para macro contaminantes

Macro contaminantes	Límite (% en ms)
Plástico, metal, caucho > 2mm	< 0,2
Vidrio > 2mm	< 0,02
Piedras > 5mm	< 2
Vidrio > 16mm detección (si/no) no	no

Nota. Macro nutrientes que están presentes en el compost, junto con los niveles requeridos de este. Tomado de. NTC 5167 Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.

- **Niveles máximos de patógenos:** Los fertilizantes y acondicionadores orgánicos, deberán acreditar demostrar que no superan los siguientes niveles máximos de microorganismos patógenos.

- **Salmonella sp:** ausente en 25 g de producto final.
- **Enterobacterias totales:** menos de 1000 UFC/g de producto final. (NTC 5167/2011)

Igualmente se deben tener en cuenta las recomendaciones estipuladas en la Resolución No-068370 del 27 de mayo de 2020 por el cual se establecen los requisitos para el registro de productor, productor por contrato, envasador, importador y departamentos técnicos de ensayos de eficacia agronómica de Bioinsumos para uso agrícola; así como los requisitos para el registro de Bioinsumos para uso agrícola; esta resolución hace referencia a los requisitos y registros que se deben tener como empresa generadora de bioabonos. (RESOLUCIÓN No. 068370/2020).

4. COSTOS DEL MÉTODO TECNOLÓGICO

Una vez definido el método más adecuado para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el municipio de Choachí, se procede a definir los costos respectivos para el proceso de compostaje, para ello se debe tener en cuenta que el análisis de costos se realiza teniendo como base una producción de 10 toneladas de compost.

4.1 Costos de capital

Para ello se puede usar una tabla de “gastos – ingresos” como la siguiente. El ejemplo económico utilizado es el de producción de compost a partir de cama de porcinos (Manual de compost) en el cual se puede hacer la relación directa con la planta que se puede ejecutar en el municipio.

En base a que el proyecto es de manera teórica y no se estableció un diseño de planta como tal, no se puede determinar los costos de un equipo en específico, más sin embargo basados en un estudio realizado por el manual del compostaje de la FAO en la cuenca Hidrográfica del Río Las Ceibas, Colombia, se puede determinar los equipos necesarios y el valor respectivo para cada equipo para un producción de 10 toneladas de compost como se muestra a continuación. Teniendo en cuenta que se realizó la conversión monetaria con el valor actual (USD = 3.466 COP).

Tabla 12.

Valor unitario por cada equipo o suplemento para planta de compostaje

Detalle	Cantidad	Costo unitario (usd)	Costo unitario (cop)	Costo total (usd)	Costo total (cop)
Recolección (jornal)	2	170	589.220	340	1'178.440
Transporte (jornal)	2	170	589.220	430	1'178.440
Control de parámetros (jornal)	6	200	693.200	1200	4'159.200

Tabla 12. Continuación

Pesaje y empacado (jornal)	0.5	14	48.524	7	24.262
Bolsas de polietileno	200	0.1	347	20	69.320
Cascarilla de arroz (kg)	750	0.86	3.000	645	2'250.000
Pala	2	8,65	30.000	17,3	60.000
Carretilla	1	78,5	272.081	78.5	272.081
Construcción compostera	1	11,3	39.166	11.3	39.166
TOTAL COP					9'227.909

Nota. Detalle de los costos de los implementos que están presentes en el proceso de compostaje junto con la mano de obra necesaria y los suplementos.

Tabla 13.

Valor monetario del compost

Detalle	Cantidad (ton)	Costo unitario (usd)	Costo unitario (cop)	Costo total (usd)	Costo total (cop)
Compost	10	370	1'500.000	3700	12'824.200
TOTAL COP					12'824.200

Nota. Valor a nivel del mercado del biocompost o bioabono teniendo en cuenta las base de cálculo tomada. A su vez se presenta el valor en moneda americana.

Con el resultado de la tabla 10 y la tabla 11 se puede determinar la ganancia bruta del proceso de compostaje restando los costos de producción al costo total del producto final, arrojando un valor de 3'596.291 COP, es decir un 28% del valor total de la venta.

Cabe destacar que los factores que se deben tener en cuenta para analizar los costos definitivos de la planta que se va a desarrollar son:

- Elección del sistema elegido (capítulo 4.2 Técnicas de Compostaje)
- Cantidad y tipo de material orgánico que se usa para compostar
- Cantidad de compost que se usará en la propia finca y cantidad destinada para venta

5. CONCLUSIONES

Los métodos tecnológicos son los que actualmente lideran la industria y avanzan hacia un resultado con mejores beneficios tanto económicos, como sociales. El documento presenta la explicación moderada de los cuatros métodos tratados, junto con sus debidos resultados teniendo en cuenta el método de cada autor en cada proceso.

Con respecto a la caracterización de los residuos orgánicos a pesar de haberse realizado de manera teórica se realizó un ejercicio a manera de predicción de acuerdo con la cantidad de residuos que se generan en el municipio y en este ejercicio se determinó que las propiedades físico químicas de los residuos orgánicos del municipio son aptas para realizar el respectivo aprovechamiento.

De acuerdo con el análisis realizado a los 4 métodos tecnológicos de aprovechamiento de los residuos orgánicos se determinó que el más efectivo es el compostaje el cual puede generar un alto porcentaje de abono que se puede aprovechar como fertilizante en cultivos agrícolas de las fincas del municipio de Choachi.

De acuerdo con los costos de los equipos y del funcionamiento de la planta se puede determinar que el proyecto puede llegar a tener un valor medio a la hora de totalizar el coste del proceso. Sin embargo esto se puede adecuar a la cantidad que se va a tomar como materia prima, en Choachí es de 45.9 toneladas al mes, por ende puede ajustarse de una manera adecuada al presupuesto, ya sea de la entidad privada o pública que ejercerá el proyecto. A su vez genera una ganancia de alrededor de 50-60 %.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alcaldía Municipal de Choachí, Cundinamarca, 2020. Disponible en: <http://www.choachicundinamarca.gov.co/>.
- [2] J. Granados, N. Pérez y A. Poveda, “Gestión integral de los residuos sólidos en el departamento de Cundinamarca”, Contraloría de Cundinamarca, Bogotá D.C., 2019. Disponible: <http://www.contraloriadecundinamarca.gov.co/images/INFORME%20RESIDUOS%20SOLIDOS.pdf>
- [3] Procolombia (Noviembre 19 de 2014) *Rutas y tarifas de transporte*. <http://www.colombiatrader.com.co/herramientas/rutas-y-tarifas-de-transporte>
- [4] Y. Torres, *Aprovechamiento de los residuos orgánicos y la implementación de bio -huertos domiciliarios en el asentamiento humano Millpo Ccachuana del Distrito de Ascensión – Huancavelica*, tesis mast., facultad de Ingeniería de minas, civil y ambiental, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, 2018. Disponible: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1965>
- [5] S. Álvarez, D. Duque, “Análisis de prefactibilidad de la construcción de una planta generadora de energía a partir de desechos orgánicos del oriente antioqueño”, Universidad EAFIT, Medellín, 2014
- [6] E. Reyes, E. Pérez, Managua FAREM-Estelí., “Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás” *Revista científica de FAREM.Estelí*, no. 31, sept, 2019. Disponible: <https://lamjol.info/index.php/FAREM/article/download/8474/8666?inline=1>
- [7] L. Cano., *Cuantificación del porcentaje de humedad y cenizas contenidos en los residuos sólidos urbanos de la parroquia de Limoncocha*, tesis pre., facultad de ciencias naturales y ambientales, Universidad Internacional SEK, Quito, 2016. Disponible: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2499/1/Cano%20Leslie%20Tesis%20UISEK.pdf>
- [8] J., Muñoz, *Metodología de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos y Bases Para el Desarrollo de un Laboratorio*, tesis pre., facultad de ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile, 1999. Disponible: file:///C:/Users/DELL/Downloads/UCO6800_01.pdf

- [9] E. Peñalosa, M. Castillo, B. Cárdenas y S. Rodríguez, *Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodología de compostaje y lombricultura*, Bogotá D.C. UAESP, 2019. Disponible: http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf
- [10] C. Mojica, E. Vidal, B. Rueda y D. Acosta, “*Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso potencial en la producción de biogás*” *Revista de Energía Química y Física*, vol. 3, no. 6, pp 15-22, Mar, 2016. Disponible: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num6/Revista_Energia_Quimica_Fisica_V3_N6_3.pdf
- [11] P. Márquez, M. Díaz y F. Cabrera, *Factores que afectan al proceso de Compostaje*, tesis pre., Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, España. Disponible: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>
- [12] T. Lastra, *Caracterización experimental de la fracción orgánica triturada de los rsu para valorar su incorporación al agua residual y tratamiento de una edar*, tesis pre., tratamiento de aguas, 2013. Disponible: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/44965/tfm%20-%20tania%20elizabeth%20lastra%20bravo.pdf;jsessionid=0EB6F33732186A33E696C34E803CCD9B?sequence=1>
- [13] N. Navarro, *Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de independencia*, tesis mast, facultad de ciencias forestales y de la conservación de la naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2017. Disponible: <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Navarro%20Natalia.pdf>
- [14] F. Jaya, *Estudio de los sólidos suspendidos en el agua del Río Tabacay y su vinculación con la cobertura vegetal y usos del suelo en la microcuenca*, tesis pre., facultad de ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28542/1/Trabajo%20de%20titulacio%20n.pdf>
- [15] A. Pérez, *Determinación de sólidos en el agua*, tratamiento de aguas, Ingeniería ambiental, Universidad de Lambayeque, Chiclayo, Lambayeque, 2013. Disponible: <https://es.slideshare.net/AFIPER/determinacin-de-solidos>

- [16] E. Castillo, D. Cristancho, V. Arellano, “*Estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos*” *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 5, no. 2, pp 11-22, Dic, 2003. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/571/1091>
- [17] C. Flores, *Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia*, tesis mast, facultad de ingeniería, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Querétaro, México, 2008. Disponible: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/350/1/Tratamiento%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20provenientes%20de%20rastros%20mediante%20digesti%C3%B3n%20anaerobia.pdf>
- [18] Alcaldía mayor de Bogotá, *Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá DC*, UAESP. 2011, Dic. Bogotá D.C, 2001. Disponible: file:///C:/Users/DELL/Downloads/residenciales_02-29-2012.pdf
- [19] J. León, *Modelación de la incineración de residuos sólidos urbanos como alternativa complementaria al relleno sanitario Doña Juana en Bogotá*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C, 2012. Disponible: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8977/S%El%InchezTolosaJorgeLe%F3n2012.pdf;jsessionid=739754B7524A0D20A87D943633AEDC65?sequence=1>
- [20] M. Varela, “*El compost, o cómo convertir tus residuos orgánicos en abono natural*” *Ecovidrio*, 2020. Disponible: <https://hablandoenvidrio.com/el-compost-o-como-convertir-tus-residuos-organicos-en-abono-natural/>
- [21] D. Bustos, *Propuesta para el aprovechamiento de residuos orgánicos en el colegio Summerhill School, empleando el compostaje*, tesis esp, facultad de ingeniería, Universidad Libre, Bogotá D.C, 2013. Disponible: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7139/BustosRamirezDianaMarcela2013.pdf?sequence=1>
- [22] G. Tortosa, “*La importancia de la relación carbono-nitrógeno en un compost*” *Compostando Ciencia Lab. Divulgación científica sobre agricultura y medio ambiente*, 2018. Disponible:

<http://www.compostandociencia.com/2018/04/la-importancia-de-la-relacion-carbono-nitrogeno-en-un-compost/>

- [23] L. Escobar, J. Robledo, “*Cartilla técnica de compostaje para residuos domiciliarios separados en la fuente*”, Universidad de Antioquia, CORANTIOQUIA, 2010. Disponible: http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/residuos%20solidos/ga_cn_8650_2010.pdf
- [24] Huichol, *Jardinería en el hogar, las 5 técnicas de compostaje*, 2015. Disponible: <https://huichol.com.mx/las-5-tecnicas-de-compostaje-mas-usadas>
- [25] O. Huerta, M. López, M. Soliva y M. Zaloña, “*Compostaje de residuos municipales: Control del proceso, rendimiento y calidad del producto*”, Agencia de residuos Catalunya, no. , 125-196, sept, 2008. Disponible en: <http://www.resol.com.br/cartilhas/compostaje.pdf>
- [26] I. Ospina, *Influencia de la aplicación de compost producido a partir de residuos de la caña de azúcar*, tesis pre., Universidad Nacional, Colombia, 2016.
- [27] F. Rojas, E. Zeledon, *Efecto de diferentes residuos de origen vegetal y animal en las características físico, químicas y biológicas del compost, Hacienda las Mercedes*, tesis pre., facultad de agronomía, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua, 2007. Disponible: <https://repositorio.una.edu.ni/2036/1/tnq02r741.pdf>
- [28] M. Rafael, *Proceso de producción y aplicación del producto microorganismos eficaces en la calidad compost a partir de la mezcla de tres tipos de residuos orgánicos*, tesis pre., facultad de ciencias forestales y del ambiente, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2015. Disponible: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3511/Rafael%20Avila.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] P. Román, M. Martínez y A. Pantoja, *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, 2013.
- [30] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*, Santiago de Chile, FAO, 2013.

- [31] S. Maldonado, *Lombricultura: Una alternativa productiva. Caso específico: Finca MAMAIA*, tesis pre., facultad de ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C, 2010. Disponible:
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7359/tesis395.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [32] P. Toccalino, M. Agüero, C. Serebrinsky y J. Roux, “*Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (Eisenia foetida) según estación del año y tipo de alimentación*”, *Revista Veterinaria*, vol.15, no. 2, pp. 65-69, nov, 2004. Disponible:
<https://revistas.unne.edu.ar/index.php/vet/article/view/2002>
- [33] A. Dávila, C. Ramírez, *lombricultura en pulpa de café*, Investigación en desarrollo en la central de beneficio Ecológico de Café en Anserma, Caldas, Colombia, 1996. Disponible:
http://kimera.com/data/redlocal/ver_demos/RLCF/RECURSOS/BIBLIOTECA%20CAFETERA/Z%20%20CENICAFE%20AVANCES%20TECNICOS/AT%20225ok%20lombricultura%20pulpa%20cafe.pdf
- [34] J. Marnetti, *Implementación de la producción de lombricultura*, tesis pre., facultad de ciencias económicas, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2012. Disponible:
https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/5236/marnettiproseso-productivo-de-abonos-organicos-lombricultura.pdf
- [35] Agencia de residuos de Catalunya, *Digestión anaerobia*, 2009. Disponible:
http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/
- [36] Arc-cat, *Guía de tratamientos de las deyecciones ganaderas*, Dic, 2004. Disponible:
<http://www.arc.cat/es/altres/purins/guia/pdf/ficha6.pdf>
- [37] R. Morales, *Digestión anaerobia*, Universidad de las Américas Puebla, México. Disponible:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/capitulo5.pdf
- [38] M. Medina, *Optimización del tratamiento de residuos provenientes de rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás*, tesis mast., facultad de

ingeniería, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Querétaro, México, 2010.

- [39] Mobius, valorizamos la biomasa residual, *Metanización seca*. Disponible: <http://mobius.net.co/metanizacion-seca/>
- [40] P. Conil, *Manejo de Vinazas: Metanización y Compostaje, Aplicaciones Industriales, Tecnicaña*, Nota técnica, pp. 26-30., 2006.
- [41] M. Bosch, *Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero*, tesis pre., facultad de náutica de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2011. Disponible: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13613/PFC_BOSCH_MARTI_ADRI%C3%80.pdf
- [42] T. Carneiro, M. Pérez y L. Romero, “*Biometanización de residuo sólido urbano: escala de laboratorio y planta piloto*”, *HOLOS Environment*, vol.7, no.1, pp. 87-104, dic, 2007. Disponible: <https://cea-unesp.org.br/holos/article/view/978/906>
- [43] E. Indiveri, *Biodigestor manual de uso*, Universidad Nacional de Cuyo, Secretaria de Desarrollo Institucional, Mendoza, Republica de Argentina. Disponible: <http://imd.uncuyo.edu.ar/upload/manual-uso-biodigestor.pdf>
- [44] Eco inventos Green Technology, *Clasificación de biodigestores*, 2020. Disponible: <https://ecoinventos.com/clasificacion-de-biodigestores/>
- [45] M. Varnero, *Manual de biogás*, FAO, Santiago de Chile, 2011. Disponible: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- [46] Secretaria de Estado de la Energía, *Curso de operación y mantenimiento de sistemas de biodigestion de pequeña y mediana escala*, 2019. Disponible: <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-2-Biodigesti%C3%B3n-anaer%C3%B3bica.pdf>
- [47] M. Merino, *Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao*, tesis pre., facultad de ingeniería, Universidad de

- Piura, Perú, 2019. Disponible:
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4239/IME_268.pdf?sequence=1&isAlloved=y
- [48] A. Díaz, *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya*, tesis mast., facultad de ingeniería, UPC Barcelonatech, 2013. Disponible:
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/20647/TFM_AITOR+DIAZ+DE+BA SURTO.pdf;jsessionid=E68F41D290FADDDFA98663612CDA92B19?sequence=1
- [49] J. Osorio, H. Ciro y H. González, “Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío”, *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol.60, no. 2, pp 4145- 4162, sept, 2007. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914078017.pdf>
- [50] B. Hernández, N. Ramírez, *Especificación de las condiciones de operación de un biodigestor usando como materia prima estiércol bovino y equino en la finca “Villa Italia” ubicada en el municipio Paipa*, facultad de ingeniería, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, 2019. Disponible:
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7385/1/6141228-2019-1-IQ.pdf>
- [51] G. Pedraza, J. Chara, N. Conde, S. Giraldo y L. Giraldo, *Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino*, Fundación Centro de Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria, Cali, 2002. Disponible:
<https://lrrd.cipav.org.co/lrrd14/1/Pedr141.htm>
- [52] S. Villarreal, *Compostaje: Opción para el manejo de desechos de explotaciones porcícolas*, porcicultura.com, 2019. Disponible:
<https://www.porcicultura.com/destacado/Compostaje%3A-Opcion-para-el-manejo-de-desechos-de-explotaciones-porcicolas>
- [53] E. Gamboa, N. Jaspón, *Degradación de residuos de almidón y cárnicos, mediante la producción de la larva soldada negra (hermetia illuscens L.)*, tesis pre., facultad de ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá D.C, 2008. Disponible:

https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1668&context=ing_ambiental_sañitaria

- [54] J. Cahua, *Evaluación de la degradación de residuos sólidos orgánicos por larvas de mosca doméstica (musca domestica), en la Ciudad de Juliaca*, tesis pre., Facultad de ingenierías y ciencia puras, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Perú, 2019. Disponible: file:///C:/Users/PC/Desktop/tesis%20billy/T036_73744154_T.pdf
- [55] Layman, “Proyecto Ecodiptera”, *Ecodiptera life*, pp 1-10, España, 2008. Disponible: https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE05_ENV_E_000302_LAYMAN_ES.pdf
- [56] W. Gómez, *Evaluación de un sistema de vermicultura utilizando larvas de hermetia illucens y tenebrio molitor para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado la rosita*, tesis pre., facultad de ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, 2018. Disponible: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5180/digital_36266.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXOS

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

Para obtener bajos costos a la hora de elegir los equipos se debe tener en cuenta un buen diseño de planta en donde se incluya la mejor optimización del proceso para así tener un mejor rendimiento a un menor precio.

Se recomienda realizar inicialmente la caracterización de los residuos orgánicos de las fincas del municipio en donde se vaya a realizar el aprovechamiento para validar si los parámetros de medición son los adecuados para aplicar la tecnología escogida.

Para obtener un mayor porcentaje de abono se debe realizar el seguimiento adecuado de las fases del compostaje así como se indica en el presente documento, con el fin de realizar un aprovechamiento mayor de todos los residuos orgánicos que ingresan por este proceso.

Mantener un control constante de los parámetros físico químicos de los residuos orgánicos durante todo el proceso del compostaje con el fin de obtener un mayor porcentaje de abono y de mejor calidad en un tiempo menor.